

МОДЕЛЮВАННЯ ВИТІКАНЬ ГАЗУ З ГАЗОПРОВОДІВ В АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЯХ

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

У розвиток теорії течії газу в газопроводах досліджено практичні питання експлуатації газотранспортної системи. Досліджувані в роботі витікання газу з газопроводів можуть виникати у разі аварійних розривів стінки трубопроводу, а також в штатних ситуаціях, зокрема, під час продування і спорожнення ділянок газопроводу високого тиску.

У дослідженні використані як рівняння збереження маси і зміни кількості руху, так і рівняння енергії, показано термодинамічні перетворення, що відбуваються з газом. У розрахунках визначаються розподіл швидкості, тиску та температури газу, і на цій основі виявляються нові, раніше невідомі ефекти, а також перевіряються і уточнюються відомі результати і існуючі методи розрахунку.

Газова динаміка розвивалася, звичайно, і для вирішення проблем проектування і експлуатації трубопроводів. Експлуатація газотранспортних систем пов'язана з безліччю технологічних режимів, коли «спрощені припущення» суперечать дійсності і не дозволяють виявити важливі для практики ефекти. Найпростіші оцінки показують, що в газопроводах існують течії, що характеризуються великими швидкостями, за яких сили інерції досить істотні, а температура газу внаслідок стиснення і розширення потоку змінюється на десятки градусів. Перш за все, це відноситься до процесів, що виникають у разі витікання газу через отвори при розривах газопроводу, а також до технологічних операцій, пов'язаних з частковим перепуском газу або його скиданням в атмосферу. В роботі досліджено саме такі явища. Зокрема проведено моделювання процесу витікання газу через дефект певного діаметра в тілі магістрального газопроводу, досліджено вплив зміни діаметра дефекту і відстані до місця витікання від початку перегону між компресорними станціями, на значення тиску та температури в кінці перегону.

Ключові слова: магістральний газопровід, аварійна ситуація, дефект, витікання газу, втрати газу, моделювання витікань.

Вступ

Природний газ відіграє істотну роль в Українській економіці. Цей ресурс є найдешевшим і найефективнішим.

Самим ефективним способом подачі газу є газопровід, який призначений для транспортування на великі відстані (сотні і тисячі кілометрів) горючих газів від місця їх видобутку або виробництва до пунктів споживання. Розвиток газопровідного транспорту в Україні характеризується наявністю газопроводів з труб великого діаметра — великі магістральні газопроводи. Газопровід істотно скорочує витрати на транспортування газу, але водночас він вимагає експлуатаційного обслуговування, наприклад, контролю за переданим об'ємом, температурою, тиском, вмістом домішок і т. п.

А останнім часом щораз гостріше постає проблема старіння газопроводів, зростає їх аварійність. Спостерігається зростання кількості аварій, пов'язаних з ушкодженнями газопроводів. Багато випадків корозійних пошкоджень відбуваються на газопроводах, що не відслужили нормативний термін. Тяжкість наслідків аварій на газових мережах призводить до необхідності раннього виявлення і запобігання витоків газу.

Для більшого розуміння масштабності проблеми, можна навести декілька світових прикладів аварій на газопроводах, які трапилися за сім останніх років з різних причин. Так, у 2017 році на сході Китаю під час проведення ремонтних робіт каналізаційних мереж стався витік газу, який

призвів до загибелі 5 осіб і 89 постраждалих. Схожа ситуація з ремонтними роботами відбулася у м. Монтеррей мексиканського штату Нуево-Леон 2015 року — вибух призвів до загибелі 5 людей. І такі ситуації, через неприпустимі помилки з боку робітників, траплялися в різних країнах світу: в центральній Каліфорнії (2015 р., постраждало 15 людей), в Польщі (2013 р., загинули двоє робітників, 13 людей постраждали, згоріло кілька десятків будинків). Через зношеність газопроводів сталася страшна аварія 2014 року в тайванському місті Гаосюн. У місті відбулося не менше п'яти вибухів. Полум'я після одного з вибухів піднялося в небо на висоту дев'яти метрів. У місті почалися пожежі. Серія підземних вибухів забрала життя 27 осіб, ще 284 людини постраждали. І таких прикладів можна навести безліч.

