



Прийнято 04.03.2025. Прорецензовано 09.05.2025. Опубліковано 20.06.2025.

УДК 622.691.4

DOI: 10.31471/1993-9868-2025-1(43)-71-86

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОДУВАНЬ СВЕРДЛОВИН ТА ШЛЕЙФІВ ГАЗОКОНДЕНСАТНИХ РОДОВИЩ

Голубенко В. П. *

АТ «Укргазвидобування»

вул. Кудрявська, 26/28, м. Київ, 04053, Україна

<https://orcid.org/0009-0008-3597-8523>

e-mail: slava-golubenko@ukr.net

Анотація. Здійснено 3D моделювання фізичного процесу витікання газорідинної суміші з трубопроводу в атмосферу в умовах, які відповідають реальним параметрам продування газозбірних шлейфів та свердловин газових і газоконденсатних родовищ України. В середовищі програмного комплексу Ansys R1 Student побудовано тривимірну модель із зонами атмосферного та надлишкового тиску, які представлені відповідно у вигляді прямокутного паралелепіпеда (розміром: довжина – 5 м, ширина – 3 м, висота – 3 м) та трубопроводу (із внутрішнім діаметром 77 мм та довжиною 1 м). Для моделювання обрано математичну модель VOF (Volume of Fluid), яка базується на розв'язанні системи рівнянь збереження маси, імпульсу, перенесення об'ємної частки, замкнених двопараметричною k-epsilon моделлю турбулентності та дозволяє прогнозувати динаміку багатозфазних потоків із чітко розділеними фазами, що спостерігається під час продування рідини газом. Розрахунки проведено при задаванні на вхідній граничній поверхні трубопроводу різних значень надлишкового тиску (0,10–0,35 МПа) та об'ємної частки рідини ($\alpha_l = 0,00 \dots 0,50$). За результатами моделювання для кожного випадку зіставлення вхідних граничних даних визначено значення швидкостей витікання потоку, числа Маха та витрати газу. Додатково для детального аналізу та отримання вичерпної інформації з оцінки впливу рідини на витрату газу засобами графічного інтерфейсу модуля Fluid Flow (Fluent) візуалізовано контури розподілу швидкостей та об'ємної долі рідини вздовж просторової моделі трубопроводу та зони атмосферного тиску. Дослідивши результати моделювання визначено закономірності впливу рідкої фази на витрату газу під час витікання газорідинної суміші під тиском із газопроводу в атмосферу. Також визначено основні чинники, що призводять до зниження витрати газу при підвищенні об'ємної частки рідини в потоці. Підтверджено необхідність розроблення та впровадження у чинні методики розрахунку втрат газу під час продування додаткових коефіцієнтів, які б враховували присутність рідини в газовому потоці.

Ключові слова: газоконденсатне родовище; моделювання; потік; рідина; швидкість витікання; витрата.

Вступ

На сьогодні більшість свердловин газових і газоконденсатних родовищ України стикаються зі значними технологічними викликами, спричиненими виснаженням запасів та накопиченням рідинних забруднень на вибої свердловин і в газозбірних шлейфах. Ці процеси впливають на продуктивність свердловин і створюють необхідність у впровадженні спеціалізованих технологій для видалення рідини.

Одними із можливих рішень є механізовані методи видобутку, такі як капілярні системи, velocity stream, газліфт та інші. Однак впровадження таких технологій вимагає значних фінансових інвестицій, що часто робить їх економічно недоцільними в умовах виснажених родовищ.

Періодичне продування свердловин через факельний трубопровід на амбар залишається єдиним ефективним способом підтримання їх

Запропоноване посилання: Голубенко, В. П. (2025). Імітаційне моделювання продувань свердловин та шлейфів газоконденсатних родовищ. Нафтогазова енергетика, 1(43), 71-86. doi: 10.31471/1993-9868-2025-1(43)-71-86.

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

стабільної експлуатації в багатьох випадках. Цей метод дозволяє видаляти рідинні накопичення, що перешкоджають руху потоку газу. Проблематикою застосування даного технологічного процесу є те, що на більшості свердловин немає лічильників, які б дозволяли точно вимірювати обсяг газу, що втрачається під час продувань, а існуючі методики розрахунків здебільшого базуються на витратах для сухого газу, які не враховують вміст рідини в потоці. Це призводить до неточностей у розрахунках та управлінських рішеннях.

Враховуючи вищезазначене, актуальність дослідження з оцінки впливу вмісту рідини на витрату газу під час продувань визначається декількома ключовими чинниками. По-перше, енергетична безпека України значною мірою залежить від ефективного управління її газовими ресурсами. Умови виснаження родовищ вимагають впровадження інноваційних підходів до експлуатації свердловин. По-друге, економічна доцільність видобутку на виснажених родовищах безпосередньо залежить від оптимізації витрат і мінімізації втрат газу. Використання недосконалих методик розрахунку призводить до значних похибок у визначенні обсягів втрат, що ускладнює планування та управління видобутком. По-третє, екологічний аспект також є важливим: надмірні викиди газу в атмосферу під час продування негативно впливають на довкілля, що вимагає розробки технологій, спрямованих на мінімізацію таких втрат.

Для вирішення зазначеної проблеми необхідне проведення детального моделювання процесів продування газозбірних шлейфів та свердловин із урахуванням вмісту рідкої фази в газовому потоці. Це дозволить визначити закономірності, які стануть основою для вдосконалення чинних методик розрахунку та управління процесами видобутку.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Дослідження двофазного потоку газорідинної суміші привертає значну увагу в науковій спільноті через його важливість для прийняття ефективних технологічних рішень у нафтогазовій промисловості. У сучасній літературі представлено різні підходи до вивчення цього явища, проте не всі дослідження безпосередньо фокусуються на впливі рідини на витрати газу.

Вітчизняні дослідження зосереджуються на особливостях локальних умов та практичному застосуванні моделей, тоді як закордонні роботи часто приділяють увагу створенню уні-

версальних підходів і використанню сучасних обчислювальних методів, таких як CFD-моделювання. Вітчизняні роботи значною мірою зосереджені на аналізі витоків газу як однофазного середовища та їх моделюванні. Зокрема, у статті Я.В. Дорошенка розглянуто витікання газу через дефекти у магістральному газопроводі, зосереджуючись на аналізі газових потоків без урахування впливу вмісту рідини. У роботі досліджено вплив розміру дефекту та відстані до місця витоків на параметри тиску й температури [1]. Хоча основний акцент зроблено на газових потоках, отримані результати також є корисними для моделювання газорідинних систем.

Іншим прикладом є дослідження впливу фільтраційного опору ґрунту на інтенсивність аварійних витоків із газопроводів. У роботі аналізується процес нестационарної фільтрації газу через ґрунт. Хоча акцент зроблено на газових потоках, дослідження також відкриває можливості для розробки моделей, які враховують вплив рідкої фази. Наведено розрахункові залежності, що дозволяють прогнозувати формування зон загазованості, але потребують подальшого розширення для адаптації до газорідинних сумішей [2].

Окрім того, у статті Ф. Матіко та О. Гнатюк розглянуто газодинамічні явища у витратомірах змінного перепаду тиску [3]. Використовуючи CFD-моделювання, автори дослідили точність вимірювання витрати газу залежно від конструктивних параметрів трубопроводів. Хоча в роботі основна увага приділена газовим потокам, результати можуть бути розширені на випадки газорідинних потоків, що робить це дослідження цінним внеском у загальну модель критичного витікання.

Закордонні дослідження значною мірою фокусуються на моделюванні руху двофазних потоків в трубопроводах. Наприклад, у дослідженні Ф. Гароосі та К. Хумак розглянуто вдосконалений метод Volume-of-Fluid (VOF) для чисельного моделювання багатофазних потоків, який дозволяє враховувати взаємодію фаз із високою точністю [4]. У ще одній класичній роботі Ф. Харлоу та А. Амсен представили універсальний метод чисельного розрахунку динаміки рідини для будь-яких швидкостей потоку, що має важливе значення для моделювання критичних витікань [5].

Особливе значення мають роботи А. Мезіу та ін., опубліковані у 2016 та 2019 роках [6, 7]. У першій роботі запропоновано низьковимірну модель для аналізу перехідних режимів двофазного потоку в трубопроводах. У моделі вра-

ховано динамічну взаємодію фаз, що дозволяє спростити чисельні розрахунки та підвищити швидкість їх виконання. Цей підхід забезпечує точність прогнозування поведінки двофазних потоків при зменшенні обчислювальних витрат, що є критично важливим для реального застосування. У подальшій роботі досліджено динамічне моделювання двофазного потоку газу і рідини з урахуванням нелінійних процесів, таких як турбулентність і змінність фізичних властивостей фаз. Ці моделі враховують складність взаємодії фаз у трубопроводах і можуть бути використані для оптимізації реальних виробничих процесів.

