Техніка і технології

УДК 622.691.4
DOI: 10.31471/1993-9973-2020-1(74)-7-17

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІДВОДІВ ГАЗОПРОВОДІВ НА ВНУТРІШНЬОТРУБНІ ЕРОЗІЙНІ ПРОЦЕСИ

Я. В. Дорошенко

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42157,
e-mail: ya.doroshenko@nung.edu.ua

Досліджено вплив діаметра, кута вигину та радіуса вигину відводів газопроводів на місцезнаходження та величину їх ерозійного зношування. Дослідження виконано CFD (Computational Fluid Dynamics) моделюванням зі застосуванням Лагранжевого підходу (модель DPM (Discrete Phase Model)) у програмному комплексі ANSYS Fluent R19.2 Academic. Математична модель руху суцільної фази базується на розв'язанні системи рівнянь Нав'є-Стокса, нерозривності замкнених двопараметричною k-ε моделлю турбулентності з відповідними початковими та граничними умовами. Траєкторії руху дисперсних фаз відстежувалися шляхом інтеграції рівняння сил, які діють на частинки. Моделювання ерозійного зношування відводів газопроводів виконувалось із застосуванням рівняння Фінні. Дослідження виконані для п'яти різних зовнішніх діаметрів відводів газопроводу (89 мм, 219 мм, 530 мм, 1020 мм та 1420 мм). Кути вигину відводів складали 30°, 45°, 60° та 90°, а радіуси вигину DN, 1,5 DN, 2 DN, 2,5 DN та 3,5 DN. Суцільною фазою вибирався природний газ, дисперсною – пісок. Витрата дисперсної фази, швидкість руху дисперсної і суцільної фази на вході у відвід та тиск на виході кожного з модельованих відводів приймались однаковими. Результати моделювання були візуалізовані в постпроцесорі ANSYS Fluent побудовою полів швидкості ерозійного зношування на контурах відводів газопроводів. З візуалізованих результатів визначено, що найбільший вплив на місцезнаходження ерозійного зношування відводів газопроводів чинить радіус вигину відводу, а на величину ерозійного зношування – діаметр відводу. Встановлено вплив геометричних параметрів відводів на місцезнаходження поля їх максимального ерозійного зношування. Побудовано графічні залежності максимальної швидкості ерозійного зношування відводів газопроводів від їх геометричних параметрів.

Ключові слова: діаметр, дисперсна фаза, відвід, підхід Лагранжа, радіус вигину, кут вигину, рівняння Фінні, ерозійне зношування.

Исследовано влияние диаметра, угла изгиба и радиуса изгиба отводов газопроводов на местонахождение и величину их эрозионного износа. Исследование выполнено CFD (Computational Fluid Dynamics) моделированием с применением Лагранжевого подхода (модель DPM (Discrete Phase Model)) в программном комплексе ANSYS Fluent R19.2 Academic. Математическая модель движения сплошной фазы базируется на решении системы уравнений Навье-Стокса, неразрывности замкнутых двухпараметрической k-ε моделлю турбулентности с соответствующими начальными и граничными условиями. Траектории движения дисперсных фаз отслеживались путем интегрирования уравнения сил, действующих на частицы. Моделирование эрозионного износа отводов газопроводов выполнялось с применением уравнения Финни. Исследования выполнены для пяти различных наружных диаметров отводов газопровода (89 мм, 219 мм, 530 мм, 1020 мм и 1420 мм). Углы изгиба отводов составляли 30°, 45°, 60° и 90°, а радиусы изгиба DN, 1,5 DN 2 DN, 2,5 DN и 3,5 DN. Сплошной фазой выбирался природный газ, дисперсной – песок. Расход дисперсной фазы, скорость движения дисперсной и сплошной фазы на входе в отвод и давление на выходе каждого из моделируемых отводов принимались одинаковыми. Результаты моделирования были визуализированы в постпроцессоре ANSYS Fluent построением полей скорости эрозионного износа на контурах отводов газопроводов. С визуализированных результатов определено, что наибольшее влияние на местонахождение эрозионного износа

отводов газопроводов оказывает радиус изгиба отвода, а на величину эрозионного износа – диаметр отвода. Установлено влияние геометрических параметров отводов на местонахождение поля их максимального эрозионного износа. Построены графические зависимости максимальной скорости эрозионного износа отводов газопроводов от их геометрических параметров.

Ключевые слова: диаметр, дисперсная фаза, отвод, подход Лагранжа, радиус изгиба, угол изгиба, уравнение Финни, эрозионный износ.

The influence of diameter, bending angle and bending radius of gas pipelines bends on the location and extent of their erosion wear is investigated. The research is carried out with the help of CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation using the Lagrangian approach (Discrete Phase Model) in the ANSYS Fluent R19.2 Academic software. The mathematical model of the continuous-phase motion is based on the solution of simultaneous Navier-Stokes equations, the continuity of closed two-parameter k-ε model turbulence with the corresponding initial and boundary conditions. The motion trajectories of the dispersed phases are monitored by integrating the equations of forces acting on the particles. The simulation of erosion wear of the gas pipeline bends is performed using Finney equation. The investigations are carried out for five different external diameters of the pipeline bends (89 mm, 219 mm, 530 mm, 1020 mm and 1420 mm). The angles of the bends are 30°, 45°, 60°, and 90°, and the bend radii are DN, 1.5 DN, 2 DN, 2.5 DN, and 3.5 DN. Natural gas was selected as the continuous phase, and sand was selected as the dispersed phase. The flow rate of the disperse phase, the motion velocity of the dispersed and continuous phases at the inlet of the bend and the pressure at the outlet of every simulated bends are assumed to be the same. The simulation results are visualized in the ANSYS Fluent postprocessor by constructing erosion velocity rate fields on the contours of gas pipeline bends. On the basis of the visualized results, it is determined that the largest influence on the location of the erosion wear of the pipeline bends is caused by the bend radius, and the largest effect on the amount of the erosion wear is caused by bend diameter. The influence of the geometric parameters of the bends on the location of their maximum erosion wear field is established. Graphical dependences of maximum velocity of erosion wear of gas pipeline bends on their geometric parameters are constructed.

Key words: diameter, dispersed phase, bend, Lagrange approach, bending radius, bending angle, Finney equation, erosion wear.

