

© **А.Д. Гутак**
Полтавський
національний
технічний університет
ім. Юрія Кондратюка

Використання вихрових труб для підготовки природних газів

УДК 66.074.1

У статті аргументовано необхідність модифікації типових установок низькотемпературної сепарації, що працюють на дросель-ефекті, шляхом використання більш енергоефективних вихрових технологій. За допомогою чисельних методів проведено дослідження процесів, що проходять у вихровій трубі. Отримані результати розрахунків відповідають проведеним експериментальним дослідженням, що підтверджує можливість використання чисельної моделі для розробки ефективної конструкції вихрової труби та дає змогу прогнозувати параметри роботи установки низькотемпературної сепарації з вихровими трубами.

Ключові слова: низькотемпературна сепарація, дросель-ефект, ефект Ранка.

В статье аргументирована необходимость модификации типовых установок низкотемпературной сепарации, работающих на дросель-эффекте, путем использования более энергоэффективных вихревых технологий. С помощью численных методов проведено исследование процессов, которые проходят в вихревой трубе. Полученные результаты расчетов соответствуют проведенным экспериментальным исследованиям, что подтверждает возможность использования численной модели для разработки эффективной конструкции вихревой трубы и позволяет прогнозировать параметры работы установки низкотемпературной сепарации с вихревыми трубами.

Ключевые слова: низкотемпературная сепарация, дросель-эффект, эффект Ранка.

The necessity of modification the typical low-temperature separation plants that operate on Joule-Thomson effect is argued. It could be done by utilizing more energy-efficient vortex technology. The investigations on processes taking place in the vortex tube were performed with the help of numerical methods. The results of numerical simulation correspond to experimental data, which confirms the possibility of using a numerical model for development the efficient vortex tube design. It allows predicting parameters of vortex tubes in low-temperature separation units.

Key words: low-temperature separation, Joule-Thomson effect, Ranque effect.

В Україні на сьогодні основним низькотемпературним процесом промислової підготовки газу залишається процес низькотемпературної сепарації (НТС) із охолодженням газу за рахунок дроселювання, тобто використовується ефект Джоуля–Томсона. Процес дроселювання є ізентальпійним і призводить до зниження температури газу в діапазоні 3–5 К/МПа. Таким чином, залежно від перепаду тиску температура сепарації на промислових установках НТС коливається в межах від мінус 10 до мінус 30 °С у зимовий період і від плюс 10 до мінус 5 °С у літній період.

У зв'язку з падінням пластового тиску в процесі експлуатації родовища типова технологія НТС дає змогу проводити якісну підготовку газу лише упродовж перших 5–10 років експлуатації родовища. Зі зменшенням перепаду тиску на дроселі температура сепарації починає підвищуватися. Для її підтримання в необхідному діапазоні доводиться модифікувати установку НТС додатковими технологічними апаратами і системами (дотискувальна компресорна станція, апарати повітряного охолодження, турбодетандери, пропанові та аміачні холодильні системи тощо). Наприклад, на сьогодні в ГПУ «Полтавагазвидобування» налічується близько 30 УКПГ, лише 5 із яких працює із застосуванням турбодетандерів, 5 УКПГ – із дотискувальними компресорними станціями, решта – з використанням ефекту Джоуля–Томсона. Таке широке використання дросель-ефекту пов'язане з недоцільністю

встановлення турбодетандерів, холодильних установок та іншого дорогого обладнання на невеликих об'єктах через незначні обсяги видобутку газу та конденсату. Тому на завершальному етапі розробки виникає проблема дотримання необхідної точки роси та якості газу.

Одним із основних способів продовження терміну ефективної роботи установки НТС у період зниження тиску на гирлі свердловин може стати використання процесу вихрового енергетичного розділення потоків – ефекту Ранка. Він реалізується у вихрових трубах, у яких потік газу, розширюючись, розділяється на холодний (центральний) і теплий (периферійний). Для багатоконпонентної газоконденсатної суміші, крім температурного розділення, відбувається також значне компонентне розділення.

Використання вихрових труб у інших цілях пов'язане з необхідністю стиснення повітря за допомогою компресорів або іншого обладнання. Нафтогазова промисловість є однією з небагатьох, де газ природно знаходиться під великим тиском та необхідності його стиснення немає. Досить дивним є той факт, що вихрові труби досі не знайшли застосування у нафтогазовій промисловості України.