У дослідженні К. Цоці та ін. проаналізовано вплив зміни фізичних властивостей газової і рідкої фаз на перехід структури двофазного газорідинного потоку в горизонтальних та майже горизонтальних трубах [8]. У ще одній роботі, представленій М. Якубом та ін., проведено дослідження структурних особливостей трифазного потоку при одночасному протіканні в трубопроводі газу, рідини та іншої рідини. За результатами роботи встановлено закономірності, які характеризують, як зміни у об'ємних частках та поверхневих швидкостях кожної фази впливають на перехід між різними режимами потоку, а також визначено умови, за яких відбувається перехід від одного типу потоку до іншого [9]. У роботі Р.Е. Генрі запропоновано базові моделі для опису двофазного критичного потоку через отвори та короткі труби, які залишаються актуальними для сучасних досліджень [10]. Ці моделі детально аналізують взаємодію фаз у критичних умовах для однокомпонентних двофазних сумішей. У більш пізніх дослідженнях С. Горай та К. Нігам представлено CFD-моделювання двофазного потоку (газ-рідина) в трубопроводах. За результатами досліджень розроблена кореляція, яка здатна ефективно оцінювати динамічні характеристики газорідинної суміші в трубопроводах при хвилястому стратифікованому режимі течії [11].

Також нові дослідження охоплюють широкий спектр питань, пов'язаних із моделюванням газорідинних потоків у свердловинах. У магістерській роботі, представленій у Норвезькому університеті природничих і технічних наук (NTNU), детально вивчено моделі прогнозування накопичення рідини в газових свердловинах та їх вплив на витрату газу внаслідок зростання протитиску на продуктивні поклада [12]. Автори зосередили увагу на поєднанні розрахунків моделювання і практичних спостережень. У статті, опублікованій у жур-

налі "Processes", автором В. Ке та ін. запропоновано інноваційну модель для прогнозування критичних витрат газу, необхідних для ефективного винесення рідини з вибою свердловини [13]. Це дозволяє глибше зрозуміти взаємодію фаз і оптимізувати роботу газових свердловин.

Інші дослідження, такі як роботи, опубліковані у журналах «Hydrocarbon Process», «ACS Engineering Au», «International Journal of Multiphase Flow» відповідно у 2007, 2021, 2024 роках, детально розглядають моделювання нестационарних газорідинних потоків під тиском в трубопроводах складної форми. Автори аналізують вплив геометрії трубопроводів, фізичних параметрів потоку, таких як густина рідкої і газової фаз, а також взаємодію фаз на динаміку потоків [14-16].

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Таким чином, аналіз проведених досліджень дозволяє зробити кілька важливих висновків. Незважаючи на значні досягнення в області моделювання руху двофазного потоку, багато аспектів залишаються недостатньо вивченими. Зокрема, вітчизняні наукові праці зосереджуються на дослідженні витоків та витрати однофазного середовища, тоді як закордонні праці спрямовані на достовірне прогнозування загальних характеристик двофазного потоку із використання сучасних чисельних методів, таких як CFD або VOF. Хоча деякі фундаментальні напрямки вже мають значні результати, питання моделювання оцінки впливу вмісту рідини на витрату газу досі не отримало достатньої уваги в попередніх дослідженнях. Як наслідок, воно залишається відкритим і потребує поглибленого вивчення, спрямованого на визначення закономірностей, застосування яких дасть змогу суттєво підвищити точність розрахунків витрат газу під час продування газозбірних шлейфів та свердловин газових і газоконденсатних родовищ.

Мета та завдання досліджень

Мета роботи – дослідження впливу рідинної фази на витрату газу моделюванням фізичного процесу витікання газорідинної суміші з трубопроводу в атмосферу в умовах, які відповідають реальним параметрам продування газозбірних шлейфів та свердловин газових і газоконденсатних родовищ України.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

– створити просторову модель витоку газорідинної суміші з трубопроводу в атмосферу

з геометричними характеристиками та вхідними параметрами максимально наближеними до реальних умов продування;

- визначити закономірності впливу об'ємної долі рідкої фази на швидкість та режим витікання в зону атмосферного тиску газорідинного потоку через вихідний отвір трубопроводу для різних значень надлишкового тиску;

- визначити основні чинники, що призводять до впливу об'ємної частки рідкої фази на витрату газу та надати рекомендації для підвищення достовірності теоретично розрахованих результатів із визначення втрат газу за час продувань згідно чинних методик при умовах формування газорідинного потоку.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Для моделювання та оцінки впливу рідкої фази на витрату газу під час продування газорідинної суміші обрано програмний комплекс Ansys R1 Student (далі – Ansys), з огляду на його широкі можливості точного відтворення складних фізичних процесів. Ansys дозволяє врахувати взаємодію газової та рідкої фаз у деталях, що є критично важливим для розуміння динаміки потоку в умовах витікання.

Однією з головних причин вибору даного програмного комплексу є його здатність створювати детальні тривимірні моделі геометрій, що відповідають реальним умовам, а також забезпечення високої точності розрахунків, навіть у складних топологічних зонах. Закладені в цьому комплексі математичні моделі та числові алгоритми відповідають світовому рівню. Це дозволяє моделювати ключові аспекти процесу, такі як зміна структури потоку, градієнти швидкості та розподіл фаз. Крім того, Ansys забезпечує надійні розрахунки для умов, коли параметри системи змінюються у просторі та часі.

Ще однією важливою перевагою є можливість адаптивного налаштування моделювання, що дозволяє отримувати точні результати для багатофазних потоків, навіть за високих градієнтів тиску та швидкості. Це забезпечує точне врахування впливу об'ємної частки рідини на основні характеристики потоку.

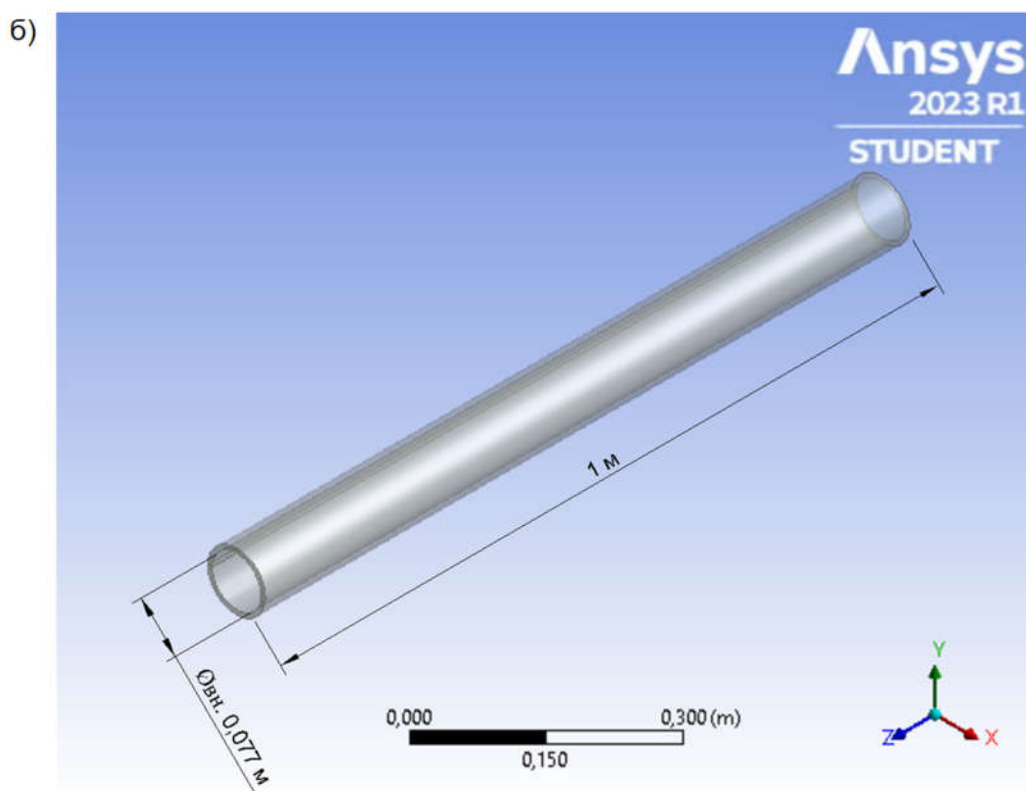
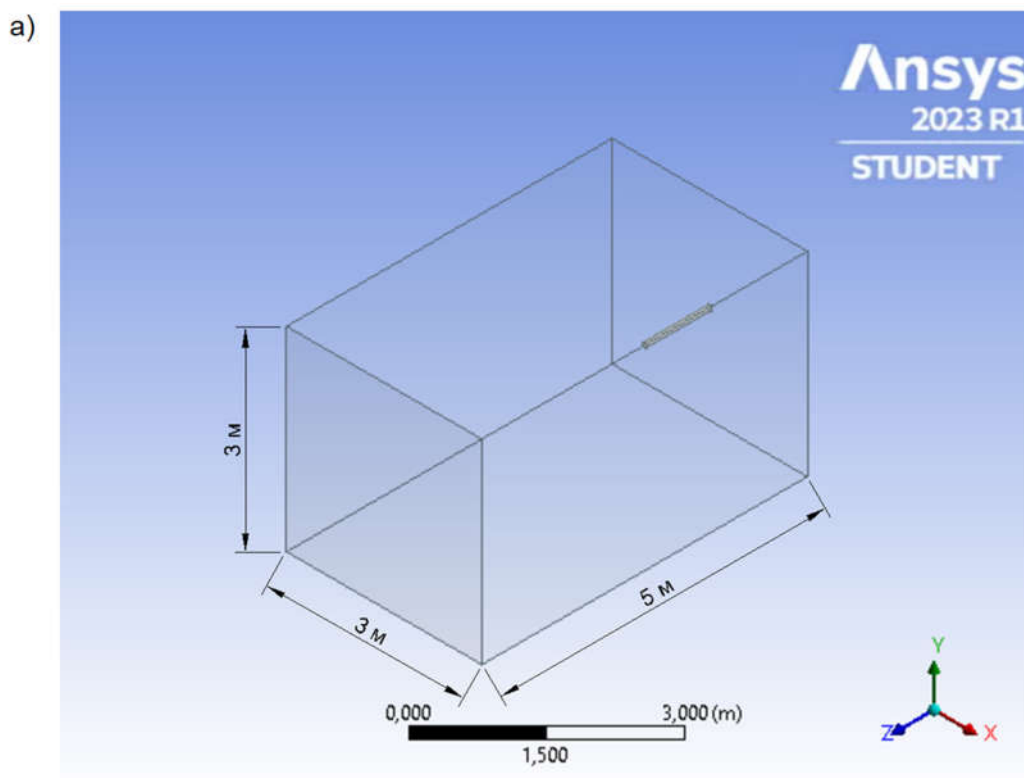
Комплекс також надає ефективні інструменти для аналізу результатів, які дають змогу візуалізувати й оцінювати динамічні параметри процесу, такі як розподіл тиску та швидкості, а також характер взаємодії фаз. Завдяки цьому можна не лише моделювати потік, а й оцінювати його поведінку в різних умовах, що