Вступ

Відводами є криві гарячого гнуття з поворотом на кут 30°, 45º, 60º та 90º. Вони є важливими складовими малих і великих трубопровідних систем різного призначення. Особливо багато відводів є в обв'язках різних технологічних об'єктів – компресорних станцій магістральних газопроводів, газопереробних заводів, підземних сховищ газу, газорозподільних станцій тощо. Також відводи містять Г-, Z- і П-подібні компенсатори надземних переходів: вони є в місцях різких зломів рельєфу місцевості, поворотів траси трубопроводу.

Відводи газопроводів чинять суттєвий вплив на газодинамічні процеси, які відбуваються у їх внутрішній порожнині. У відводах змінюється напрямок руху газового потоку в результаті чого виникає відцентрова сила. Відбувається нерівномірний перерозподіл швидкості потоку та тиску [1], гідравлічні втрати енергії, ударяння твердих та рідких частинок (дисперсної фази), які містяться в потоці природного газу, до стінки відводу [2], що призводить до ерозійного зношування [3]. Ерозія відводів газопровідних систем може призвести до катастрофічних наслідків – витоків газу або розривів трубопроводу. Щоб забезпечити надійність відводів треба під час експлуатації газопроводу контролювати зміну величини і форми ерозійних дефектів стінки відводів. Для цього треба знати можливі місця їх ерозійного зношування.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Дослідження ерозійного зношування відводів трубопроводів виконуються експериментально та чисельно в програмних комплексах CFD моделювання. Також публікуються розслідування причин розривів відводів трубопроводів результатами яких є висновок, що аварія відбулась внаслідок ерозійного зношування відводу.

В [4] експериментально та числовим моделюванням виявлено місця максимального ерозійного зношування S-згину трубопроводу внутрішнім діаметром 12,7 мм з співвідношенням R/DБ, рівним 1,5. Дослідження виконувались для різних швидкостей потоку повітря та різних діаметрів зерен піску. Експериментальні результати підтвердили достовірність CFD моделювання. Ерозійне зношування відводів і трійників трубопроводів експериментально та CFD моделюванням досліджено в [5]. Для трійників дослідження виконувались для різних схем руху потоку повітря (потік рухається магістраллю трійника і з магістралі частина потоку перетікає у відвід трійника; потік рухається магістраллю трійника і з магістралі направляється у відвід

трійника; потік рухається відводом трійника і з нього спрямовується у одну з сторін магістралі трійника). Виявлено місця максимального ерозійного зношування досліджуваних фасонних елементів трубопроводів.

Ерозійне зношування відводів газопроводів зумовлене водно-рідкою фракцією інгібітора корозії та частинками сірки діаметром від 0,01 мм до 0,05 мм CFD моделюванням досліджено в [6]. Максимальна швидкість ерозії відводу збільшувалася зі збільшенням числа Стокса. Найбільшого значення вона досягла при діаметрі частинок сірки 0,05 мм та швидкості потоку 20 м/с. Також ерозійне зношування відводу збільшувалось зі збільшенням швидкості потоку та масової витрати частинок сірки. Тому було запропоновано швидкість потоку зменшити до максимально можливої величини і встановити сепаратор сірки.

Розслідування причин витоку з відводу трубопроводу діаметром 250 мм викладено в [7]. Відвід експлуатувався 2 роки. Результатами польових досліджень, візуального огляду, лабораторних випробувань та CFD моделювання показали, що причиною витоку з відводу було його ерозійне зношування. Причиною ерозійного зношування була значна кількість кремнеземного піску, який витікав зі свердловини.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми, якій присвячується дана стаття

Пошкодження відводів трубопроводів зумовлене ерозією відбувається у трубопровідних системах різного призначення, що призводить до розривів і багатьох негативних наслідків. На місцезнаходження і величину ерозійного зношування впливають багато різноманітних параметрів, зокрема геометричні параметри відводів газопроводів – діаметр та радіус вигину відводу, кут вигину відводу. Вплив цих параметрів на ерозійне зношування відводів газопроводів мало досліджений.

Цілями статті є дослідження впливу геометричних параметрів відводів газопроводів на місцезнаходження та величину їх ерозійного зношування.

Виклад основного матеріалу

Причиною ерозійного зношування відводів є двофазні або багатофазні потоки, які часто зустрічаються у трубопровідних системах різноманітного призначення. Багатофазні потоки в газопроводах зумовлені винесенням із свердловин частинок порід, піску, пластової води, вуглеводневого конденсату, сірки тощо. Також у внутрішній порожнині газопроводів може міститись окалина, яка відшарувалась від труб, продукти внутрішньотрубної корозії. Коли досягається точка роси перекачуваного газу за водою і вуглеводнями у внутрішній порожнині газопроводів, випадають конденсат і вода.

Щоб відбувалось ерозійне зношування винесені з свердловини або накопичені у внутрішній порожнині частинки повинні рухались газопроводом і вдарятись до стінки. Для цього потрібна відповідна швидкість газового потоку. За наведеними в [8] результатами досліджень за тиску 7 МПа мінімальна швидкість потоку для переміщення твердих частинок складає близько 3 м/с для трубопроводів діаметром 200 мм, 4 м/с – для трубопроводів діаметром 600 мм та 4,2 м/с – для трубопроводів діаметром 1200 мм. Рухаючись газопроводом, частинки ударяються до стінки в місці зміни їх напрямку (відводи, трійники, перехідники тощо), що призводить до ерозійного зношування.

Механізм ерозійного зношування та його величина залежить від кута атаки, під яким частинки ударяються зі стінкою. При малих кутах атаки відбувається різання поверхні, далі поєднується різання і пластична деформація і при великих кутах атаки, лобовому вертикальному ударянні відбувається пластична деформація. Кут атаки найбільшою мірою визначаються геометрією відводів.

Для своєчасного та якісного обстеження відводів треба знати місця їх максимального ерозійного зношування та прогнозувати величину ерозійного зношування. Прогнозування місця та величини ерозійного зношування відводів газопроводів є надзвичайно складною задачею через багато різноманітних наведених вище параметрів та процесів, які впливають на ерозію. Вимірювати ерозійні пошкодження у випадку їх прогресування складно. Додатковим ускладненнями є відсутність значень початкових товщин стінок відводів газопроводів, які повинні бути зазначені в паспортних характеристиках, велика кількість відводів знаходиться під землею і є ізольована. Тому оператори газопроводів повинні розуміти це явище, стежити за складом газового потоку та мати якісні розрахунки і дані вимірювань усіх їх газопровідних систем для попереднього прогнозування будь-якого потенційного виходу з ладу трубопроводу.

