

622.279.8 : 665.622-974 (043)

Р-97

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ПОЛТАВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА**

**ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ**

ГУТАК АНАТОЛІЙ ДМИТРОВИЧ



УДК 66.045.7

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИКОРИСТАННЯ ВИХРОВИХ ТРУБ
ПРИ ПІДГОТОВЛЯННІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ**

05.15.06 – Розробка нафтових та газових родовищ

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2018

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу та Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Кондрат Олександр Романович,
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу,
завідувач кафедри видобування нафти і газу

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Акульшин Олександр Олексійович,
ПАТ «Український нафтогазовий інститут», м. Київ,
заступник голови правління з наукової роботи

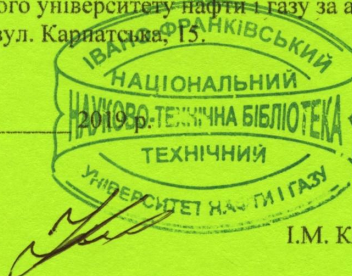
доктор технічних наук, професор
Фик Ілля Михайлович,
національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків,
завідувач кафедри видобування нафти, газу та
конденсату

Захист відбудеться «28» лютого 2019 р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.02 при Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Автореферат розісланий « _____ » _____ 2019 р.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 20.052.02
кандидат технічних наук, доцент



І.М. Ковбасюк



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Природний газ, який видобувається з родовищ природних вуглеводнів, містить водяну пару, різну кількість важких вуглеводнів, механічні домішки та неуглеводневі компоненти. Для забезпечення заданої якості товарного газу, згідно з вимогами Кодексу газотранспортної системи, здійснюється підготовляння свердловинної продукції на промислових установках з використанням методів низькотемпературної сепарації, абсорбції, адсорбції.

Одним із визначальних параметрів процесів низькотемпературної сепарації за допомогою дроселювання є вільний перепад тиску. На початковому етапі розробки газових та газоконденсатних родовищ тиск на вході в установку підготовляння газу значно перевищує тиск, необхідний для подачі газу в магістральний трубопровід. Надлишкового тиску газу достатньо для отримання низьких температур, необхідних для конденсації з газу води і важких вуглеводнів. У процесі виснаження родовища тиск на усті свердловин знижується, а наявний перепад тиску на дросельному пристрої зменшується до 0,5 – 2,5 МПа. Такі досить низькі значення цього параметру практично виключають можливість використання типової схеми низькотемпературної сепарації з дросель-ефектом.

На сьогодні розроблено та реалізовано на практиці широкий спектр інших технологій, які забезпечують необхідну якість підготовляння природного газу (абсорбція, адсорбція, низькотемпературна конденсація за допомогою холодильних машин та інші). Однак ці процеси технологічно складні, потребують значних енергетичних та матеріальних витрат, і тому переважно реалізуються на великих газопереробних заводах. Використання інших методів і пристроїв (турбодетандерів, хвильових детандерів, пульсаційних осушувачів, холодильних машин) потребує великих енергетичних та матеріальних витрат, додаткового обслуговуючого персоналу. Їх застосування на звичайних установках підготовляння газу економічно та технічно недоцільне.

Окрему увагу слід звернути на установки підготовляння газу, у складі яких є автоматичні газорозподільні станції (АГРС). До потенційних недоліків таких установок, крім неефективності дроселювання, також слід віднести необхідність витрачання значної кількості енергоресурсів (спалювання газу, витрата електроенергії) для підігрівання потоку газу, що виходить з АГРС до побутових споживачів.

Тому виникає потреба у пошуку альтернативних технологій, які б забезпечували необхідну якість підготовляння природного газу до транспортування з максимальною ефективністю та мінімальними витратами енергоресурсів.

До перспективних методів промислового підготовляння природного газу з використанням його власної енергії відноситься використання в системі підготовляння газу вихрових труб. Тому актуальним є поглиблене дослідження та удосконалення технології використання вихрових труб при промисловому підготовлянні природного газу.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є продовження періоду ефективного підготовляння вуглеводневого газу методом низькотемпературної

сепарації з використанням вихрової труби та зменшення витрати енергоресурсів на установках підготовки газу при його подачі на АГРС.