Тому швидке виявлення, навіть незначних, витоків — одне з найважливіших завдань в процесі експлуатації МГ, як об'єктів підвищеної небезпеки. Також, небезпека витоку газу визначається не тільки кількістю втраченого газу, але і можливістю формування газоповітряної суміші з подальшим її горінням.

Значні терміни експлуатації газопроводів викликають старіння металу внаслідок корозійних процесів, що зумовлює появу малих витоків з трубопроводів. Особливо це актуально для газових мереж низького та середнього тиску, для яких виявлення витоку газу може тривати значний період часу експлуатації. Така ситуація є неприпустимою як з економічної, так і з екологічної точки зору, оскільки малий витік газу важко помітити, проте загазованість може зайняти значну територію, а в деяких випадках призвести до прогресивно масштабнішого збитку для довкілля і наразити на небезпеку місцеве населення.

В Україні роботи з виявлення витоків проводять регулярно і щоразу результати досліджень і цифри вражають. Незважаючи на те, що різні спеціалісти масштабно займаються питанням виявлення витоків, але це питання вимагає додаткових досліджень. Саме тому необхідно розглянути методи виявлення витоків газу, що застосовуються за кордоном та запропонувати найефективніші до впровадження у використання в нашій державі.

В узагальненні актуальності теми, виходом із ситуації є використання сучасних методів та технологій для розрахунку втрат газу через дефекти в тілі труби та вивчення принципів розподілення газу під час витоку. У зв'язку з цим моделювання витікань газу з газопроводів в аварійних ситуаціях є актуальною науковою задачею, адже дозволить спрогнозувати можливі варіанти розвитку подій і наслідки, які може спричинити аварія.

Метою роботи є моделювання витоків газу з газопроводів в аварійних ситуаціях з метою підвищення точності діагностики безпечної експлуатації газопроводів.

Поставлена мета досягається шляхом реалізації такої *задачі*: математичне моделювання процесу поширення газу під час аварійних ситуацій. Цією проблемою займалися багато вчених та дослідників.

Предметом досліджень є проблема витоків природного газу через наскрізні дефекти з лінійної частини ділянки МГ.

Методи досліджень. Дослідження проведене із застосуванням системного аналізу експлуатаційних параметрів роботи об'єкта досліджень, математичного моделювання, класифікації, дедукції, методу комп'ютерного моделювання та програмування.

Результати дослідження

Дослідити динаміку руху газу трубопроводах зі складною конфігурацією внутрішньої поверхні, визначити значення коефіцієнтів їх гідравлічних місцевих опорів дозволяють сучасні програмні комплекси математичного моделювання тривимірних потоків рідин та газів, такі як ANSYS, FlowVision, FLOW-3D. Перевагами програмного комплексу ANSYS є можливість виконання багатодисциплінарних розрахунків.

Для розв'язання цієї задачі, можуть бути використані два програмних комплекси — ANSYS Fluent та ANSYS CFX. Закладені в цих комплексах математичні моделі та числові алгоритми відповідають світовому рівню. Інтеграція модуля ANSYS Fluent в робоче середовище ANSYS Workbench та можливість використання модуля ANSYS CFD-Post для обробки результатів створює комплексне рішення для виконання інженерного аналізу в моделюванні течій рідин і газів. Комп'ютерним моделюванням потоків рідин та газів в трубопроводах різноманітними програмними комплексами займаються багато сучасних науковців. Їхні результати підтверджують, що такі комплекси є ефективним засобом для отримання фізичної картини руху потоку газу та рідини в різних елементах.

Витікання газу через тіло газопроводу відбуваються дуже часто і з різною інтенсивністю. Ці витіки призводять до значних економічних та екологічних збитків, а тому потребують якісних і швидких дій щодо їх виявлення та усунення. У цій роботі використано методику розрахунку витіків, описану в статті [1], і також за допомогою програмного модуля ANSYS Fluent змодельовано процес поширення газу під час аварійної ситуації. Об'єктом дослідження є ділянка газопроводу.