Сучасним загальновизнаним дослідниками способом, який дає змогу максимально повно зрозуміти складну динаміку руху газового потоку, дослідити ерозійне зношування відводів

газопроводів, є CFD моделювання. На сучасному етапі розвитку можливості таких моделювань досягли високого рівня і весь час збільшуються, чим є привабливими для наукових досліджень. Вони дають змогу детально дослідити складний потік.

CFD моделювання тривимірних газових потоків у відводах було виконано у програмному комплексі ANSYS Fluent R17.0 Academic. В ANSYS Fluent для моделювання ерозійного зношування закладено Лагранжевий підхід (модель DPM (Discrete Phase Model – модель дискретної фази)). DPM модель дає змогу побудувати і дослідити траєкторії руху частинок дисперсної фази в суцільній фазі розв'язанням диференційного рівняння руху частинок. Модель враховує двосторонній обмін масою, імпульсом і енергією частинок із суцільною фазою. DPM модель застосовується для невеликих значень об'ємної концентрації частинок оскільки їх взаємодія між собою врахована опосередковано. Перевагою DPM моделі є точне врахування характеру взаємодії дисперсної фази зі стінкою. У рамках моделі взаємодії дисперсної фази зі стінкою є модель ерозії стінки. Недоліком DPM моделі є обмеження на локальну об'ємну концентрацію частинок (менше 10 %).

Зі збільшенням обсгу пам'яті комп'ютерів та потужності їх процесорів Лагранжевий підхід стає все кращим способом дослідження багатофазних трубопровідних потоків, ерозійного зношування оскільки все менше часу потрібно для таких моделювань; складніші елементи трубопровідних систем можна дослідити.

Комплексна процедура CFD моделювання складається з трьох етапів:

– моделювання газового потоку (суцільної фази) у відводах;

– моделювання руху частинок у газовому потоці відводами;

– розрахунок ерозійного зношування відводів.

Рух суцільної фази в CFD моделюється чисельним розв'язуванням рівнянь Нав'є-Стокса і нерозривності.

Зміна напрямку газового потоку у відводі призводить до зміни його швидкості, що спричиняє зміну імпульсу та енергії і зумовлює турбулентність. Турбулентність потоку моделюється стандартною k-ε моделлю (k – кінетична енергія турбулентності, ε – швидкість дисипації турбулентності).

Підхід Лагранжа полягає в відстежуванні руху окремо взятих частинок дисперсної фази під дією сил з боку потоку суцільної фази. Траєкторії частинок прогнозуються шляхом інтеграції рівняння сил, які діють на частинки. Сили, які діють на частинки, обумовлені різницею швидкості частинки і швидкості потоку суцільної фази, а також витісненням цією часткою середовища суцільної фази. У рівнянні балансу сил інерція частинок дорівнює силам, прикладеним до частинки

$$m_ч \frac{du_ч}{dt} = 3\pi\mu d_ч C_{cor}\left(u - u_ч\right) + \frac{\pi d_ч^3 \rho}{6}\frac{du}{dt} + \frac{\pi d_ч^3 \rho}{12}\left(\frac{du}{dt} - \frac{du_ч}{dt}\right) + F_e - \frac{\pi d_ч^3}{6}\left(\rho_ч - \rho\right)\vec{\omega}\times\left(\vec{\omega}\times\vec{r}\right) - \frac{\pi d^3 \rho_ч}{3}\left(\vec{\omega}\times u_ч\right), \quad (1)$$

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).

Ліва частина рівняння (1) 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, оточуючій 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 (1) треба врахувати деякі додаткові сили (наприклад у разі наявності в потоці значного перепаду температур).

Рівняння (1) є диференційне рівняння першого порядку, в якому єдиною невідомою величиною є швидкість частинки $u_ч$, а аргументом – час t. Швидкість потоку суцільної фази u у всіх точках простору вважається відомою і

ISSN 1993–9973 print
ISSN 2415–332X online

визначається розв'язуванням рівнянь Нав'є – Стокса і нерозривності. Вихідними даними крім розміру і властивостей частинки є її положення в початковий момент часу [9].

Моделювання ерозійного зношування відводів газопроводів виконувалось за формулою Фінні, яка була розроблена для пластичних матеріалів аналізом рівнянь руху однієї частинки під час її зіткнення з поверхнею. Для цього досліджувалась траєкторія руху частинки. Згідно з моделлю Фінні питома швидкість ерозії (маса поверхні вилучена з одиниці площі за одиницю часу) на поверхні рівна

$$E = Ku_{ч}^{n} f(\theta), \qquad (2)$$

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 вона має вигляд

$$f(\theta) = \begin{cases} A\theta^2 + B\theta & ...\theta \le \varphi \\ X\cos^2\theta \sin(W\theta) + Y\sin^2\theta + Z & ...\theta > \varphi \end{cases}, \qquad (3)$$

де A, B, W, X, Y, Z, φ – емпіричні коефіцієнти. [10]

Основними параметрами відводів газопроводів є діаметр $D_з$, радіус вигину R та кут вигину φ (рис. 1). Вплив цих параметрів на ерозію відводів достатньо не вивчений. Щоб дослідити їх вплив на місцезнаходження і величину ерозійного зношування було накреслено тривимірні моделі внутрішньої порожнини відводів конструкція та геометричні розміри яких ідентичні промисловим зразкам і відповідає ТУ У 27.2-05747991-001 [11] та ОСТ 102-61 [12]. Було вибрано п'ять різних зовнішніх діаметри відводів – 89 мм, 219 мм, 530 мм, 1020 мм та 1420 мм. Для діаметру 530 мм були накреслені відводи з радіусом вигину DN (DN – умовний діаметр відводу) та кутами вигину 30°, 45°, 60° та 90°, а також з кутом вигину 90° та радіусами вигину DN, 1,5 DN, 2 DN, 2,5 DN та 3,5 DN. Відводи були накреслені з прилеглими ділянками труб. Товщини стінки відводів і прилеглих труб розраховувались для відповідного тиску. За значенням номінальної товщини стінки відводів і труб визначались їх внутрішні діаметри.

Коефіцієнт еквівалентної шорсткості стінок відводів і ділянок труб задавався рівним 0,03 *мм*. Тип граничної умови для дисперсної фази вибирався Reflect – відбивання частинки від стінки (кут падіння рівний куту відбивання).