Основні задачі досліджень:

1. Аналіз вітчизняних та закордонних технологій підготовки природного газу до транспортування;
2. Розроблення математичної моделі процесів, що проходять у вихровій трубі з природним газом, та встановлення її адекватності шляхом порівняння з результатами дослідно-промислової експлуатації;
3. Розроблення конструкції вихрової труби для використання на установках підготовки газу, на основі створеної математичної моделі;
4. Дослідження термодинамічних характеристик дослідного зразку вихрової труби в промислових умовах на установках низькотемпературної сепарації газу;
5. Розроблення методики розрахунку геометричних розмірів та термодинамічних параметрів вихрової труби для роботи в умовах установки підготовки газу;
6. Розроблення нових технологічних схем підготовки газу, які б ефективно використовували холодний та гарячий потоки вихрової труби для підвищення якості підготовки газу та економії енергоресурсів.

Об'єктом досліджень є процес низькотемпературної сепарації газу з використанням вихрової труби, в якій реалізується ефект Ранка.

Предметом досліджень є технології низькотемпературної сепарації газу.

Методи дослідження. Поставлені задачі виконувались шляхом проведення промислових досліджень на вихровій трубі та чисельних експериментів з використанням сучасних ліцензованих комп'ютерних програм, а саме ANSYS CFX, AspenTech HYSYS, Autodesk Inventor. Для вимірювання значень досліджуваних параметрів використовувались повірені манометри, електронні, ртутні та спиртові термометри і витратомірний комплекс ФЛОУТЕК-ТМ. Результати промислових досліджень обґрунтовані з використанням статистичних методів оброблення та аналізу отриманих даних.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. З використанням розробленої математичної моделі вперше встановлено умови виникнення режиму ежектування та його вплив на термодинамічну ефективність застосування двопотокової вихрової труби. Отримано закономірності зміни основних термодинамічних параметрів залежно від вхідної температури, перепаду вхідного і вихідного тисків, масової частки гарячого потоку та геометричних розмірів двопотокової вихрової труби, характерних для роботи на установці низькотемпературної сепарації газу.

2. Вперше отримано залежності масової частки гарячого потоку від відношення вхідного та вихідного тисків, діаметра діафрагми та розмірів кільцевого отвору на виході гарячого потоку. Отримані залежності придатні для використання як при вихровому режимі течії, так і при режимі ежектування під час роботи на установці низькотемпературної сепарації газу.

3. Вперше отримано залежність ефекту нагрівання газу від температури вхідного потоку газу та масової частки гарячого потоку, за допомогою якої можна визначити

досяжні ефекти нагрівання та охолодження газу за заданого положення конусного регулятора на виході гарячого потоку в умовах роботи на установці низькотемпературної сепарації газу.

Практичне значення одержаних результатів. За результатами проведених автором теоретичних і промислових досліджень:

- запропоновано методику розрахунку вихрової труби на основі отриманих залежностей, за допомогою якої можна розрахувати досяжні термодинамічні параметри вихрової труби за відомих геометричних розмірів. Розроблена методика дозволяє розв'язати обернену задачу з розрахунку геометричних розмірів вихрової труби для отримання заданих термодинамічних показників;

- розроблено ряд конструкцій вихрових труб для експлуатації в промислових системах підготовки природного газу;

- розроблено нові технологічні схеми установок низькотемпературної сепарації газу з використанням вихрової труби, які дозволяють додатково знизити температуру сепарації газу порівняно з використанням дроселювання;

- розроблено технологічні схеми установок низькотемпературної сепарації з подачею газу на автоматичну газорозподільну станцію (АГРС) з використанням вихрової труби, які дозволяють заощаджувати електроенергію та паливний газ на АГРС шляхом використання теплого потоку газу з вихрової труби.

Результати проведених автором досліджень, наукові розробки та сконструйоване обладнання були випробувані в ТОВ «Праймгаз» та ПрАТ «Природні ресурси». За період експлуатації вихрової труби температура сепарації на одній з технологічних ліній тимчасової вимірної-сепараційної установки Луценківського газоконденсатного родовища була знижена на 17 – 20% порівняно з використанням дроселювання за аналогічних умов експлуатації.

Результати наукових досліджень використовуються в навчальному процесі на кафедрі розробки та експлуатації нафтових і газових родовищ Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу при викладанні дисциплін «Збір і підготовка газопромислової продукції» та «Проектування систем збору і підготовки газопромислової продукції», а також при курсовому проектуванні і виконанні студентами магістерських робіт. Результати наукових досліджень також використовуються на кафедрі видобування нафти і газу та геотехніки Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка при викладанні дисципліни «Збір і підготовка нафти й газу».