Проведено розрахунок ділянки магістрального газопроводу з втратою газу через наскрізний дефект типу «свищ».

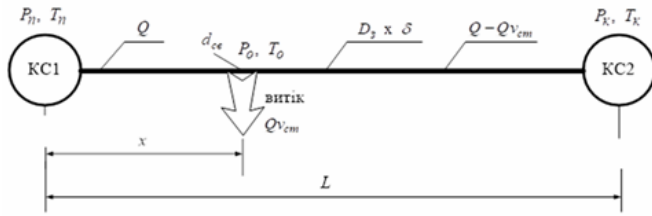


Рис. 1. Розрахункова схема ділянки газопроводу з витіком газу

Розрахункова схема ділянки газопроводу з витіком газу показана на рис. 1.

В роботі використано програмний модуль ANSYS Fluent. Цей комплекс базується на рівняннях Нав'є–Стокса і переносу енергії.

Рівняння Нав'є–Стокса — система диференціальних рівнянь у частинних похідних, що описує рух ньютонівських рідин. Це рівняння є одними з базових у гідродинаміці,

позаяк дозволяє розрахувати розподіл швидкості та тиску вздовж трубопроводу [2], [3].

Система складається з двох рівнянь:

- рівняння руху або, іншими словами, закон збереження імпульсу (1);
- рівняння нерозривності або закон збереження маси (2).

У векторному вигляді для нестисливої рідини вони записуються таким чином:

$$\frac{\partial \vec{\mathcal{Q}}}{\partial t} = -(\vec{\mathcal{Q}} \cdot \nabla) \vec{\mathcal{Q}} + \nu \Delta \vec{\mathcal{Q}} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}; \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{\mathcal{Q}} = 0, \quad (2)$$

де $\vec{\mathcal{Q}} = (\mathcal{Q}^1, \dots, \mathcal{Q}^n)$ — векторне поле швидкостей; t — час; ∇ — оператор Гамільтона; ν — коефіцієнт кінематичної в'язкості; Δ — оператор Лапласа; ρ — густина газу; p — тиск; \vec{f} — векторне поле масових сил.

Невідомі p і $\vec{\mathcal{Q}}$ є функціями часу t і координати $x \in \Omega$, $n = 2, 3$ — дво- або тривимірна область, в якій рухається газ.

Моделювання виконується розв'язанням цих рівнянь, замкнених двопараметричною κ – ε (κ — турбулентна енергія, ε — швидкість дисипації турбулентної енергії) моделлю турбулентності Лаундера–Шарма з відповідними початковими і граничними умовами.

Перед початком моделювання в програмному модулі ANSYS задаємося 3D геометрією двох основних елементів — шару ґрунту, представленого у спрощеному вигляді паралелепіпедом та труби відповідного діаметра. Спеціально залишаємо невеликий відступ між тілом труби і самим ґрунтом (рис. 2).

У препроцесорі Named Selections є дві позначки — Interface 1 (ґрунтовий шар) та Interface 2 (трубний шар). Якщо відімкнути позначку «ґрунтовий шар», можна побачити виключно трубопровід (рис. 3), невелике підвищення на тілі труби — це так званий дефект певного діаметра, з якого буде витікати газ.

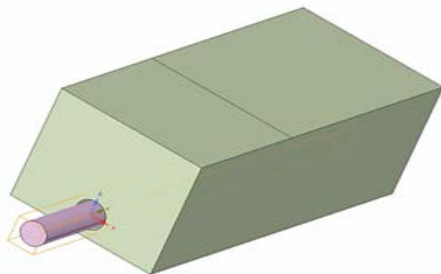


Рис. 2. 3D геометрія труби і шару ґрунту в програмному модулі ANSYS Fluent



Рис. 3. 3D геометрія газопроводу і візуалізація дефекту в тілі труби

Для врахування витікань у ґрунт використано значення параметрів: в'язкого опору та інерційного опору. Для обчислення їхнього значення використовується рівняння Ергуна, воно також ви-

користується для отримання пористого вхідного матеріалу, тобто для ґрунту. Проникність за рівнянням Ергуна обчислюється за формулою

$$a = \frac{D_c}{150} \cdot \frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon)^2}, \quad (3)$$

де D_c — середній діаметр частинки ґрунту, мм; ε — порожнинна частинка, тобто об'єм порожнини, поділений на об'єм упакованої зони, ґрунту.