Дослідження у нашій роботі пов'язані з обґрунтуванням можливості використання вихрових труб у складі систем НТС за допомогою гідродинамічного моделювання.

Незважаючи на багаторічну історію вивчення ефекту Ранка, досі не існує загально визнаної фізичної моделі

цього явища. Ця ситуація з причини непередбачуваності створює складнощі під час конструювання вихрових труб різного призначення.

Попередні дослідники у своїх експериментах використовували повітря або інертні гази невисокого тиску (0,24–1,2 МПа). Надлишковий тиск на виходах холодного і гарячого потоків у переважній більшості експериментів був відсутній, тобто з відкритим виходом у атмосферу. Це зовсім відрізняється від умов на установці низькотемпературної сепарації, де вхідний тиск може становити 15,0–5,0 МПа, а тиск у низькотемпературному сепараторі 5,5–2,5 МПа. Тому використати результати їхніх досліджень для конструювання промислового зразка вихрової труби неможливо. Натомість ми застосували методи обчислювальної гідродинаміки та спробували створити адекватну математичну модель вихрової труби для роботи в умовах установки низькотемпературної сепарації.

Математична модель

У нашій роботі досліджено тривимірну нестационарну турбулентну течію реального газу. Основні рівняння, які її описують, наведено нижче [1].

Закон збереження маси:

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

де ρ – густина газу, u – вектор швидкості, t – час.

Закон збереження моменту:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u u) = -\nabla p + \nabla \tau, \quad (2)$$

де p – статичний тиск, τ – тензор напружень.

Закон збереження енергії:

$$\frac{\partial(\rho h_0)}{\partial t} + \nabla(\rho u h_0) = \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla(\lambda \nabla T) - \nabla(\tau u), \quad (3)$$

де T – температура газу, λ – коефіцієнт теплопровідності газу, h_0 – питома повна ентальпія газу.

Питома повну ентальпію газу визначаємо таким чином:

$$h_0 = h + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2), \quad (4)$$

де h – питома статична ентальпія, u, v, w – компоненти вектора швидкості у Декартовій системі координат.

У цій гідродинамічній моделі для опису властивостей газу ми вперше використали кубічне рівняння стану Пенга–Робінсона [2], яке має такий вигляд:

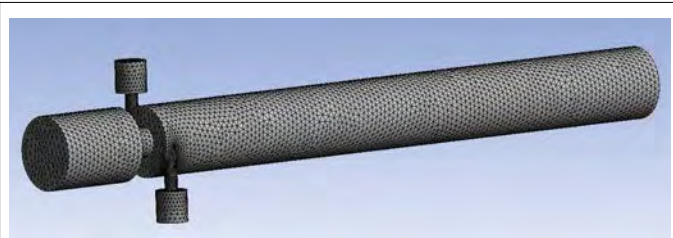


Рис. 1. Розрахункова сітка моделі вихрової труби

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a\alpha(T)}{V^2 + 2bV - V^2}, \quad (5)$$

де p – тиск газу, T – температура газу, V – питомий об'єм газу, R – універсальна газова стала, $\alpha(T)$ – температурна функція.

Коефіцієнти a і b цього рівняння визначають так:

$$a = 0,45724 \frac{R^2 T_c^2}{p_c}, \quad (6)$$

$$b = 0,0778 \frac{RT_c}{p_c}, \quad (7)$$

де p_c – критичний тиск, T_c – критична температура.

Пенг та Робінсон запропонували таку залежність для визначення температурної функції $\alpha(T)$:

$$\alpha(T) = \left[1 + m \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_c}} \right) \right]^2, \quad (8)$$

де параметр m залежить від фактора ацентричності молекул:

$$m = 0,379642 + 1,48503\omega - 0,1644\omega^2 + 0,016667\omega^3. \quad (9)$$

Модель турбулентності

Для моделювання турбулентності у дослідженні ми використали LES-WALE-модель (Large Eddy Simulation-Wall-Adapted Local Eddy). Основна ідея LES-моделі полягає у розділенні великих та незначних вихрових структур. Основні рівняння для цієї моделі турбулентності отримуються шляхом фільтрування нестационарних рівнянь Нав'є–Стокса у фізичному просторі. Для великих турбулентних структур систему рівнянь розв'язують напряму, а для малих вихорів обчислюють за допомогою SGS-моделі (Subgrid-Scale Model).