Особистий внесок здобувача. Автором проаналізовано результати промислових досліджень, обґрунтовано необхідність врахування впливу дросель-ефекту на процеси, що проходять у вихровій трубі при роботі в складі УНТС [1]. Розроблено удосконалену схему УНТС з вихровою трубою із подаванням газу на АГРС. Виконано розрахунки матеріально-теплого балансу. Обґрунтовано переваги запропонованої схеми підготовки газу [2]. Розроблено чисельну модель промислової вихрової труби, яка працює в умовах УНТС. Проведено порівняння результатів промислових та чисельних досліджень [4]. Розроблено чисельну модель лабораторної вихрової труби, яка працює за низьких тисків. Порівняно результати лабораторних та чисельних досліджень. Проведено порівняння її ефективності при

роботі на метані та повітрі [5]. Розроблено конструкцію вихрової труби для роботи в системах підготовки природного газу [8] і схему технологічної установки для підготовки природного газу з використанням вихрової труби [9]. Показано підвищену ефективність використання вихрової труби у складі УНГС порівняно з використанням дроселя [6]. Обґрунтовано можливість розробки удосконаленої технології підготовки природного газу з використанням вихрової труби [7]. Розроблено удосконалену методику розрахунку вихрових труб для підготовки природного газу [3].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідались на Міжнародній науково-технічній конференції «Інноваційні технології буріння свердловин, видобування нафти і газу та підготовки фахівців нафтогазової галузі» (3 – 6 жовтня 2012 р., м. Івано-Франківськ, ІФНТУНГ); Міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика – 2013» (7 – 11 жовтня 2013 р., м. Івано-Франківськ, ІФНТУНГ);

Публікації. Результати проведених автором досліджень представлені у 9 публікаціях, з яких 5 у фахових наукових журналах (в т. ч. 1 стаття у журналі, що індексується у базі даних Scopus), 2 у збірниках праць міжнародних науково-технічних конференцій, отримано 2 патенти України на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 54 рисунки та 6 таблиць. Список використаної літератури вміщує 128 найменувань. Викладена на 133 сторінках машинописного тексту.

Автор висловлює щире подяку доктору технічних наук, професору О.Р.Кондрату, доктору технічних наук, професору Р.М. Кондрату, доктору технічних наук, професору М.І. Зоценку за наукові консультації; заст. ген. директора з видобутку ПрАТ «Природні ресурси» Є.В. Давіденку, головному інженеру ТОВ«НВН Техногаз» Т.М. Подоляку, начальнику Машівського ЦВНГІК ГПУ«Полтавагазвидобування» Т.П. Городецькому, директору ТОВ «Праймгаз» С.В.Гальченку за сприяння у проведенні дослідно-промислових випробувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, висвітлено мету роботи, основні задачі та методи досліджень, вказано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі наведено огляд існуючих способів підготовки природного газу до транспортування, проаналізували їх переваги та недоліки. Розглянуто та проаналізовано відомі результати теоретичних та експериментальних досліджень ефекту Ранка, що виникає у вихрових трубах.

Питанням дослідження термодинамічних характеристик вихрової труби та впливу геометричних розмірів на її роботу присвячено дослідження таких авторів, як G.J. Ranque, R. Hilsch, Scheper, Hartnett та Eckert, Scheller та Brown, Curley, McGree, Kalvinskas, Dobratz, Nash, Westley, Linderstrom-Lang, Marshall, Takahama H., Kawamura H., Kato S., Yokosawa H., Stephan K., Lin S., Durst M., Huang F., Seher D., Ahlborn та Groves, Piralishvili та Поляєв, Promvonge та Eiamsa-ard, Saidi та Valipour,

Kirmaci, Aydin та Baki, Wu, Burak Markal, Gao C.M., Bosschaart K.J., Zeegers J.C.H., de Waele A.T.A.M., Liu J.Y., Gong M.Q., Wu J.F., Cao Y., Luo E.C., Xue Y., Dincer K., Avcı A., Baskaya S., Berber A., Uysal B.Z., Ucgul I., Nimbalkar S.U., Muller M.R., Rattanongphisat, Chang, Devade та Pise, Agrawal, Han, Polat, Рябов А.П., Гусев А.П., Жидков М.А., Жидков Д.А., M.Lorey, K. Thomas, Mohammadi S., Farhadi F., Schlenz, Amitani, Борисов, Cockerill, Frohlingsdorf W., Unger H., Aljuwayhel N.F., Nellis G.F., Klein S.A., Jacob S., Behera U., Paul P.J., Kasthuriengan S., Karunanithi R., Ram S.N., Dinesh K., Skye H.M., Farouk T., Farouk B., Secchiaroli A., Ricci R., Montelpare S., D'Alessandro V., Baghdad M., Ouadha A., Imine O., Addad Y., Dutta T., Sinhamahapatra K.P., Bandyopdhyay S.S., Pourmahmoud N., Hassanzadeh A., Moutaby A., Bramo A., Pouraria H., Zangoee M.R., Khazaei H., Teymourtash A.R., Malek-Jafarian M., А.Ф. Гуцол, Базлов М.Н., Жуков А.И., Алексеев Т.С., Бетлинский В.Ю., Овчинников В.П., Черниш Н.К.