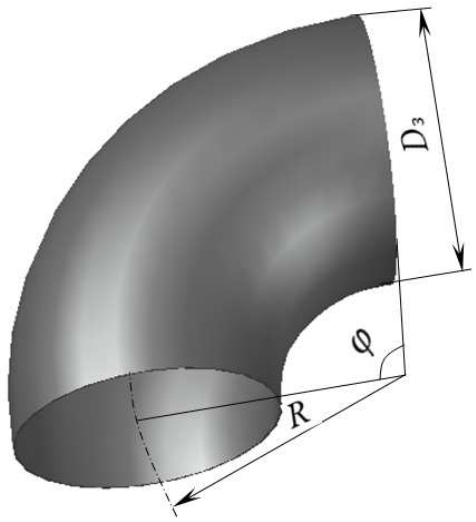


Рисунок 1 – Геометричні параметри відводу

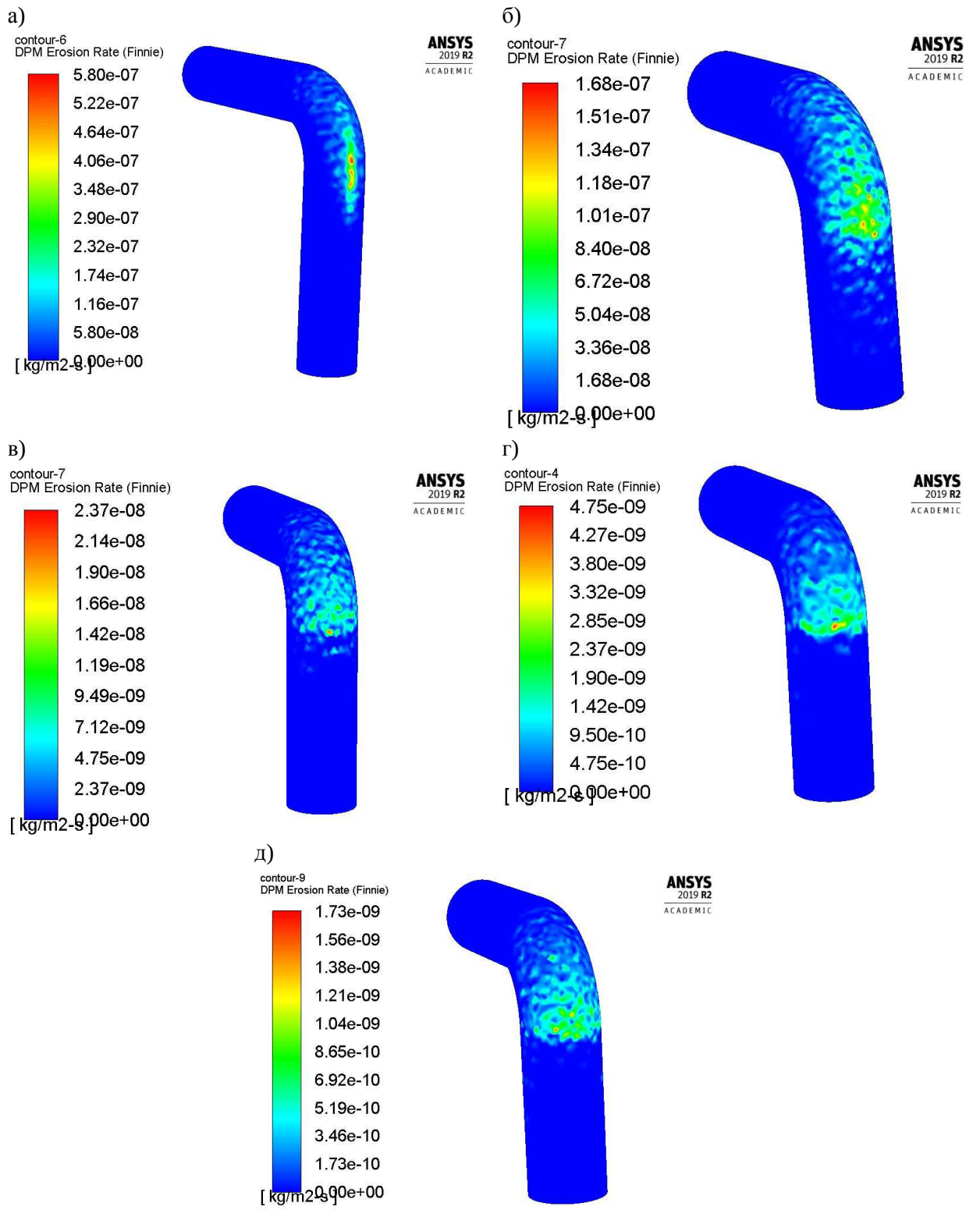
Моделювання було виконано для піску, який є однією з найбільших загроз цілісності відводів промислових газопроводів, якими газ транспортують від свердловин до систем очистки. Особливо це стосується транспортування сланцевого газу на ранніх стадіях видобування, коли швидкість газового потоку є максимальною. Також він є у внутрішній порожнині магістральних газопроводів.

Суцільною фазою був вибраний природний газ. Швидкість газового потоку на вході у відвід задавалась рівною 13 м/с. Швидкість та температура частинок дисперсної фази на вході в відвід приймалась рівною швидкості та температурі суцільної фази на вході. Температура суцільної фази відповідає умовам експлуатації газопроводів і задавалась 273 К. Дисперсна фаза вводились рівномірно на вході і задавалась сферичної форми діаметром, рівним 0,1 мм. Витрата піску на вході в відвід задавалась рівною 0,001 кг/с.

Результати CFD моделювання візуалізовувались в постпроцесорі ANSYS Fluent побудовою полів швидкості ерозійного зношування на контурах відводів, що дало змогу виявити місця та визначити величину максимального ерозійного зношування відводів.

Для кращого розуміння процесів ерозійного зношування відводів доцільно ознайомитись з результатами дослідження динаміки руху багатофазних потоків відводами [13] та дослідженнями динаміки руху газу відводами [1].

Щоб встановити вплив діаметра відводу газопроводу на величину і місце його ерозійного зношування, досліджувались відводи зовнішнім діаметром 89 мм, 219 мм, 530 мм, 1020 мм та 1420 мм.