Граничні умови, які будуть основою для візуалізації основних параметрів по витоку, подані у таблиці.

Граничні умови

Параметр, одиниці вимірювання	Значення	Параметр, одиниці вимірювання	Значення
Масова витрата газу на початку перегону між КС, кг/с	629,66	Температура газу в кінці перегону між КС, К	289,57
Тиск газу на початку перегону між КС, Па	$6,67 \cdot 10^6$	Масова витрата газу в точці витоку, кг/с	8,655
Температура газу на початку перегону між КС, К	308,45	Зовнішній діаметр та товщина стінки газопроводу, мм	$1420 \cdot 25,4$
Масова витрата газу в кінці перегону між КС, кг/с	621,01	Відстань від початку перегону до місця витоку газу, м	$59 \cdot 10^3$
Тиск газу в кінці перегону між КС, Па	$4,78 \cdot 10^6$	Діаметр дефекту, м	$25 \cdot 10^{-3}$

Візуалізація процесу поширення газу через отвір певного діаметра в тілі трубопроводу дозволить побачити структуру поширення газу в трубі та особливо в місці витоку газу.

На рис. 4 зображено поля модуля швидкості газу по контурах для дефекту заданого діаметра та заливка швидкості газу у внутрішній порожнині газопроводу з витоком. З лівої сторони вікна програмного продукту ANSYS Fluent різними кольорами показано розподіл швидкості в м/с.

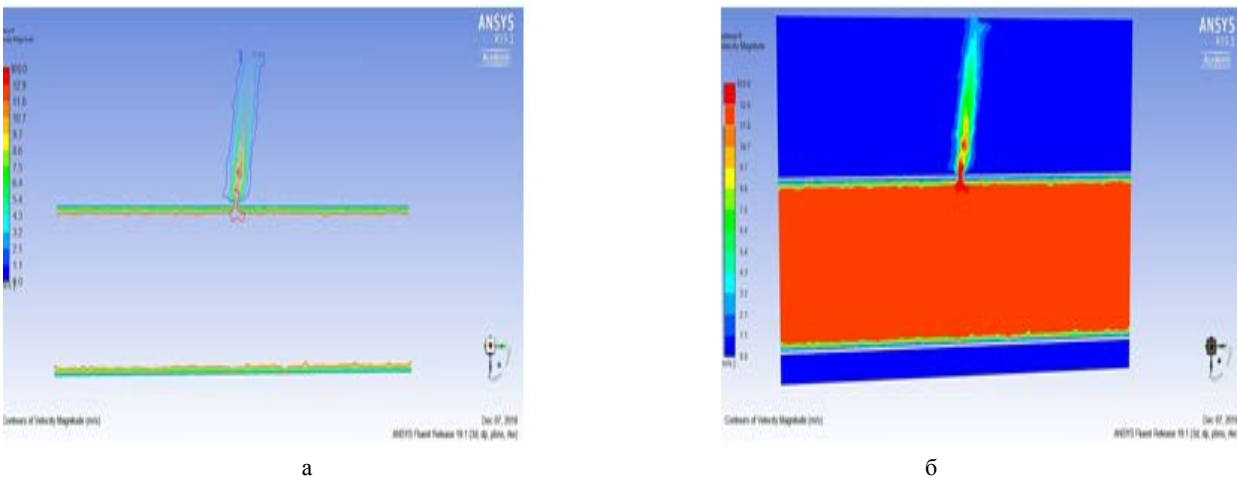


Рис. 4: а — поля модуля швидкості газу по контуру для витоку; б — заливка швидкості потоку газу у внутрішній порожнині газопроводу з витоком

Як видно з тонової заливки (рис. 4) швидкості потоку газу у вертикально-поздовжньому перерізі ділянки газопроводу з витоком, по осі потоку швидкість є незмінною практично по всій довжині і дорівнює 12,9 м/с.