У моделі LES тензор напружень Рейнольдса пов'язується з турбулентною в'язкістю таким чином [3]:

$$-\left(\tau^* - \frac{\delta}{3} \tau \right) = 2\mu_{SGS} \bar{S}, \quad (10)$$

де S – локальна швидкість зсуву.

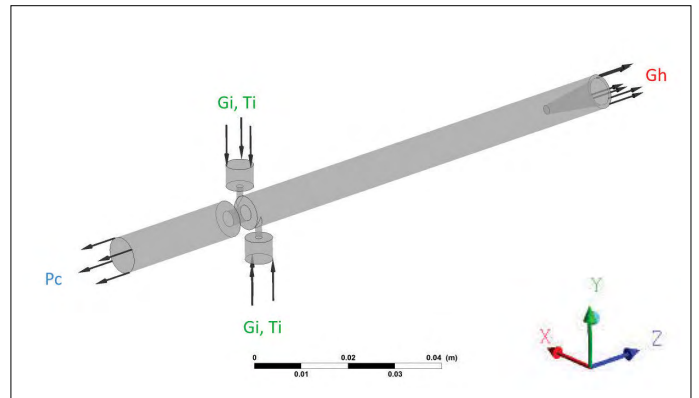


Рис. 2. Граничні умови для моделі вихрової труби

$$\bar{S} = \frac{1}{2} (\nabla u + (\nabla u)^T). \quad (11)$$

Згідно з WALE-моделлю турбулентну в'язкість знаходимо за таким рівнянням [4]:

$$\mu_{SGS} = (C_w \Delta)^2 \frac{(S^d S^d)^{3/2}}{(\bar{S} \bar{S})^{5/2} + (S^d S^d)^{5/4}}, \quad (12)$$

де C_w – калібрувальна константа, $C_w=0,5$.

Розрахункова модель

Для розрахунку процесів, що проходять у вихровій трубі, було створено тривимірну геометричну модель її внутрішнього простору. Для проведення чисельних досліджень використано вихрову трубу з двома тангенціальними соплами. Також було створено подовжений патрубок холодного виходу для зменшення нестабільності потоку на границі. Геометричну модель задано з параметрами, відображеними у таблиці.

У цьому дослідженні використано повну тривимірну розрахункову сітку (рис. 1), елементами якої є тетраедри з максимальним розміром 2 мм. Мінімальний розмір елементів був заданий на рівні 0,02 мм. Таким чином, загальна кількість елементів сітки становила 130422 тетраедри, а кількість вузлів сітки – 25880.

Як граничні умови було задано параметри, розташування яких зображено на рис. 2: масова витрата через сопло $G_i=0,16$ кг/с; масова витрата гарячого потоку $G_h=(0; 0,1; 0,2 \dots 1)*2 G_i$; тиск на виході холодного потоку $P_c=47$ атм; температура вхідних потоків $T_i=8,8$ °С.

Як робочий газ було вибрано метан як найбільш близький до природного газу. Для визначення його властивостей було обрано рівняння стану реального газу Пенга–Робінсона. Систему було задано як адіабатну, без теплообміну з навколишнім середовищем. Для розрахунку нестационарної задачі було задано крок зміни часу – 10^{-4} с. Ітерації припинялися після досягнення псевдостационарного стану, що відповідає циклічній зміні тиску, температури, швидкості та густини. Крім того, у процесі