а) – D_3=89 мм; б) – D_3=219 мм; в) – D_3=1020 мм, г) – D_3=1420 мм

Рисунок 2 – Поля швидкості ерозійного зношування на контурах відводів різних діаметрів

Результати CFD моделювання (рис. 2) показують, що інтенсивне ерозійне зношування відбувається з опуклого боку відводу в місці виходу з нього газового потоку між кутом 60° і 90° відводу та на початку привареної до відводу труби в напрямку руху продукту. Причому зі зменшенням діаметра відводу поле максимального ерозійного зношування все більше поширюється на приварену до відводу трубу. Для діаметру відводу 89 мм його довжина на привареній до відводу трубі настільки велика, як і на відводі.

ISSN 1993–9973 print
ISSN 2415–332X online

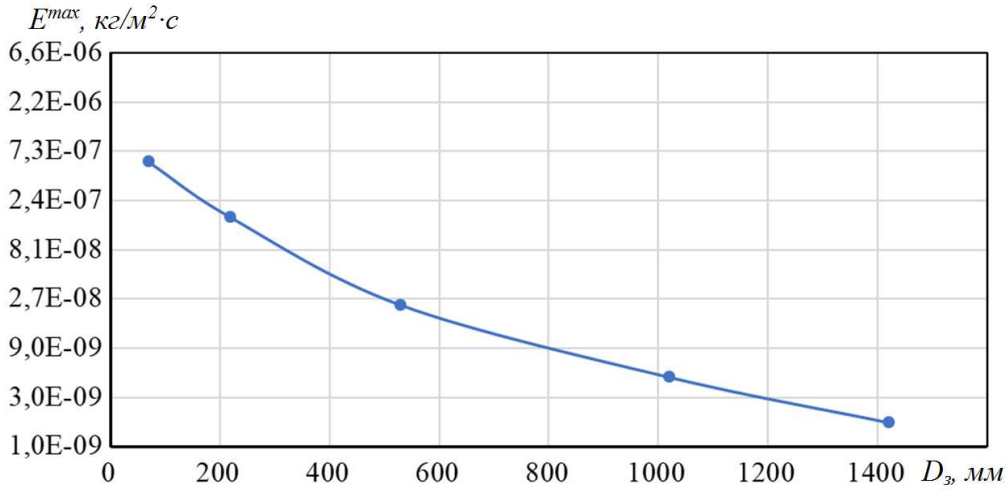


Рисунок 3 – Залежність максимальної швидкості ерозійного зношування від зовнішнього діаметра відводу

Діаметр відводу газопроводу має значний вплив на величину його ерозійного зношування при усіх інших незмінних параметрах. У разі зменшенні діаметра відводу спостерігається різке збільшення величини ерозійного зношування (рис. 3). Якщо діаметр відводу газопроводу зменшується від 1420 мм до 89 мм, величина максимальної швидкості ерозійного зношування відводів збільшується від $1{,}73\cdot10^{-9}$ $кг/м^2\cdot с$ до $5{,}8\cdot10^{-7}$ $кг/м^2\cdot с$. Причому найбільше збільшення максимальної швидкості ерозійного зношування відбувається коли діаметр відводу менший 530 мм.

Щоб встановити вплив кута вигину відводу газопроводу на величину і місце його ерозійного зношування, досліджувались відводи зовнішнім діаметром 530 мм з кутами вигину 30°, 45°, 60° і 90°.

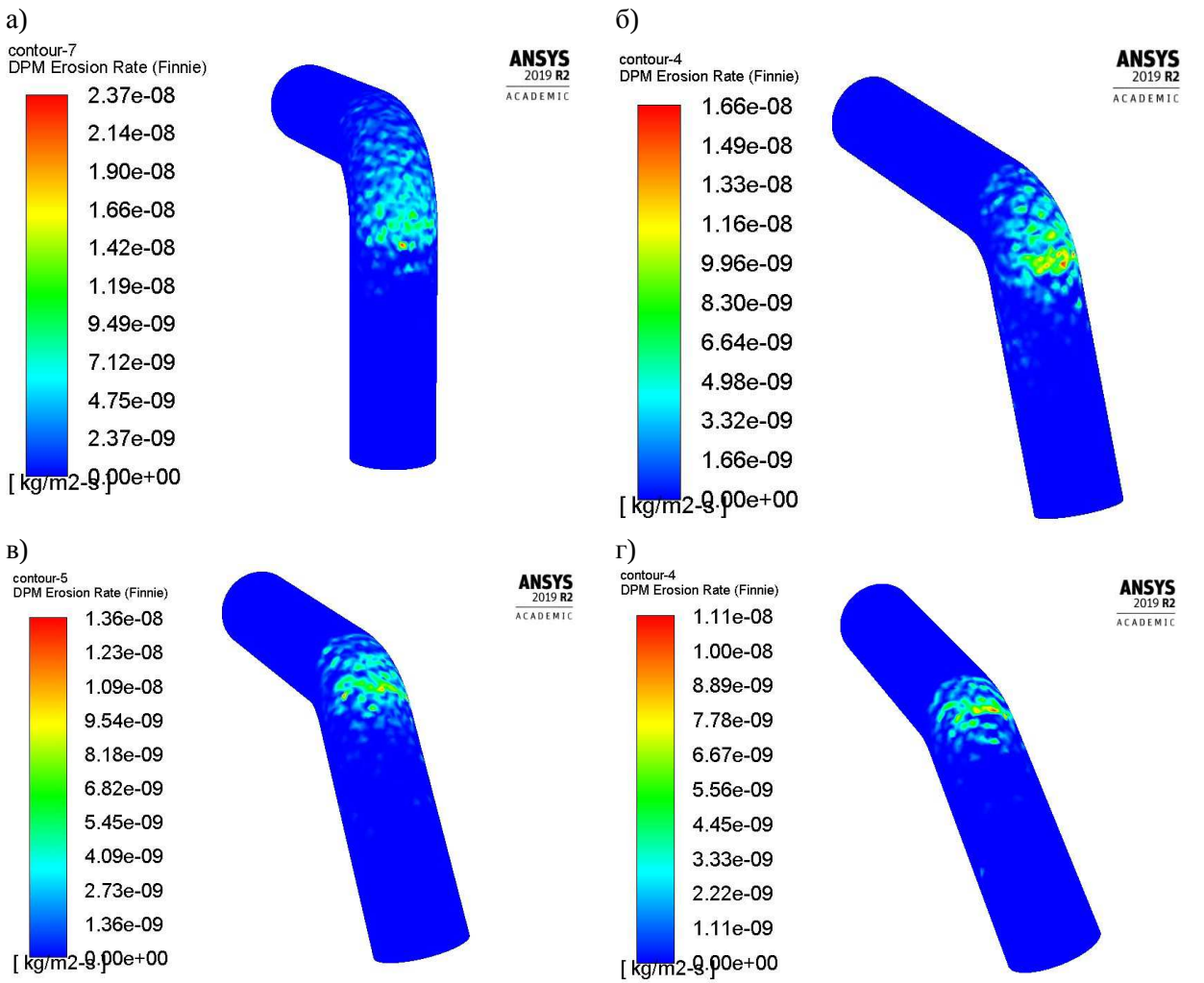
Результати CFD моделювання (рис. 4) показують, що зі зменшенням кута вигину відводу поле максимального ерозійного зношування все більше зміщується від місця виходу з відводу газового потоку до середини опуклого боку відводу. Так, якщо кут вигину відводу складає 90°, то поле його максимального ерозійного зношування розташоване в місці виходу з відводу газового потоку і на початку привареної до відводу труби. Якщо ж кут вигину відводу складає 30°, то поле його максимального ерозійного зношування уже зосереджено в середній частині опуклого боку відводу.