Від осі потоку в напрямі стінки відбувається незначне зниження швидкості потоку, а біля стінки значне зниження швидкості, яке практично рівне 0 м/с. таким чином, якщо розглядати місце дефекту, то максимальна швидкість газу спостерігається саме в ядрі витоку і в двох дотичних точках біля стінки труби по обидві сторони від місця витоку, а її значення є дуже значним — 141,2 м/с. В процесі поширення витікання газу через отвір швидкість різко зменшується, і зменшується вона ривками — тобто ще в деякий момент швидкість може бути великою, а вже згодом максимально малою.

Далі побудуємо і розглянемо візуалізацію ще двох параметрів, які характеризують витік газу, таких як тиск і його температуру (рис. 5).

Через те, що нас цікавить поширення і зміна тиску саме в місці дефекту і оскільки ми розглядаємо лише незначну частину труби, то тиск вздовж осі потоку залишається сталим (рис. 5), на відміну від реальних умов, і має максимальне значення.

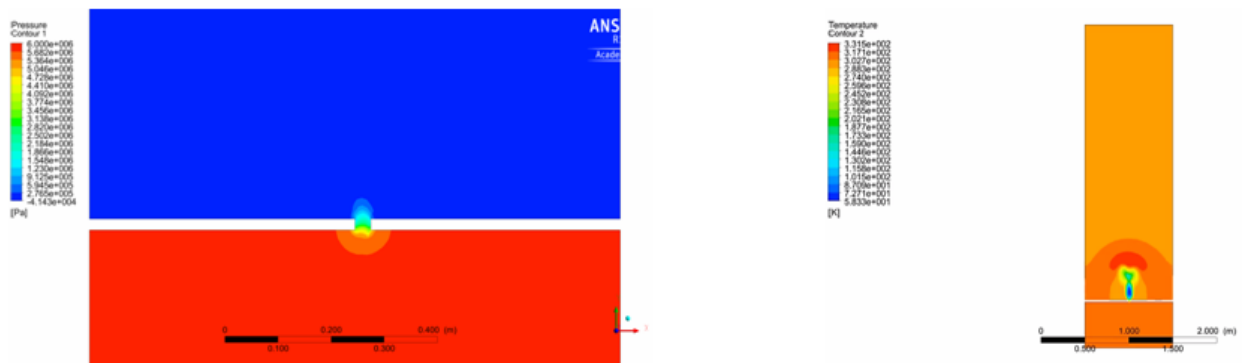


Рис. 5. Візуалізація зміни тиску і температури газу в місці витoku

Ближче до місця витoku по кольоровому розподілу бачимо, що тиск починає спадати і у точці витoku він становить $P_0 = 5850068$ Па. Плавно зменшується і остаточно розсіюється.

Якщо розглядати візуалізацію процесу розподілу температури у вертикально-повздовжньому перерізі ділянки газопроводу з витokом (рис. 5), то тут все навпаки, в порівнянні з розподілом тиску.

Температура збільшується в міру розсіювання газу, в центрі витoku, наприклад, вона є мінімальною, і відбувається параболічне плавне збільшення температури. Максимум температури досягається саме в найвищій точці параболі. А її значення в точці витoku становить $T_0 = 299,02$ К.

Так, за допомогою сучасного програмного комплексу математичного моделювання тривимірних потоків рідин та газів ANSYS Fluent досліджено структуру поширення газу під час аварійних ситуацій на ділянці газопроводу, через «свищ» певного діаметра.

Отримані результати моделювання, підтверджені візуалізацією зміни тиску, температури і швидкості в точці витoku за допомогою програмного комплексу ANSYS Fluent, дозволяють зробити висновки.