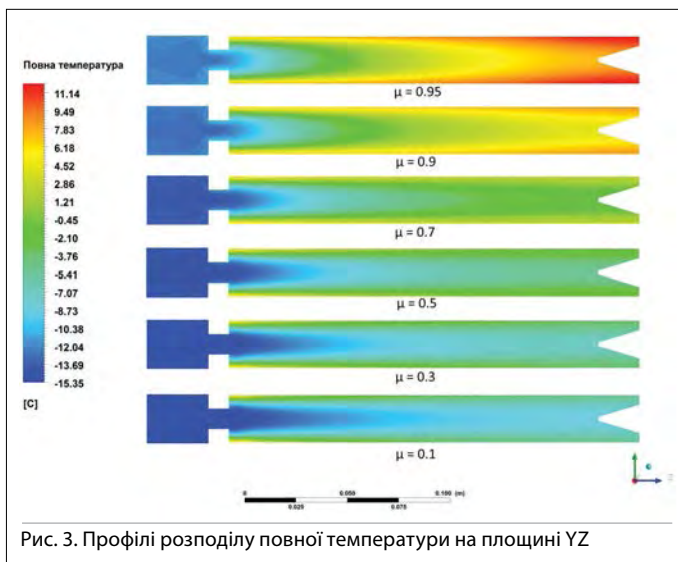


Рис. 3. Профілі розподілу повної температури на площині YZ

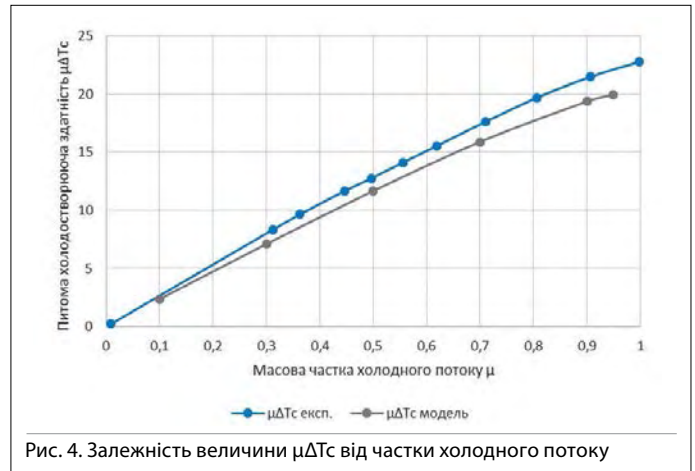


Рис. 4. Залежність величини $\mu\Delta T_c$ від частки холодного потоку

Таблиця

Геометричні розміри моделі вихрової труби

| | | |
|--------------------------|----|-----|
| Внутрішній діаметр труби | мм | 23 |
| Довжина труби | мм | 200 |
| Діаметр сопел | мм | 4 |
| Кількість сопел | – | 2 |
| Діаметр діафрагми | мм | 10 |

розрахунку контролювали баланси маси, моменту та енергії, а також їхні середньоквадратичні похибки.

Висновки

У статті досліджено залежність зміни температури холодного та гарячого потоків від частки холодного потоку, яка визначається як:

$$\mu = \frac{2G_i - G_h}{2G_i}. \quad (13)$$

У результаті розрахунків було отримано профілі розподілу тиску, температури, швидкості та інших величин всередині вихрової труби. Тиск на вході в сопла вихрової труби при $G_i=0,16$ кг/с становив 85–89 атм залежно від заданої величини масової витрати гарячого потоку G_h . На рис. 3 зображено профілі розподілу повної температури на розрізі вихрової труби по площині YZ для діапазону значень частки холодного потоку.

Як бачимо на рис. 3, мінімальна температура холодного потоку спостерігається тоді, коли частка холодного потоку $\mu=0,1$ і сягає мінус 15,35 °С. При цьому температура гарячого потоку дорівнює мінус 5,78 °С. Максимальну температуру гарячого потоку спостерігаємо при $\mu=0,95$. Вона дорівнює +11,03 °С, тоді як температура холодного потоку досягає мінус 12,15 °С. Отже, для досягнення найнижчої температури газу витрата холодного потоку повинна бути мінімальною, а для отримання максимального нагрівання необхідно зменшувати витрату гарячого потоку. Зона пониженої температури формується у приосьовій зоні вихрової труби. Як бачимо, вона не досягає гарячого виходу, тому виготовляти вихрові труби більшої довжини для згаданих вхідних параметрів недоцільно.