робить програму особливо корисною для вирішення інженерних задач.

Вибір Ansys обумовлений також його здатністю працювати з широким діапазоном вхідних даних і забезпечувати стабільність розрахунків, навіть у критичних умовах. Ця особливість дозволяє виконувати складні моделювання з високою достовірністю, що є ключовим для вивчення впливу об'ємної частки рідини на витрату газу. Таким чином, Ansys є оптимальним вибором для дослідження складних багатофазних процесів, зокрема під час продування газорідинних сумішей.

З метою відтворення умов витікання газорідинної суміші в атмосферу у модулі геометрії Design Modeler програмного комплексу було створено тривимірну просторову модель. Побудована модель включає два основні елементи, які представляють ключові області процесу (рис. 1). Перша область відповідає зоні низького атмосферного тиску, в яку витікає газорідинна суміш. Геометрично дана область змодельована у вигляді прямокутного паралелепіпеда з такими розмірами: довжина – 5 м, ширина – 3 м, висота – 3 м. Такий підхід дозволяє відобразити вільний простір, в якому відбувається розсіювання суміші, та забезпечити адекватне врахування зовнішніх впливів. Друга область моделює зону високого тиску, через яку витікає суміш. Вона представлена трубопроводом із внутрішнім діаметром 77 мм (найпоширеніший розмір поперечного перерізу факельного трубопроводу) та довжиною 1 м, що відповідає умовам надлишкового тиску, характерного для досліджуваного процесу. Трубопровід забезпечує формування потоку, що дозволяє досліджувати динаміку витікання та вплив параметрів суміші на процес продування. Така структура моделі відображає реалістичне середовище для моделювання динаміки витікання газорідинної суміші, забезпечуючи умови, максимально наближені до реальних.

У процесі моделювання в програмному комплексі Ansys особлива увага приділяється генеруванню обчислювальної сітки, оскільки якість сітки значно впливає на точність і стабільність числових розрахунків. Для дискретизації побудованої тривимірної моделі, що має зони зі складною топологією, в препроцесорі Fluent Meshing було створено тетраедричну сітку (рис. 2). Даний тип сітки ефективно адаптується до складної геометрії, дозволяючи точно відображати області з різкими змінами форми або параметрів потоку.



- а) – геометричні розміри зони низького атмосферного тиску;
б) – геометричні розміри зони надлишкового тиску

Рисунок 1 – Просторова модель у модулі геометрії Design Modeler

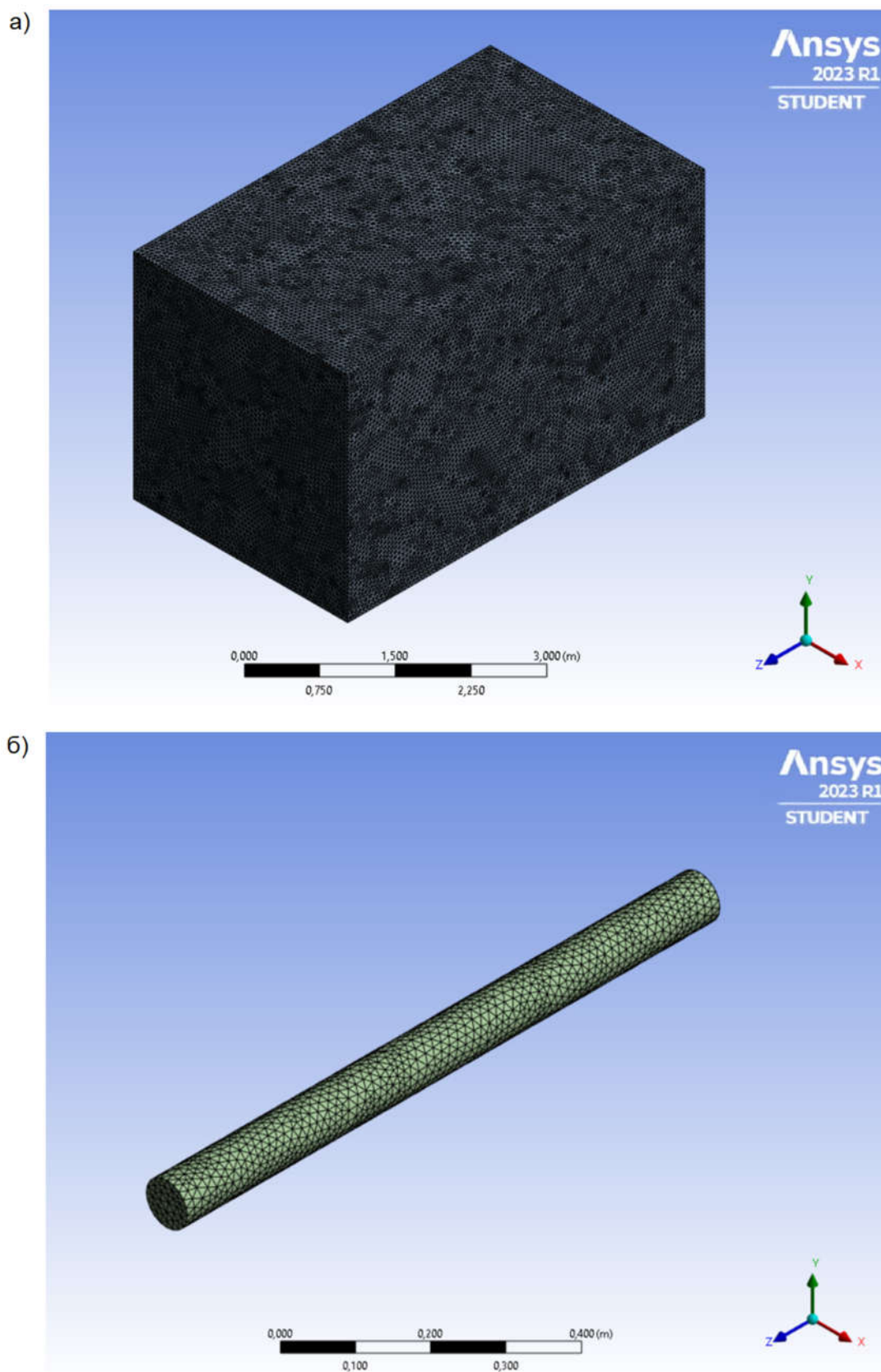


Рисунок 2 – Розрахункова об'ємна сітка

Процес генерування тетраедричної сітки включає автоматичну побудову елементів, адаптовану до геометричних особливостей моделі. У критичних зонах, таких як області високих градієнтів швидкості, виконувалось локальне уточнення сітки з метою підвищення точності розрахунків. Для плавного переходу між зонами з різною щільністю сітки були використанні перехідні елементи, що запобігають числовим похибкам та забезпечують стабільність моделювання.