Кут вигину відводу газопроводу не чинить значного впливу на величину його ерозійного зношування при усіх інших незмінних параметрах. У разі зменшення кута вигину відводу спостерігається незначне зменшення величини його ерозійного зношування (рис. 5). Якщо кут вигину відводу газопроводу зменшується від 90° до 30°, величина максимальної швидкості ерозійного зношування відводів зменшується від $2{,}37\cdot10^{-8}$ $кг/м^2\cdot с$ до $1{,}11\cdot10^{-8}$ $кг/м^2\cdot с$.

Щоб встановити вплив радіуса вигину відводу газопроводу на величину і місце його ерозійного зношування досліджувались відводи зовнішнім діаметром 530 мм з радіусами вигину рівним DN, 1,5 DN, 2 DN, 2,5 DN та 3,5 DN.

Результати CFD моделювання (рис. 6) показують, що з збільшенням радіуса вигину відводу поле максимального ерозійного зношування з опуклого боку відводу все більше зміщується від місця виходу з відводу газового потоку до місця входу газового потоку в відвід. Так, якщо радіус вигину відводу рівний DN, то поле його максимального ерозійного зношування розташоване в місці виходу з відводу газового потоку і на початку привареної до відводу труби. Якщо ж радіус вигину відводу рівний 2 DN то поле його максимального ерозійного зношування уже зосереджено в середній частині опуклого боку відводу. І якщо радіус вигину відводу рівний 3,5 DN то поле його максимального ерозійного зношування розміщене найближче до входу газового потоку в відвід.

Радіус вигину відводу газопроводу чинить вплив на величину його ерозійного зношування при усіх інших незмінних параметрах. У разі збільшення радіуса вигину відводу газопроводу спостерігається зменшення величини його ерозійного зношування (рис. 7). Якщо радіус вигину відводу газопроводу збільшується від DN до 3,5 DN величина максимальної швидкості ерозійного зношування відводу зменшується від $2{,}37\cdot10^{-8}$ $кг/м^2\cdot с$ до $2{,}4\cdot10^{-9}$ $кг/м^2\cdot с$.



а) – φ=90°; б) – φ=60°; в) – φ=45°, г) – φ=30°

Рисунок 4 – Поля швидкості ерозійного зношування на контурах відводів різних кутів вигину