З метою визначення можливості використання цієї гідродинамічної моделі для розрахунку вихрових труб проведено промислові дослідження. За основу для конструювання промислового зразка взято геометричні розміри розрахункової моделі. Експерименти були проведені за тих же умов, що і під час моделювання. На рис. 4 зображено експериментальну та розрахункову залежності величини $\mu\Delta T_c$ від частки холодного потоку. Ця величина характеризує холодоутворюючу здатність вихрової труби.

Середня розбіжність результатів становить 8,5 %, що можна вважати непоганим результатом. Відмінність виникає внаслідок використання в моделі чистого метану, який не зовсім відповідає властивостям конденсатонасиченого природного газу. Порівнюючи мінімальну температуру холодного потоку, отриману під час моделювання (мінус 15,35 °C), з температурою природного газу після дроселювання (мінус 13 °C), бачимо більше охолодження на вихровій трубі. За результатами проведених експериментальних досліджень мінімальна температура холодного потоку становила мінус 17,2 °C, що підтверджує ефективність вихрової труби та адекватність створеної гідродинамічної моделі.

Отже, отриману модель загалом можна використовувати для подальшого проектування конструкцій промислових вихрових труб, які можна було б застосовувати у системах низькотемпературної сепарації газу. Це дасть змогу продо-

вжити термін ефективної роботи установки НТС без додаткових капітальних витрат.

Список літератури

1. **Versteeg H.K.** An introduction to computational fluid dynamics. The finite volume method / H.K. Versteeg, W. Malalasekera. – Essex: Longman Group Ltd., 1995. – 257 p. – ISBN 0-582-21884-5.
2. **Curtis H. Whitson.** Phase Behavior / Curtis H. Whitson, Michael R. Brulé. – Richardson, Texas: Society of Petroleum Engineers Inc., 2000. – 240 p. – ISBN 1-55563-087-1.
3. **ANSYS CFX-Solver Theory Guide /** Canonsburg: SAS IP Inc., 2013.
4. **Nicoud F.** Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor / F. Nicoud, F. Ducros // Flow, Turbulence and Combustion. – 1999. – №62. – Pp. 183–200.

Автор статті



Гутак Анатолій Дмитрович

Інженер з видобування нафти і газу ПрАТ «Природні ресурси», м. Полтава. Закінчив ІФНТУНГ, спеціальність – видобування нафти і газу. Основні напрями наукових досліджень: дослідження ефекту Ранка у системах низькотемпературної сепарації; чисельне моделювання процесів (у т.ч. розробки родовищ).

НОВИНИ

Введено в експлуатацію завод із виробництва синтетичного газу в Китаї

У китайській провінції Ненан компанії SinoCoking Coal & Coke Chemical Industries Inc. увели в експлуатацію завод із виробництва синтетичного газу з вугілля. Завод може виробляти 25 тис. м³ штучного газу на годину. Розглядається питання щодо подвоєння потужності цього заводу.

Крім того, компанія SinoCoking у співдружності з науково-дослідними інститутами в тій же провінції веде будівництво цілого комплексу з підземної газифікації вугілля потужністю 60 тис. м³ синтетичного газу на годину. Пуск комплексу заплановано на березень 2015 р. Він є частиною проекту, яким передбачено виробництво 880 м³ синтетичного газу на добу на чотирьох шахтах, що належать компанії.

За <http://www.ogj.com/articles/2014/10/sinocoking-starts-syngas-plant-in-china>

Новий проект із вивчення газогідратів

Департамент енергетики США відповідно до прийнятого у 2000 р. Акту з вивчення і розробки покладів гідратів метану започаткував новий 4-річний проект із поглибленого вивчення покладів газогідратів. Новий проект має на меті оцінку наявності та розповсюдження морських газогідратів, а також обґрунтування технологій видобутку газу. Дослідження передбачають програму буріння з відбиранням керна та проведення відповідних каротажів. Вони дають змогу визначити місця концентрації, фізичні властивості, літологію і термодинамічний стан колекторів газогідратів. Попередні дослідження підтвердили наявність високоякісних газогідратних скупчень на таких ділянках Мексиканської затоки, як Green Canyon і Walker Ridge. Поглиблене дослідження необхідне для обґрунтування ресурсів і точнішої оцінки потенціалу видобутку газу з метанових гідратів.

<http://www.ogj.com/articles/2014/10/doe-launches-marine-gas-hydrate-project>