Загалом тетраедрична сітка забезпечує високу гнучкість у моделюванні складних поверхонь і каналів, дозволяючи зменшувати обчислювальні витрати в більш однорідних частинах моделі при вирішенні багатофазних задач, де важлива точність у критичних зонах і ефективність обчислень.

Для дослідження впливу рідкої фази на витрату газу під час продування в розрахунковому модулі Fluid Flow (Fluent) програмного комплексу Ansys було обрано модель VOF (Volume of Fluid), оскільки цей метод є оптимальним для моделювання багатофазних потоків із чітко розділеними фазами, що властиво для процесу продування рідини газом.

Модель VOF використовує Ейлеревий підхід [17], у якому фази (газ і рідина) описуються як взаємодіючі, але розділені середовища в межах одного обчислювального домену (єдиного розрахункового простору). У контексті дослідження продування газорідинної суміші модель забезпечує точне визначення межі між газовою та рідкою фазами, що є критично важливим для аналізу формування потоку. Однією з головних переваг моделі VOF є її здатність ефективно описувати взаємодію фаз із різними фізичними властивостями, такими як густина та в'язкість. Це дозволяє враховувати зміну параметрів потоку залежно від співвідношення фаз, зокрема об'ємної частки рідини, яка суттєво впливає на гідродинаміку процесу.

Крім того, модель VOF використовується і для моделювання складних фізичних явищ, таких як захоплення газу рідиною, утворення плівок або бризок, що часто спостерігаються під час продування. Завдяки цьому можна дослідити вплив рідкої фази на ключові параметри потоку, включаючи витрату газу, розподіл швидкості, тиску, а також характер взаємодії фаз.

Важливо зазначити, що модель VOF також має високу точність для умов, коли фази різко розділені, а це типово для випадків, де одна фаза значно переважає над іншою. Саме тому

використання цієї моделі обрано для розгляду явища продування газорідинної суміші, оскільки вона забезпечує надійні результати, навіть за складних граничних умов.

Для моделювання динаміки фаз двофазного потоку, а також для відслідковування межі між ними модель VOF використовує рівняння збереження маси, імпульсу та перенесення об'ємної частки.

Рівняння збереження маси визначає баланс маси в контрольному об'ємі й описується співвідношенням [18, 19]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (1)$$

де ρ – густина потоку;
 $\mathbf{v}$ – вектор швидкості;
 t – час.

Густина ρ є усередненою величиною, що залежить від об'ємної частки фаз, і розраховується як:

$$\rho = \alpha_g \rho_g + \alpha_l \rho_l, \quad (2)$$

де α_g і α_l – об'ємні частки газової та рідкої фаз відповідно ($\alpha_g + \alpha_l = 1$);

ρ_g і ρ_l – густини газової та рідкої фаз.

Рух потоку описується рівнянням збереження імпульсу, яке формується на основі рівнянь Нав'є-Стокса (3), або Рейнольдса (4), якщо потік турбулентний.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + f_i, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j') = \\ = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + f_i, \end{aligned} \quad (4)$$

де u_i , u_j – позначають компоненти вектору швидкості;

x_i , x_j – координати;

μ – динамічна в'язкість;

p – тиск;

$\bar{u}_i$, $\bar{u}_j$ – усереднені за часом значення швидкостей;

$\bar{u}_i'$, $\bar{u}_j'$ – пульсаційні складові швидкостей;

f_i – компонент вихідного терміну, що враховує додаткові сили (гравітаційні, поверхневого натягу або інші специфічні ефекти) [20, 21].

Для чисельного моделювання механіки рідин та газів в програмному комплексі Ansys застосовується диференціальна форма рівняння збереження імпульсу, яка зазвичай називається «конвективною» або «неконсервативною» [22, 23]. Дана форма рівняння, що дає

змогу легко виокремлювати та інтерпретувати різні механізми перенесення імпульсу в складних потоках, записується у такому вигляді:

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot v) + F_s + F_g. \quad (5)$$

Ліва частина рівняння представляє зміну імпульсу та містить дві основні складові, які разом описують динаміку потоку. Перша складова, $\frac{\partial v}{\partial t}$ – часова похідна швидкості, враховує часові зміни швидкості у фіксованій точці простору. Друга складова, $v \cdot \nabla v$ – конвективний член, відповідає за зміну імпульсу, спричинену перенесенням потоком, і є основним джерелом нелінійності рівнянь Нав'є-Стокса.

У правій частині рівняння представлені фізичні сили, які впливають на потік. Градієнт тиску – ∇p описує сили, які виникають через різницю тиску в різних точках простору. Цей термін стимулює рух потоку з областей високого тиску в області низького. У двофазному потоці цей член також враховує вплив тиску на межі розділу фаз. Наступний термін $\mu \nabla^2 v$ відповідає за в'язке перенесення імпульсу внаслідок зсувного тертя між шарами флюїду, тоді як $\frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot v)$ враховує вплив об'ємних (дилатаційних) в'язких ефектів, які стають суттєвими в разі стисливого потоку або локальної зміни об'єму. Водночас у зазначених термінах динамічна в'язкість μ визначається як середньозважене значення для фаз:

$$\mu = \alpha_g \mu_g + \alpha_l \mu_l, \quad (6)$$

де μ_g і μ_l – динамічні в'язкості газової та рідкої фаз.

Сила поверхневого натягу F_s враховує вплив межі між фазами, яка визначається через метод Continuum Surface Force (CSF) [24]. Ця сила розраховується як:

$$F_s = \sigma \kappa \nabla \alpha_l, \quad (7)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу;

κ – кривина межі між фазами, яка визначається через градієнти об'ємної частки α_l та дозволяє моделювати явища, пов'язані з утворенням плівок, бризок чи крапель на межі фаз. Кривина обчислюється за формулою:

$$\kappa = -\nabla \cdot \left(\frac{\nabla \alpha_l}{|\nabla \alpha_l|} \right). \quad (8)$$

Гравітаційна сила F_g визначається як:

$$F_g = \rho g, \quad (9)$$

де g – вектор прискорення вільного падіння. Цей термін враховує різницю густини фаз і впливає на розподіл фаз, зокрема в умовах вертикального потоку.

Разом ці компоненти забезпечують точний опис поведінки багатофазного потоку, враховуючи такі важливі явища, як взаємодія фаз, сили поверхневого натягу, гравітацію, а також перенесення маси й імпульсу. Завдяки цій структурі рівняння збереження імпульсу є ключовим для моделювання складних багатофазних процесів у моделі VOF.

Для опису розподілу фаз у домені використовується рівняння перенесення об'ємної частки [25], яке має вигляд:

$$\frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \nabla \cdot (v \alpha_l) = 0. \quad (10)$$

Об'ємна частка газової фази α_g визначається як $1 - \alpha_l$. Це рівняння забезпечує відстеження положення межі між фазами в обчислювальному домені шляхом перенесення об'ємної частки кожної фази під дією швидкісного поля v .

Суттєвий вплив на динаміку двофазного потоку, особливо в умовах продування, має турбулентність. Для розрахунку даної характеристики потоку застосовуються одні з найбільш поширених рівнянь k -epsilon моделі [26, 27], які замикають рівняння збереження маси й імпульсу та дають змогу визначати турбулентну в'язкість, що використовується для моделювання впливу турбулентності на основний потік. Дана модель базується на двох рівняннях, які описують перенесення відповідно кінетичної енергії турбулентності k (11) та швидкості дисипації ϵ (12).

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v k) = \\ & = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \mu_t G - \rho \epsilon, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \epsilon) = \\ & = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} \mu_t G - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \end{aligned} \quad (12)$$

де μ_t – турбулентна динамічна в'язкість;
 σ_k – коефіцієнт Прандтля для k , який рівний одиниці;

G – розрахунковий параметр;

σ_ϵ – коефіцієнт Прандтля для ϵ , рівний 1,3;

C_1 та C_2 – константи моделі, які визначені емпірично на основі експериментальних даних та мають наступні значення 1,44 та 1,92 відповідно.

Модель VOF також враховує складність взаємодії фаз через компресійні схеми, що є числовими методами, які спрямовані на запобігання розмиттю межі між фазами в багатофазних потоках. У процесі числового моделювання, особливо за умов високих градієнтів

концентрації фаз або швидкості, межа між фазами (наприклад, між газом і рідиною) може стати "розмитою" через числову дифузію. Компресійні схеми дозволяють зберігати чіткість межі між фазами, забезпечуючи високу точність результатів.

Для запобігання числовому розмиттю межі між фазами до рівняння (10) додається спеціальний компресійний термін, який враховує напрямок і швидкість руху межі фаз. У загальному вигляді модифіковане рівняння виглядає так:

$$\frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \nabla \cdot (v \alpha_l) + \nabla \cdot (v_c \alpha_l (1 - \alpha_l)) = 0, \quad (13)$$

де v_c – компресійна швидкість, яка спрямована перпендикулярно до межі між фазами і залежить від градієнта об'ємної частки.