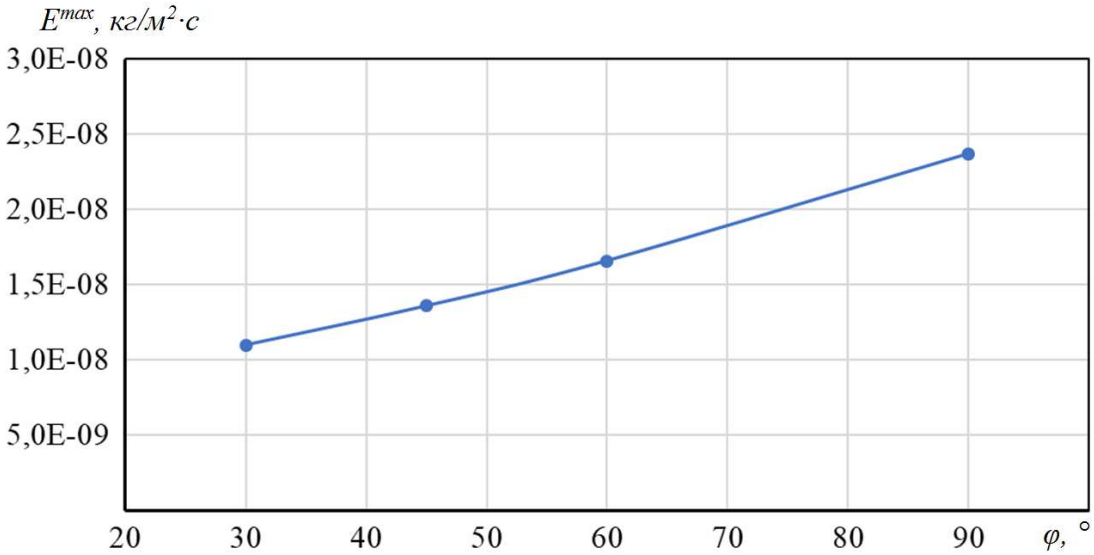
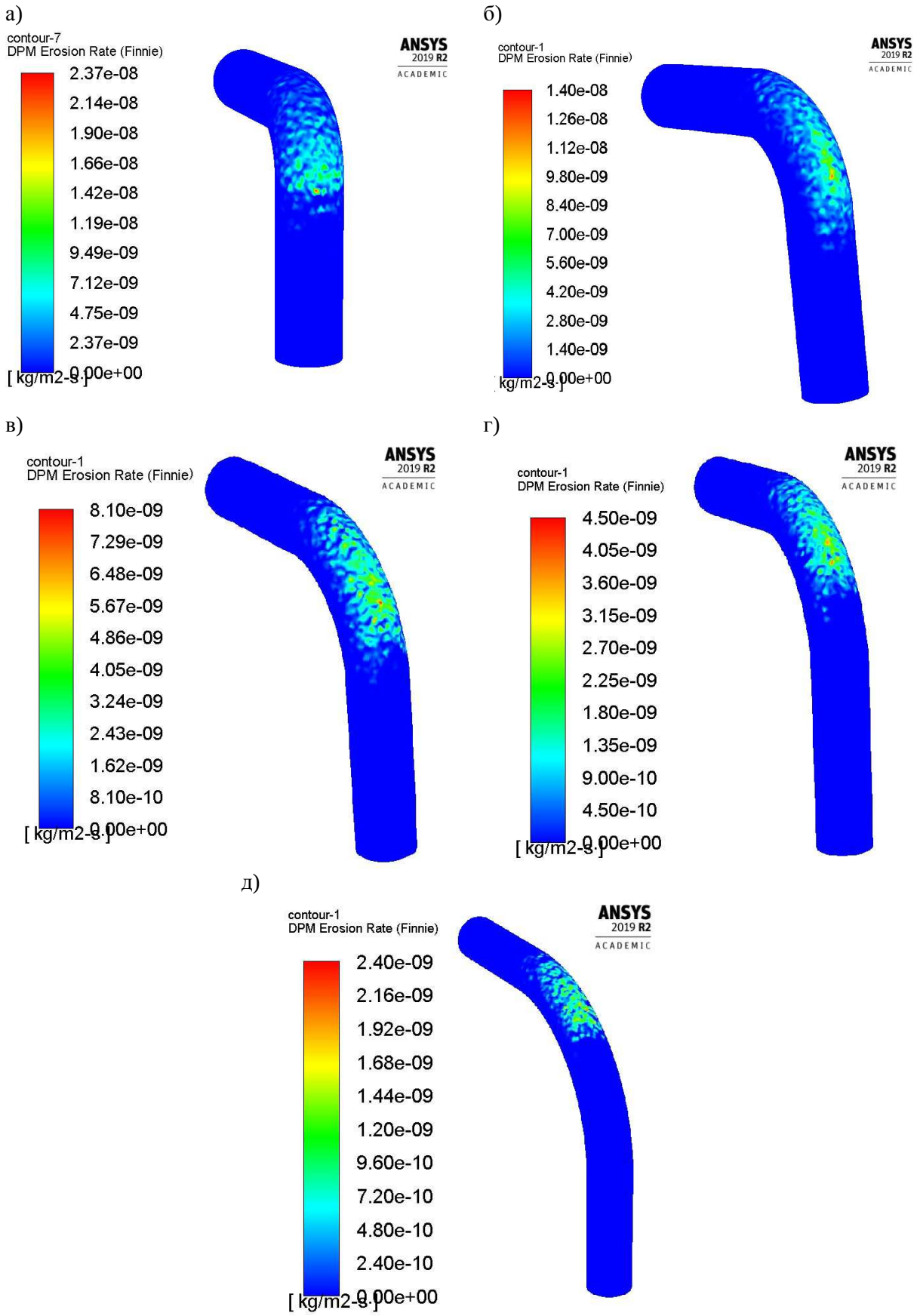


Рисунок 5 – Залежність максимальної швидкості ерозійного зношування від кута вигину відводу

ISSN 1993–9973 print
ISSN 2415–332X online



а) – R=DN; б) – R=1,5 DN; в) – R=2 DN; г) – R=2,5 DN; д) – R=3,5 DN

Рисунок 6 – Поля швидкості ерозійного зношування на контурах відводів різних радіусів вигину

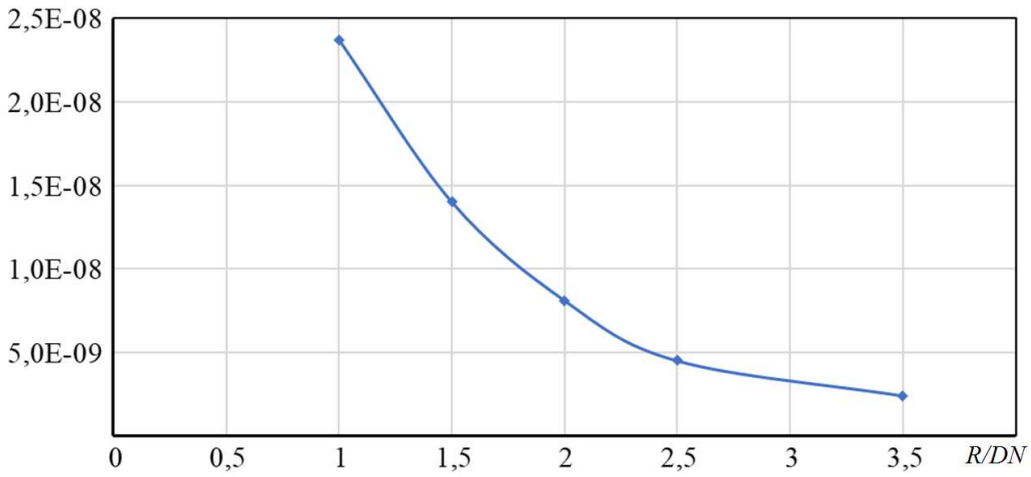


Рисунок 7 – Залежність максимальної швидкості ерозійного зношування від радіуса вигину відводу

Висновки

Результати CFD моделювання показали, що місцезнаходження і величина ерозійного зношування відводів газопроводів значною мірою залежать від їх геометричних параметрів.

Найбільший вплив на місцезнаходження ерозійного зношування відводів газопроводів має радіус вигину відводу, зі збільшенням якого поле максимального ерозійного зношування опуклим боком відводу все більше зміщується від місця виходу газового потоку з відводу до місця його входу у відвід. Кут вигину відводу чинить все менший вплив і зі зменшенням кута вигину відводу, поле максимального ерозійного зношування зміщується від місця виходу газового потоку з відводу до середини опуклого боку відводу. Зі зменшенням діаметра відводу поле максимального ерозійного зношування щораз більше поширюється на приварену до відводу трубу.

На величину ерозійного зношування відводів газопроводів найбільший вплив чинить діаметр відводу, а кут вигину - найменший. Зменшення діаметра відводу від 1420 мм до 89 мм призводить до збільшення швидкості максимального ерозійного зношування в 335 разів при однакових інших умовах. Найбільше збільшення максимальної швидкості ерозійного зношування відбувається, коли діаметр відводу менший 530 мм.