Підтверджена одна важлива закономірність від положення дефекту по довжині перегону, продуктивність ділянки після дефекту змінюється досить суттєво. А точніше, чим ближче до початкової станції трапляється витік, тим більші втрати через дефект, і, відповідно, вони зменшуються з віддаленістю по довжині ділянки магістрального газопроводу. Пояснюється це тим, що залежність втрати газу від тиску є прямо пропорційною, а оскільки тиск по довжині трубопроводу зменшується (найбільшим він є саме на початку перегону між КС), то зменшується і його вплив на саму точку витoku. Також, чим більший дефект, тим продуктивність на ділянці газопроводу після нього менша через зростання втрат газу в результаті витoku, і тим більше буде різниця з продуктивністю газопроводу без витokів. Такий витік за незмінної продуктивності станції, розташованої на початку перегону, виявити за зміною продуктивності в кінці перегону набагато простіше, ніж за зміною тиску в кінці перегону, але вузли обліку газу є далеко не на всіх КС. Вони розташовуються лише на КС, що подають газ за кордон, а також на границі областей при зміні управління.

Також зазначимо, що зміна продуктивності КС впливає на значення тиску та температури газу в точці витoku. Тобто, чим продуктивність КС є більшою, тим тиск в точці витoku є меншим, а температура газу за умов витoku, відповідно, більша. В залежності від цього змінюється витрата газу через наскрізний дефект, і, відповідно, тиск в кінці перегону між станціями.

Параметри навколишнього середовища, такі як температура ґрунту та барометричний тиск, на зміну втрат газу через «свищ» та тиск в кінці перегону між КС впливають несуттєво.

Висновки

Проведено дослідження виникнення аварійних ситуацій та витokів газу через дефекти у лінійній частині магістральних газопроводів. Розглянувши існуючі літературні джерела щодо проблем моделювання витікання газу з газопроводів в аварійних ситуаціях, з великої кількості чинників, здатних призвести до відмов газопроводів, виділено: корозію, неякісне зварювання та втручання сторонніх осіб в процесі експлуатації газопроводу. Згідно з висновками Європейської Групи (EGIG), ймовірність появи витokів, спричинених неякісним зварюванням, складає всього 5 %, тоді як найбільша кількість аварій стається через втручання сторонніх осіб — близько 50 %.

Розглянувши методики розрахунку кількості втраченого газу через наскрізні дефекти у тілі труби, з усіх наявних методик вибрали для розрахунку модель двофазного критичного потоку од-

нокомпонентних сумішей через звужувальні насадки, оскільки вона вимагає лише знання геометрії насадки, тобто дефекту та показників потоку до місця витоку.

На цьому етапі аналіз розрахунків можна завершити і зробити висновки, що наявність аварійної ситуації не завжди можна визначити за перепадом тиску в кінці перегону, ефективнішим параметром для спостереження є саме продуктивність газопроводу, оскільки за наявності дефектів її значення істотно зменшиться. Також, як вже зазначалося вище, малі діаметри дефектів дуже важко вчасно виявити.

Отже, необхідно ретельно та регулярно проводити діагностування лінійної частини МГ, як ззовні, так і зсередини, щоб не допускати витоків газу і не створювати незворотні аварійні ситуації. Результати моделювання дозволяють отримати повний комплексний вигляд поширення газу в трубопроводі з дефектом, візуалізацію основних параметрів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Robert E. Henry, "The two-phase critical flow of orifices and short tubes," *Journal of Heat Transfer*, № 6, pp. 179-187, 1971.
 [2] Я. В. Дорошенко та ін., «Застосування сучасних програмних комплексів комп'ютерного моделювання для підвищення якості проектування та спорудження трубопроводів,» *Науковий вісник ІФНТУНГ*, № 2 (24), с. 117-120, 2010.
 [3] Я. В. Дорошенко та ін., «Дослідження динаміки руху газу фасонними елементами обв'язки компресорної станції,» *Науковий вісник ІФНТУНГ*, № 1 (40), с. 57-71, 2016.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 7.02.2020

Дорошенко Ярослав Васильович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри газонафтопроводів і газонафтосховищ, e-mail: jaroslav.doroshenko79@gmail.com .