Компресійний термін $\nabla \cdot (v_c \alpha_l (1 - \alpha_l))$ сприяє зосередженню об'ємної частки фази в межах тонкої зони, що відповідає фізично реальній границі між фазами. Оскільки α_l змінюється від 0 (газ) до 1 (рідина), градієнт $\nabla \alpha_l$ є максимальним на межі між фазами. Компресійний термін генерує додатковий потік, який компенсує числову дифузію і зберігає різкість межі.

Для реалізації компресійних схем використовуються спеціальні числові методи, такі як Geo-Reconstruct або Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes (CICSAM) [25]. Ці методи визначають межу між фазами через аналіз градієнта об'ємної частки та геометрично реконструюють цю межу, враховуючи її орієнтацію і форму. Компресійна швидкість v_c визначається таким чином, щоб вона підтримувала локалізацію межі і компенсувала вплив числової дифузії. Реконструкція межі дозволяє враховувати складні зміни фазового розподілу, зберігаючи фізично обґрунтовані властивості потоку.

Компресійні схеми є надзвичайно важливими для задач, у яких різке розділення фаз має суттєве значення, наприклад, у процесах утворення хвиль, капель чи бризок. У таких умовах навіть незначне розмиття межі між фазами може призвести до некоректних результатів, таких як штучне змішування фаз або помилкове відображення градієнтів тиску й швидкості. Компресійні схеми зберігають чіткість цих меж навіть за екстремальних умов, забезпечуючи фізично достовірне моделювання.

Вихідними даними для вирішення визначеної задачі даної роботи, окрім фізико-хімічних властивостей флюїдів, є їх об'ємна частка у газорідній суміші, а також величина робочих тисків на вхідній та вихідній границях середовища. Так, із вбудованої бази даних ма-

теріалів Ansys було вибрано природний газ, після чого його властивості призначалися розрахунковій сітці як робоче середовище. Враховуючи, що супутніми складовими природного газу є вода та конденсат, то для рідкої фази в розрахунках вибирався конденсат густиною $\rho_l = 960 \text{ кг/м}^3$, значення якого приблизно рівне густині води. Для врахування стискування газу в меню Materials в списку Density вибирався пункт Real-gas. У такому випадку до системи розв'язування рівнянь автоматично додається рівняння енергії (Energy), а також необхідно зазначити температури газорідного потоку на границях середовища. В якості матеріалу стінки труби з бази даних Ansys обрано матеріал сталь.

Після того, як було обрано флюїди і матеріали та визначено їхні характеристики, у меню Boundary Condition налаштовувалися відповідні граничні умови. На вході в трубопровід задавався тиск Pressure inlet, на виході просторової моделі тиск Pressure outlet. При цьому в налаштуваннях вхідної граничної умови для параметра Direction Specification Method встановлено режим Normal to Boundary, що передбачає спрямування вхідного потоку перпендикулярно до поверхні кожного елемента границі (рис. 3). Крім задавання тиску, на вході у вікні Pressure inlet зазначалась вхідна температура потоку, а також початкові умови для турбулентної k-epsilon моделі: інтенсивність турбулентності (Turbulent Intensity) – 5 % та відношення турбулентної в'язкості до молекулярної (Turbulent Viscosity Ratio) – 10. Аналогічні значення параметрів турбулентної моделі та вихідна температура потоку задавалися на виході у вікні Pressure outlet.

Оскільки в умовах продування формується нестационарний газорідний потік із суттєвими часовими змінами швидкості та тиску для розв'язання рівнянь імпульсу у вкладці Solution methods модуля Fluid Flow (Fluent) обрано алгоритм чисельного рішення PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators). Його розроблено як розширення алгоритму SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) з метою підвищення ефективності та точності у випадках, коли актуальні високі градієнти або великий крок за часом. Також під час налаштування параметрів вирішувача для всіх рівнянь вибирався другий порядок точності.

Спочатку розв'язуються рівняння імпульсу із використанням попередньо відомого розподілу тиску, що дає проміжні поля швидкості. Цей крок не гарантує збереження умови $\nabla \cdot v = 0$

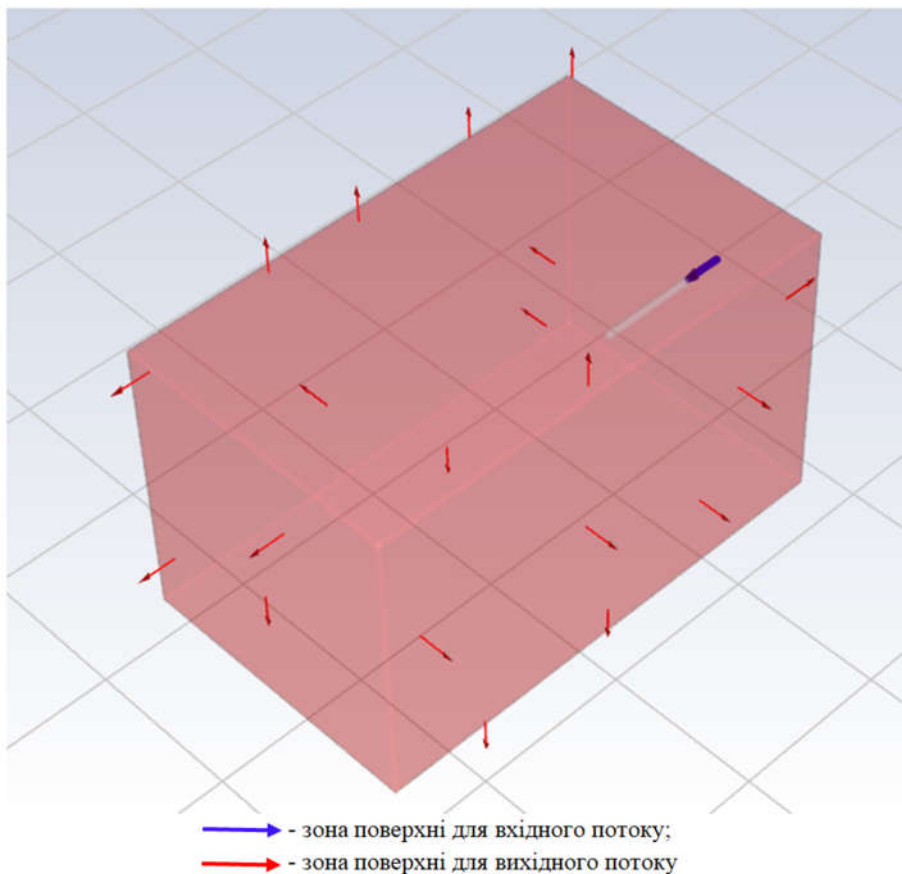


Рисунок 3 – Просторова модель у розрахунковому модулі Fluid Flow (Fluent) із зонами вхідного та вихідного потоків

(для нестисливого потоку) або загальної рівноваги маси (для стисливих середовищ), оскільки тиск на даному етапі ще не відкориговано. Після цього обчислюються масові витрати через грані обчислювальних комірок, щоб визначити, наскільки вони задовольняють рівняння неперервності.

Наступним етапом є пошук поправки для тиску. На базі відхилення масових витрат від балансу формується спеціальне рівняння для поправки тиску [28], яке враховує різницю між поточним наближенням і потрібним значенням, що задовольняє рівняння збереження маси. Розв'язання цього рівняння приводить до скоригованого поля тиску, яке далі використовується для уточнення швидкісного поля таким чином, щоб забезпечити задоволення рівняння неперервності.

Ключовою особливістю PISO є додаткова ітерація тиску-швидкості: після першої корекції тиску та швидкості може виконуватися друга (іноді й більше) корекція. Мета цих додаткових кроків – ще краще узгодити поля тиску та швидкості, уникнувши великих залишків за умови неперервності. Таким чином, алгоритм PISO може швидше досягати збіжності за одну

фізичну ітерацію (один крок за часом) порівняно з SIMPLE чи SIMPLER, особливо для складних нестационарних задач, що мають суттєві перепади тиску чи швидкості в просторі й часі.

Після завершення другого (чи подальших) кроків корекції тиску-швидкості оновлені поля швидкості та тиску використовуються як початкове наближення для наступного часового кроку або глобальної зовнішньої ітерації.

При цьому розв'язок задачі вважається завершеним, якщо виконуються наступні умови: різниця витрат робочого середовища між вхідною та вихідною границями наближається до нуля і залишається практично незмінною протягом кількох ітерацій, усі рівняння досягають рівня неув'язки нижче за рекомендоване порогове значення, а також не спостерігається помітних змін у величинах неув'язок під час подальших ітерацій. Неув'язка для рівняння енергії задавалась $R = 1 \cdot 10^{-6}$, для всіх інших рівнянь – $R = 0,0001$.