Серед розглянутих у першому розділі технологій підготовки природного газу найбільш широко застосовується низькотемпературна сепарація з використанням ефекту Джоуля-Томсона. Втім вона не є найбільш ефективною. Найнижчу температуру сепарації дозволяє отримати низькотемпературна технологія із застосуванням детандування, а також використання установок штучного холоду. Впровадження систем низькотемпературної сепарації з використанням турбодетандерів, установок штучного холоду, введення компресорних станцій пов'язане зі значними капітальними вкладеннями та експлуатаційними витратами, а також потребує додаткового обслуговуючого персоналу. Абсорбційна, адсорбційна та мембранна технології мають обмежене використання через складність процесів та значні технологічні обмеження щодо їх використання. Холодотворна здатність новітніх технологій Twister та 3-S, не дивлячись на задекларовану ефективність, не перевищує холодотворну здатність процесу дроселювання газу.

До перспективних методів промислового підготовки природного газу з використанням його власної енергії відноситься використання в системі підготовки газу вихрових труб.

При вивченні технічної та наукової літератури було виявлено, що досліджувані іншими авторами вихрові труби не призначались для використання у нафтогазовій промисловості. Тому переважна більшість опублікованих експериментів та досліджень проводилась в умовах, що принципово відрізняються від тих, які мають місце на установках підготовки природного газу. Майже відсутні дані про експлуатацію вихрових труб за високих вхідних та вихідних тисків (порядку 2 – 10 МПа), великих витратах газу (десятки тисяч кубічних метрів за добу), малих коефіцієнтах розширення газу. Мало досліджений вплив різної робочої суміші вуглеводнів, пластової води, метанолу та інших органічних і неорганічних компонентів на роботу вихрової труби. Також у промислових умовах підготовки газу тиск на виходах з вихрової труби не менший, ніж тиск у магістральному газопроводі, а у відомих дослідженнях робочий газ (повітря, азот, гелій) випускався в атмосферу.

Тому актуальним є поглиблене дослідження та удосконалення технології використання вихрових труб при промисловому підготовлянні природного газу.

У другому розділі наведено результати теоретичних досліджень процесів, що проходять у вихровій трубі.

Запропонована у цій роботі система складається з наступних рівнянь: закон збереження маси, закон збереження імпульсу, закон збереження енергії та рівняння стану реального газу Пенга-Робінсона. Для моделювання турбулентності була використана LES (Large Eddy Simulation) модель.

У процесі проведення чисельних досліджень були виявлені умови, за яких має місце явище ежектування, тобто рух газу всередину вихрової труби через діафрагму на виході холодного потоку з вихрової труби з подальшим змішуванням із загальним потоком та виходом через конусний регулятор. Беручи до уваги це явище, всі результати розв'язання математичної моделі оброблялись та аналізувались відносно частки гарячого потоку μ_h , а не частки холодного потоку μ_c , як було прийнято раніше іншими дослідниками. Частка гарячого потоку має завжди додатні значення μ_h , що більш прийнятно з фізичної точки зору. Для врахування положення конусного регулятора у цій роботі був введений такий параметр, як відношення площі кільцевого отвору на виході гарячого потоку та площі отвору діафрагми F_h/F_c .

Характер розподілу потоків всередині вихрової труби можна зрозуміти виходячи з побудованих графічних залежностей, наприклад, при тиску на виході холодного потоку $P_c = 3,7$ МПа (рис. 1).