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ

Ya. V. Doroshenko¹

Simulation of Gases from Pipelines in Emergency Situations

¹National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk

The article is devoted to the development of the theory of gas flow in gas pipelines, as well as the study of the practical issues of operating a gas transmission system. The flows studied in scientific work can occur during emergency ruptures of the pipeline wall, as well as in normal situations, in particular, during the purging and emptying of sections of the high pressure gas pipeline.

The equations of conservation of mass and changes in momentum, as well as the equations of energy, are shown for consideration, and the thermodynamic transformations occurring with the gas are shown. In the calculations, the distributions of gas velocity, pressure and temperature are built, and on this basis new, previously unknown effects are revealed, and known results and existing calculation methods are checked and refined.

Gas dynamics also developed, of course, as applied to the problems of design and operation of pipe pipelines. The operation of gas transmission systems is associated with many technological regimes when "simplified assumptions" contradict reality and do not allow revealing effects important for practice. The simplest estimates show that there are flows in gas pipelines that are characterized by high velocities, at which the inertia forces are very significant, and the gas temperature changes by tens of degrees as a result of compression and expansion of the flow. First of all, this refers to the processes that occur during gas leakage through openings during gas pipeline ruptures, as well as to technological operations associated with a partial passage of gas or its discharge into the atmosphere. This work is devoted to the study of just such phenomena.

In particular, the work carried out modeling of the gas leak due to a defect of a certain diameter in the body of the main gas pipeline, investigated the effect of changes in the diameter of the defect and the distance to the leak from the beginning of the stretch between compressor stations, on the pressure and temperature at the end of the stretch.

Keywords: main gas pipeline, emergency, defect, gas leakage, gas loss, leakage modeling.

Doroshenko Yaroslav V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Oil and Gas Pipelines and Storage Facilities, e-mail: jaroslav.doroshenko79@gmail.com

Моделирование утечек газа из газопроводов в аварийных ситуациях

¹Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

В развитие теории течения газа в газопроводах исследованы практические вопросы эксплуатации газотранспортной системы. Исследуемые в работе течения могут возникать при аварийных разрывах стенки трубопровода, а также в штатных ситуациях, в частности, во время продувки и опорожнения участков газопровода высокого давления.

В исследованиях использованы как уравнения сохранения массы и изменения количества движения, так и уравнения энергии, показаны термодинамические преобразования, происходящие с газом. В расчетах строятся распределения скорости, давления и температуры газа, и на этой основе выявляются новые, ранее неизвестные эффекты, а также проверяются и уточняются известные результаты и существующие методы расчета.

Газовая динамика развивалась, конечно, и в приложении к проблемам проектирования и эксплуатации трубопроводов. Эксплуатация газотранспортных систем связана с множеством технологических режимов, когда «упрощенные предположения» противоречат действительности и не позволяют выявить важные для практики эффекты. Простейшие оценки показывают, что в газопроводах существуют течения, характеризующиеся высокими скоростями, при которых силы инерции весьма существенные, а температура газа в результате сжатия и расширения потока меняется на десятки градусов. Прежде всего, это относится к процессам, возникающим при вытекании газа через отверстия при разрывах газопровода, а также к технологическим операциям, связанным с частичным пропуском газа или его сбросом в атмосферу. В работе исследованы именно такие явления.

В частности проведено моделирование процесса утечки газа из-за дефекта определенного диаметра в теле магистрального газопровода, исследовано влияние изменения диаметра дефекта и расстояния до места утечки от начала перегона между компрессорными станциями, на значение давления и температуры в конце перегона.

Ключевые слова: магистральный газопровод, аварийная ситуация, дефект, вытекание газа, потери газа, моделирование вытеканий.

Дорошенко Ярослав Васильевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры газонефтепроводов и газонефтехранилищ, e-mail: jaroslav.doroshenko79@gmail.com