Для дослідження оцінки впливу рідини на витрату газу моделювання витоку газорідинної суміші з трубопроводу в атмосферу виконувалось за граничних умов, максимально набли-

Таблиця 1 – Результати моделювання швидкості витікання потоку

Робочий тиск, МПа (надл.)	Об'ємна частка рідини, од.								
	0,00	0,01	0,02	0,05	0,08	0,10	0,20	0,30	0,50
	Швидкість витікання потоку (газу), м/с								
0,10	408,55	193,89	154,26	107,56	87,44	78,90	59,00	49,64	37,94
0,15	455,10	242,73	194,48	138,14	113,65	102,90	85,96	74,73	56,51
0,20	510,46	283,76	230,24	167,14	139,91	127,66	109,76	99,55	75,57
0,25	558,33	328,37	262,88	193,48	162,51	149,26	130,54	118,48	95,08
0,30	584,25	363,48	294,15	215,39	186,04	173,18	151,25	137,99	115,43
0,35	606,06	395,78	321,30	236,78	203,72	190,78	172,39	154,66	133,52

Таблиця 2 – Результати моделювання масової витрати газу

Робочий тиск, МПа (надл.)	Об'ємна частка рідини, од.								
	0,00	0,01	0,02	0,05	0,08	0,10	0,20	0,30	0,50
	Масова витрата газу, кг/с								
0,10	1,7320	0,7110	0,5627	0,3854	0,3066	0,2738	0,1810	0,1358	0,0851
0,15	2,0474	0,9316	0,7518	0,5237	0,4239	0,3794	0,2556	0,1944	0,1209
0,20	2,4200	1,1459	0,9433	0,6779	0,5483	0,4916	0,3348	0,2580	0,1555
0,25	2,7935	1,4250	1,1456	0,8263	0,6825	0,6152	0,4208	0,3134	0,1915
0,30	3,0809	1,6884	1,3645	0,9870	0,8090	0,7282	0,5019	0,3845	0,2342
0,35	3,3508	1,9323	1,5798	1,1567	0,9569	0,8623	0,5859	0,4562	0,2792

жених до характерних фізичному процесу продування газозбірних шлейфів та свердловин газоконденсатних родовищ України. Так, у процесі розрахунку на вхідній граничній поверхні трубопроводу задавалися різні значення надлишкового тиску в діапазоні 0,10÷0,35 МПа з кроком 0,05 МПа. Водночас для кожного встановленого значення надлишкового тиску почергово задавалась різна об'ємна частка рідини (α_l): 0; 0,01; 0,02; 0,05; 0,08; 0,10; 0,20; 0,30; 0,50. За результатами моделювання для кожного випадку присвоєних даних були визначені значення швидкостей витікання потоку (табл. 1) та витрати газу (табл. 2). Додатково для детального аналізу та отримання вичерпної інформації з оцінки впливу рідини на витрату газу засобами графічного інтерфейсу модуля Fluid Flow (Fluent) були візуалізовані контури розподілу швидкостей (рис. 4) та об'ємної частки рідини (рис. 5) вздовж просторової моделі трубопроводу та зони атмосферного тиску. З метою оцінки критичного характеру витікання потоку при моделюванні для кожного з розглянутих випадків також були визначені значення числа Маха (Ma) (табл. 3), які описують відношення швидкості потоку до швидкості звуку в цьому середовищі.

Дослідивши результати з моделювання, встановлено, що швидкість витікання газу в атмосферу суттєво зростає зі збільшенням над-

лишкового тиску (0,10 → 0,35 МПа), оскільки газорідинна суміш набуває додаткового кінетичного запасу. Максимальні значення швидкості спостерігаються при витіканні сухого газу, однак за зростання α_l швидкість стрімко падає, зокрема вже при $\alpha_l \geq 0,01$ помітне кратне зниження. Наявність рідини в потоці призводить до того, що частина кінетичної енергії витрачається на перенесення крапельної або плівкової фази. При цьому рідка фаза може частково блокувати поперечний переріз витікання, створюючи додатковий опір рухові газу. Вже при $\alpha_l \approx 0,02$ швидкість газу може зменшуватись близько у 2–3 рази порівняно з випадком без рідини, оскільки зростають в'язкісні та інерційні втрати, а також виникають зони перехідного змішування з атмосферним повітрям.

Аналіз результатів обчислення числа Маха (Ma) вказує, що за відсутності рідини в потоці газу даний параметр рівний або перевищує одиницю, вказуючи на звуковий чи навіть надзвуковий характер витікання. Однак, за збільшення α_l число Маха суттєво знижується, особливо в умовах нижчих тисків, адже рідка фаза додатково сповільнює розвиток високих швидкостей. Так, вже за $\alpha_l \approx 0,01$ Ma може бути в декілька разів меншим, оскільки через присутність рідкої фази зростає густина суміші та зменшується ефективний переріз руху газу, що

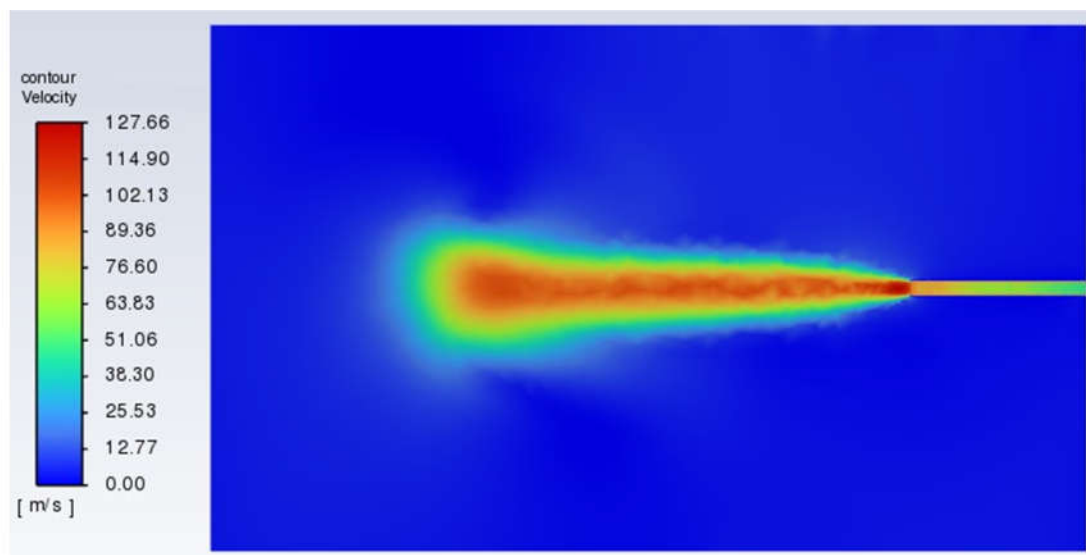


Рисунок 4 – Контур розподілу швидкостей вздовж просторової моделі (на прикладі газорідинного витікання за $P=0,20$ МПа (надл.), $\alpha_l = 0,10$)

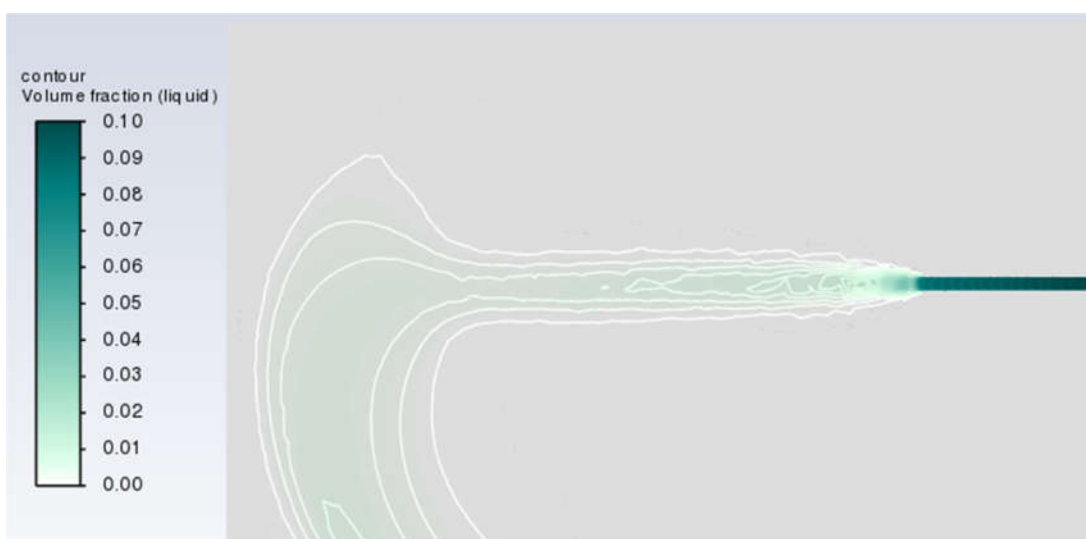


Рисунок 5 – Контур розподілу об'ємної частки рідини вздовж просторової моделі (на прикладі газорідинного витікання за $P=0,20$ МПа (надл.), $\alpha_l = 0,10$)

негативно впливає на розгін потоку до надзвукових швидкостей. Ця закономірність узгоджується із закономірністю швидкості витікання, оскільки підпорядковуються прямопропорційній залежності.