Відводи газопроводу з кутом вигину 30° в 2,5 рази швидше ерозійно зношується, ніж відвід з кутом вигину 90°, а відводи з радіусом вигину, рівним DN, в 9,8 разів швидше, ніж з радіусом вигину 3,5 DN.

Література

1. Дорошенко Я. В., Марко Т. І., Дорошенко Ю. І. Дослідження динаміки руху газу фасонними елементами обв'язки компресорної станції. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2016. № 1 (40). С. 57–71.

2. Doroshenko Ya., Doroshenko Ju., Zapukhliak V., Poberezhny L., Maruschak P. Modeling computational fluid dynamics of multiphase flows in elbow and T-junction of the main gas pipeline. *Transport*. 2019. Vol. 34, No 1. P. 19–29.

3. Doroshenko Ya. V., Marko T. I., Doroshenko Yu. I. The study of erosive wear of the shaped elements of compressor station manifold of a gas pipeline. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2017. Vol. 3, Issue 2. P. 65–78.

4. Mazumder Q. S-bend erosion in particulated multiphase flow with air and sand. *The Journal of Computational Multiphase Flows*. 2016. Vol. 8 (3). P. 157–166.

5. Дорошенко Я. В., Запухляк В. Б., Марко Т. І., Стасюк Р. Б. Експериментальні дослідження ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2017. № 1 (62). С. 66–76.

6. Zhang E., Zeng D., Zhu H., Li S., Chen D., Li J, Ding Y., Tian G. Numerical simulation for erosion effects of three-phase flow containing sulfur particles on elbows in high sour gas fields. *Petroleum*. 2018. № 4. P. 158–167.

7. Fadli A., Karim M., Harahap R., Taufik A. Pipeline failure analysis of bending pipe on the geothermal production well KMJ-X7 in Kamojang geothermal field, Indonesia. *Proceedings World Geothermal Congress*: materials of Congress,

Melbourne, 19–25 April 2015 year. Melbourne, Australia, 2015. 9 p.

8. Smart J. Movement of black powder in gas pipeline. *Pipeline and Gas Journal*. October 2007. P. 82–85.

9. Dosanjh S., Humphrey J. The influence of turbulence on erosion by a particle laden fluid jet. *Wear*. 1985. Vol. 102. No. 4. P. 309–330.

10. Finnie I., Kabil Y. On the formation of surface ripples during erosion. *Wear*. 1965. No 8. P. 60–69.

11. ТУ У 27.2-05747991-001-2004. Деталі з'єднувальні і збірні одиниці магістральних і промислових трубопроводів на Рр до 10 МПа (100 кгс/см2). [Чинний від 2005-06-01]. Вид. офіц. м. Суми : ВАТ "СМНО ім. Фрунзе", 2004. 98 с.

12. ОСТ 102-61-81. Детали магистральных трубопроводов стальные приварные на Ру до 10,0 МПа (100 кгс/см2). Тройники сварные с усиливающими накладками. Размеры. [Действующий от 1981-07-01]. Изд. офиц. М.: Министерство строительства предприятий нефтяной и газовой промышленности, 1981. 32 с.

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

References

1. Doroshenko Ya. V., Marko T. I., Doroshenko Yu. I. The study of the dynamics of gas shaped binding elements of compressor station. *Scientific bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*. 2016. No 1(40). P. 57–71. [in Ukrainian]

2. Doroshenko Ya., Doroshenko Ju., Zapukhliak V., Poberezhny L., Maruschak P. Modeling computational fluid dynamics of multiphase flows in elbow and T-junction of the main gas pipeline. *Transport*. 2019. Vol. 34, No 1. P. 19–29.

3. Doroshenko Ya. V., Marko T. I., Doroshenko Yu. I. The study of erosive wear of the shaped elements of compressor station manifold of a gas pipeline. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2017. Vol. 3, Issue 2. P. 65–78.

4. Mazumder Q. S-bend erosion in particulated multiphase flow with air and sand. *The Journal of Computational Multiphase Flows*. 2016. Vol. 8 (3). P. 157–166.

5. Doroshenko Ya. V., Zapukhliak V. B., Marko T. I., Stasiuk R. B. Eksperymentalni doslidzhennia eroziinoho znoshuvannia fasonnykh elementiv truboprovodiv. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2017. No 1 (62). P. 66–76.

6. Zhang E., Zeng D., Zhu H., Li S., Chen D., Li J, Ding Y., Tian G. Numerical simulation for erosion effects of three-phase flow containing sulfur particles on elbows in high sour gas fields. *Petroleum*. 2018. № 4. P. 158–167.

7. Fadli A., Karim M., Harahap R., Taufik A. Pipeline failure analysis of bending pipe on the geothermal production well KMJ-X7 in Kamojang geothermal field, Indonesia. *Proceedings World Geothermal Congress*: materials of Congress, Melbourne, 19–25 April 2015 year. Melbourne, Australia, 2015. 9 p.

8. Smart J. Movement of black powder in gas pipeline. *Pipeline and Gas Journal*. October 2007. P. 82–85.

9. Dosanjh S., Humphrey J. The influence of turbulence on erosion by a particle laden fluid jet. *Wear*. 1985. Vol. 102. No. 4. P. 309–330.

10. Finnie I., Kabil Y. On the formation of surface ripples during erosion. *Wear*. 1965. No 8. P. 60–69.

11. TU U 27.2-05747991-001-2004. Detali z'ednuvalni i zbirni odynytsi mahistralnykh i promyslovykh truboprovodiv na Pp do 10 MPa (100 khs/sm2). [Chynnyi vid 2005-06-01]. Vyd. ofits. m. Sumy : VAT "SMNO im. Frunze", 2004. 98 p. [in Ukrainian]

12. OST 102-61-81. Detali magistralnyh truboprovodov stalnye privarnye na Ru do 10,0 MPa (100 kgs/sm2). Trojniki svarnye s usilivayushimi nakladkami. Razmery. [Dejstvuyushij ot 1981-07-01]. Izd. ofic. M.: Ministerstvo stroitelstva predpriyatij neftyanoj i gazovoj promyshlennosti, 1981. 32 p. [in Russian

13. Doroshenko Ya. V., Marko T. I., Doroshenko Yu. I. Doslidzhennia dynamiky rukhu bahatofaznykh potokiv fasonnymy elementamy obv'iazky kompresornoi stantsii mahistralnoho hazoprovodu. *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal*. 2016. No 7. P. 68–77. [in Ukrainian]