Згідно з результатами моделювання, аналогічно до вже розглянутих параметрів потоку, масова витрата газу в умовах витікання досягає максимальних значень за високого тиску та малої об'ємної частки рідини. Показники вказують на зростання витрати зі збільшенням тиску (зокрема, від 1,0 до 3,5 МПа), однак цей ефект нівелюється зі зростанням α_l . Витрата безпосередньо пов'язана з кінетичними характеристиками витікання. Якщо газ здатен розвивати вищу швидкість (i , відповідно, більше

значення Ma), то й масовий потік збільшується. У присутності рідини обидва параметри, швидкість і Ma , суттєво знижуються через зростаючий опір, тому й кінцева витрата зменшується. Важливим механізмом, що пояснює зниження витрати газу за підвищення α_l , є фактичне зменшення ефективного перерізу витікання. Рідинні включення чи плівка частково блокують робочий отвір, крізь який проходить газ. У перерізі труби за підвищеного вмісту рідини газова фаза не може одночасно займати весь номінальний діаметр. Це знижує пропускну здатність і призводить до помітного скорочення витрати.

Таблиця 3 – Результати моделювання числа Маха в зоні витікання потоку

Робочий тиск, МПа (надл.)	Об'ємна частка рідини, од.								
	0,00	0,01	0,02	0,05	0,08	0,10	0,20	0,30	0,50
	Число Маха, од.								
0,10	1,0001	0,4729	0,3762	0,2623	0,2133	0,1925	0,1439	0,1210	0,0924
0,15	1,1100	0,5921	0,4744	0,3369	0,2772	0,2510	0,2097	0,1823	0,1378
0,20	1,2451	0,6922	0,5616	0,4077	0,3413	0,3114	0,2677	0,2428	0,1841
0,25	1,3619	0,8010	0,6413	0,4720	0,3964	0,3641	0,3184	0,2887	0,2320
0,30	1,4252	0,8867	0,7176	0,5254	0,4538	0,4224	0,3685	0,3366	0,2815
0,35	1,4784	0,9646	0,7837	0,5776	0,4969	0,4654	0,4205	0,3773	0,3255

Висновки

Для дослідження впливу об'ємної частки рідини на витрату газу під час витікання газорідинної суміші в програмному комплексі Ansys створено просторову модель, геометричні характеристики та вхідні параметри якої максимально наближенні до умов реальних продувань газозбірних шлейфів та свердловин газоконденсатних родовищ України. Розрахунок параметрів витікання газорідинного потоку проведено за різних значень надлишкового тиску від 0,10 МПа до 0,35 МПа з кроком 0,05 МПа та об'ємної частки рідини (α_l): 0; 0,01; 0,02; 0,05; 0,08; 0,10; 0,20; 0,30; 0,50. Результати моделювання показали, що збільшення надлишкового тиску сприяє зростанню швидкості витікання газу, тож, відповідно, й числа Маха (Ma), що за відсутності рідини досягає або перевищує одиницю, вказуючи на (над)звуковий режим. Утім, навіть невелике зростання об'ємної частки рідини ($\alpha_l \approx 0,01$) викликає помітне зниження швидкості й Ma до субзвукових значень, оскільки рідка фаза підвищує густину суміші та частково «блокує» вільний переріз трубопроводу, збільшуючи

в'язкісні й інерційні втрати. Це особливо позначається на масовій витраті газу, яка тісно пов'язана з кінетичними параметрами потоку й геометричними обмеженнями. За високих тисків і малої кількості рідини ($\alpha_l < 0,01$) витрата газу виявляється максимальною, однак зі зростанням α_l витрата зменшується в рази через суттєве зменшення швидкості потоку та площі вільного перерізу для руху газу в трубопроводі.

Таким чином, визначені закономірності за результатами моделювання, на додаток до попередніх промислових досліджень з оцінки достовірності існуючих методик визначення обсягу втрат газу під час продування [29], підтверджують потребу у визначенні та інтеграції коефіцієнтів, які б враховували присутність рідини в газовому потоці.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Дорошенко Я.В. Моделювання витікань газу з газопроводів в аварійних ситуаціях. *Вісник Вінницького політехнічного університету*. 2020. № 3 (150). С. 22-28.
2. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Дрін Н.Я., Дем'янчук Я.М. Вплив фільтраційного опору ґрунту на інтенсивність аварійних витоків із газопроводу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2015. № 2. С. 68-73.
3. Матіко Ф., Гнатюк О. Газодинамічні явища у витратомірах змінного перепаду тиску. *Збірник матеріалів конференції "Сучасні технології в енергетиці"*. 2017. С. 158-160.
4. Garoosi F., Hooman K. Numerical simulation of multiphase flows using an enhanced Volume-of-Fluid (VOF) method. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2022. Vol. 215. P. 106-131.
5. Harlow F.H., Amsden A.A. A Numerical Fluid Dynamics Calculation Method for All Flow Speeds. *Journal of Computational Physics*. 1971. Vol. 8. Issue 2. P. 197-213.
6. Meziou A., Chaari M., Franchek M. et al. Low-Dimensional Modeling of Transient Two-Phase Flow in Pipelines. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, Control*. 2016. Vol. 138. Issue 10. 101008.

7. Meziou A., Khan Z., Wassar, T. et al. Dynamic Modeling of Two-Phase Gas/Liquid Flow in Pipelines. *SPE Journal*. 2019. Vol. 24. Issue 5. P. 2239-2263.
8. Tzotzi C., Bontozoglou B., Andritsos N., Vlachogiannis M. Effect of Fluid Properties on Flow Patterns in Two-Phase Gas-Liquid Flow in Horizontal and Downward pipes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011. Vol. 50. Issue 2. P. 645-655.
9. Yaqub M.W., Marappagounder R., Rusli R. et al. Review on Gas-Liquid-Liquid Three-Phase Flow Patterns, Pressure Drop, and Liquid Holdup in Pipelines. *Chemical Engineering Research and Design*. 2020. Vol. 159. P. 505-528.
10. Henry R.E., Fauske H.K. The Two-Phase Critical Flow of One-Component Mixtures in Nozzles, Orifices, and Short Tubes. *Journal of Heat Transfer*. 1971. Vol. 93. Issue 2. P. 179-187.
11. Ghorai S., Nigam K.D.P. CFD Modeling of Flow Profiles and Interfacial Phenomena in Two-Phase Flow in Pipes. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2006. Vol. 45. Issue 1. P. 55-65.
12. Masolwa A.M. Evaluation of Models to Predict Liquid Loading in Gas Wells : Master Thesis. Trondheim : NTNU, 2018. 77 p.
13. Ke W., Hou L., Wang L. et al. Research on Critical Liquid-Carrying Model in Wellbore and Laboratory Experimental Verification. *Processes*. 2021. Vol. 9, №6. 923.
14. Motamedian E., Kasiri N., Ghaemi A. Modeling Two-Phase Flow in Horizontal Pipe Bends. *Hydrocarbon Process*. 2007. 86 (9). P. 145-150.
15. Döb A., Schubert M., Wiedemann P. et al. Flow Morphologies in Straight and Bent Horizontal Pipes. *ACS Engineering Au*. 2021. Vol. 1. Issue 1. P. 39-49.
16. Yurishchev A., Brauner N., Ullmann A. Modeling of high-pressure transient gas-liquid flow in M-shaped jumpers of subsea gas production systems. *International Journal of Multiphase Flow*. 2024. Vol. 181. 105003.
17. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. *Journal of Computational Physics*. 1981. Vol. 39. Issue 1. P. 201-225.
18. Introduction to Theoretical and Computational Fluid Dynamics / edited by C. Pozrikidis. 2nd edn. New York : Oxford University Press, 2013. 1243 p.
19. White F. M. Fluid Mechanics : 8th edition. New York : McGraw-Hill Education, 2016. 864 p.
20. Anderson J. D. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. New York : McGraw-Hill, 1995. 547 p.
21. Дорошенко Я. В., Марко Т. І., Дорошенко Т. І. Дослідження динаміки руху багатофазних потоків фасонними елементами обв'язки компресорної станції магістрального газопроводу. *International scientific journal*. 2016. № 7. С. 68-77.
22. Panton R. L. Incompressible Flow : Fourth edition. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2013. 878 p.
23. Vlachopoulos J. Fundamentals of Fluid Mechanics : Revised internet edition. Hamilton : Polydynamics Inc., 2016. 816 p.
24. Brackbill J. U., Kothe D. B., Zemach C. A Continuum Method for Modeling Surface Tension. *Journal of Computational Physics*. 1992. Vol. 100. Issue 2. P. 335-354.
25. Ubbink O. Numerical Prediction of Two Fluid Systems With Sharp Interfaces : PhD thesis. London : University of London, 1997. 193 p.
26. Versteeg H. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method. Harlow : Longman Scientific & Technical, 1995. 257 p.
27. Ferziger J. H., Perić M., Street R. L. Computational Methods for Fluid Dynamics : Fourth edition. Cham : Springer Nature Switzerland AG, 2020. 596 p.
28. Issa R. I. Solution of Implicitly Discretized Fluid Flow Equations by Operator Splitting. *Journal of Computational Physics*. 1986. Vol. 62. Iss. 1. P. 40-65.
29. Голубенко В. П., Стецюк С. М., Філіпчук О. О. Аналіз методик визначення втрат газу під час продувань шлейфів і свердловин для видалення рідинних накопичень. *Нафтогазова енергетика*. 2023. № 1. С. 24-34.

References

1. Doroshenko Ya.V. Modeliuvannia vytikan hazu z hazoprovodiv v avariinykh sytuatsiiakh. Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho universytetu. 2020. № 3 (150). P. 22-28. [in Ukrainian]
2. Hrudz V.Ya., Hrudz Ya.V., Drin N.Ya., Demianchuk Ya.M. Vplyv filtratsiinoho oporu gruntu na intensyvnist avariinykh vytokiv iz hazoprovodu. Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovysheh. 2015. № 2. P. 68-73. [in Ukrainian]
3. Matiko F., Hnatiuk O. Hazodynamichni yavysheha u vytratimirakh zminnoho perepadu tysku. Zbirnyk materialiv konferentsii "Suchasni tekhnolohii v enerhetytsi". 2017. P. 158-160. [in Ukrainian]
4. Garoosi F., Hooman K. Numerical simulation of multiphase flows using an enhanced Volume-of-Fluid (VOF) method. International Journal of Mechanical Sciences. 2022. Vol. 215. P. 106-131.
5. Harlow F.H., Amsden A.A. A Numerical Fluid Dynamics Calculation Method for All Flow Speeds. Journal of Computational Physics. 1971. Vol. 8. Issue 2. P. 197-213.
6. Meziou A., Chaari M., Franchek M. et al. Low-Dimensional Modeling of Transient Two-Phase Flow in Pipelines. Journal of Dynamic Systems, Measurement, Control. 2016. Vol. 138. Issue 10. 101008.
7. Meziou A., Khan Z., Wassar, T. et al. Dynamic Modeling of Two-Phase Gas/Liquid Flow in Pipelines. SPE Journal. 2019. Vol. 24. Issue 5. P. 2239-2263.
8. Tzotzi C., Bontozoglou B., Andritsos N., Vlachogiannis M. Effect of Fluid Properties on Flow Patterns in Two-Phase Gas-Liquid Flow in Horizontal and Downward pipes. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2011. Vol. 50. Issue 2. P. 645-655.
9. Yaqub M.W., Marappagounder R., Rusli R. et al. Review on Gas-Liquid-Liquid Three-Phase Flow Patterns, Pressure Drop, and Liquid Holdup in Pipelines. Chemical Engineering Research and Design. 2020. Vol. 159. P. 505-528.
10. Henry R.E., Fauske H.K. The Two-Phase Critical Flow of One-Component Mixtures in Nozzles, Orifices, and Short Tubes. Journal of Heat Transfer. 1971. Vol. 93. Issue 2. P. 179-187.
11. Ghorai S., Nigam K.D.P. CFD Modeling of Flow Profiles and Interfacial Phenomena in Two-Phase Flow in Pipes. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2006. Vol. 45. Issue 1. P. 55-65.
12. Masolwa A.M. Evaluation of Models to Predict Liquid Loading in Gas Wells: Master Thesis. Trondheim: NTNU, 2018. 77 p.
13. Ke W., Hou L., Wang L. et al. Research on Critical Liquid-Carrying Model in Wellbore and Laboratory Experimental Verification. Processes. 2021. Vol. 9, №6. 923.
14. Motamedian E., Kasiri N., Ghaemi A. Modeling Two-Phase Flow in Horizontal Pipe Bends. Hydrocarbon Process. 2007. 86 (9). P. 145-150.
15. Döb A., Schubert M., Wiedemann P. et al. Flow Morphologies in Straight and Bent Horizontal Pipes. ACS Engineering Au. 2021. Vol. 1. Issue 1. P. 39-49.
16. Yurishchev A., Brauner N., Ullmann A. Modeling of high-pressure transient gas-liquid flow in M-shaped jumpers of subsea gas production systems. International Journal of Multiphase Flow. 2024. Vol. 181. 105003.
17. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. Journal of Computational Physics. 1981. Vol. 39. Issue 1. P. 201-225.
18. Introduction to Theoretical and Computational Fluid Dynamics / edited by S. Pozrikidis. 2nd edn. New York: Oxford University Press, 2013. 1243 p.
19. White F. M. Fluid Mechanics: 8th edition. New York: McGraw-Hill Education, 2016. 864 p.
20. Anderson J. D. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. New York: McGraw-Hill, 1995. 547 p.
21. Doroshenko Ya. V., Marko T. I., Doroshenko T. I. Doslidzhennia dynamiky rukhu bahatofaznykh potokiv fasonnymy elementamy obv'iazky kompresornoj stantsii mahistralnogo hazoprovodu. International scientific journal. 2016. № 7. P. 68-77. [in Ukrainian]
22. Pantan R. L. Incompressible Flow: Fourth edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013. 878 p.
23. Vlachopoulos J. Fundamentals of Fluid Mechanics: Revised internet edition. Hamilton: Polydynamics Inc., 2016. 816 p.

24. Brackbill J. U., Kothe D. B., Zemach C. A Continuum Method for Modeling Surface Tension. *Journal of Computational Physics*. 1992. Vol. 100. Issue 2. P. 335-354.
25. Ubbink O. Numerical Prediction of Two Fluid Systems With Sharp Interfaces: PhD thesis. London: University of London, 1997. 193 p.
26. Versteeg H. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method. Harlow : Longman Scientific & Technical, 1995. 257 p.
27. Ferziger J. H., Perić M., Street R. L. Computational Methods for Fluid Dynamics: Fourth edition. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2020. 596 p.
28. Issa R. I. Solution of Implicitly Discretized Fluid Flow Equations by Operator Splitting. *Journal of Computational Physics*. 1986. Vol. 62. Issue 1. P. 40-65.
29. Holubenko V. P., Stetsiuk S. M., Filipchuk O. O. Analiz metodyk vyznachennia vtrat hazu pid chas produvan shleifiv i sverdllovyn dlia vydalennia ridynnykh nakopychen. *Naftohazova enerhetyka*. 2023. № 1. P. 24-34. [in Ukrainian]

SIMULATION MODELING OF BLOWDOWNS OF WELLS AND GAS GATHERING PIPELINES OF GAS-CONDENSATE FIELDS

Holubenko V. P.

JSC «Ukrasvydobuvannia»

26/28, Kudriavska Str., Kyiv, 04053, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0008-3597-8523>

e-mail: slava-golubenko@ukr.net

Abstract. Three-dimensional modelling of the physical process of a gas–liquid mixture leaking from a pipeline into the atmosphere was carried out under conditions corresponding to the actual parameters observed during the blowing of gathering pipelines and wells in gas and gas-condensate fields in Ukraine. In the Ansys R1 Student software environment, a three-dimensional model comprising zones of atmospheric and excess pressure was constructed. These were represented by a rectangular parallelepiped (with dimensions of 5 m by 3 m by 3 m) and a pipeline with an inner diameter of 77 mm and a length of 1 m, respectively. The VOF (Volume of Fluid) mathematical model, which is based on solving a system of mass conservation, momentum and volume fraction transport equations closed by a two-parameter k - ϵ turbulence model, was selected for the simulation. This model enables the prediction of multiphase flow dynamics with distinctly separated phases, as is typical when blowing down liquid with gas. Various values of excess pressure (0.10–0.35 MPa) and liquid volume fraction ($\alpha_l = 0.00$ –0.50) were assigned at the inlet boundary of the pipeline to perform the calculations. The outflow velocity, Mach number and gas flow rate were determined from the simulation results for each set of boundary input data. Additionally, to obtain comprehensive information on the effect of liquid on gas flow rate and for detailed analysis, the graphical interface of the Fluid Flow (Fluent) module was used to visualise velocity distribution contours and the liquid volume fraction along the 3D model of the pipeline and the atmospheric pressure zone. By examining the modelling results, the study identified regularities in the influence of the liquid phase on the gas flow rate during the pressurised outflow of a gas-liquid mixture from the pipeline into the atmosphere. It also revealed the primary factors leading to a reduced gas flow rate when the liquid volume fraction in the flow increases. It was confirmed that additional coefficients need to be developed and integrated into current gas loss calculation methodologies for blowing, in order to account for the presence of liquid in the gas flow.

Key words: gas-condensate field; modeling; flow; liquid; outflow velocity; flow rate.