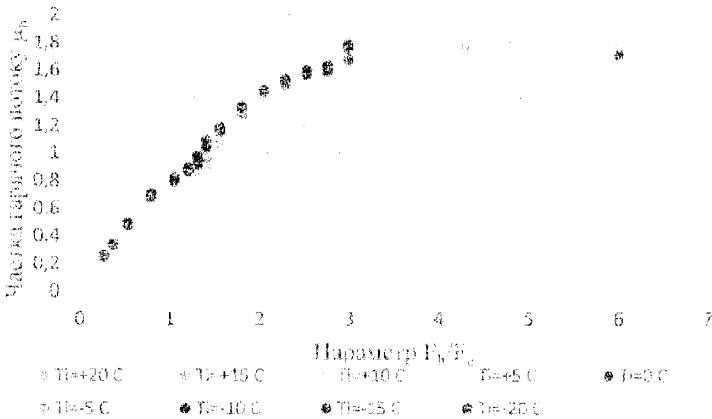


Рисунок 1 – Залежність частки гарячого потоку від безрозмірного параметра F_h/F_c при $P_c = 3,7$ МПа для різних значень вхідної температури T_1

На графіку видно, що характер кривих змінюється в інтервалі $\mu_h = 0,9 - 1,1$. Тобто, цілком логічно їх можна розділити на дві частини: для $\mu_h < 1$ та $\mu_h > 1$.

З фізичної точки зору такий розподіл можна пояснити тим, що при $\mu_h = 1$ відбувається перебудова потоку та зміна напрямку холодної течії, виникає режим ежектування.

При розрахунку запропонованої математичної моделі встановлено, що виникнення режиму ежекування газу залежить від безрозмірного параметру F_h/F_c , а також від відношення вхідного і вихідного тисків π . Значення температури вхідного потоку T_i має мінімальний вплив на характер цієї залежності. Це видно з незначної розбіжності точок однакового кольору для кожного значення F_h/F_c у дослідженому діапазоні вхідних температур. Тому в подальшому аналізі впливом вхідної температури T_i нехтуємо. Із результатів розв'язку запропонованої математичної моделі отримано емпіричні залежності, що пов'язують між собою масову частку гарячого потоку μ_h , площу отвору діафрагми F_c , площу кільцевого отвору на виході гарячого потоку F_h та відношення вхідного і вихідного тисків π .

Для режиму з $\mu_h < 1$ залежність має вигляд:

$$\mu_h = \arctg \left((1,629 - 0,2941\pi) \frac{F_h}{F_c} \right), \quad (1)$$

де F_h – площа кільцевого отвору на виході гарячого потоку,

F_c – площа отвору діафрагми,

π – відношення абсолютного тиску на вході у вихрову трубу і абсолютного тиску холодного потоку на виході з вихрової труби.

Для режиму з $\mu_h > 1$ залежність має вигляд:

$$\mu_h = \frac{1,4572 - 1,7145\pi}{F_h/F_c} + B \ln \left(\frac{F_h}{F_c} \right) + 0,4625 + 1,0565\pi, \quad (2)$$

$$B = 0,9272 - 0,5757\pi. \quad (3)$$

Модель вихрової труби досліджувалась в умовах установки низькотемпературної сепарації газу. Відповідно, були використані високі вхідні та вихідні тиски робочого газу, порядку 8,8 – 3,2 МПа. В таких умовах природний газ має значні відхилення своїх властивостей від ідеального газу. Крім того, неможливо знехтувати зниженням його температури за рахунок дроселювання. Тому, для аналізу самого ефекту Ранка в цій роботі були введені наступні поняття:

$$1) \text{ ефект нагрівання внаслідок дії ефекту Ранка: } \Delta T_h^* = \Delta T_h + \Delta T_{JT}; \quad (6)$$

$$2) \text{ ефект охолодження внаслідок дії ефекту Ранка: } \Delta T_c^* = \Delta T_c - \Delta T_{JT}. \quad (7)$$

Як основний критерій для аналізу в цій роботі був обраний ефект нагрівання ΔT_h^* , оскільки він має більш виражену залежність від температури вхідного потоку T_i та частки гарячого потоку μ_h в діапазоні $\mu_h = 0 - 1,0$, що значно полегшує інтерпретацію та обробку результатів чисельних досліджень. Ефект охолодження тоді можна визначити з відомого рівняння теплового балансу вихрової труби

$$\mu_h \Delta T_h^* = (1 - \mu_h) \Delta T_c^* \quad \text{при } \mu_h < 1. \quad (8)$$

Згідно з результатами досліджень (рис. 2), значення ΔT_h^* мають чітко виражену залежність від температури вхідного потоку T_i та частки гарячого потоку μ_h . Більший ефект нагрівання має місце при додатних температурах вхідного потоку та пропорційно зменшується при її зниженні. Частка гарячого потоку μ_h також більше впливає на ефект нагрівання за додатних значень вхідної температури. Відношення тисків π у дослідженому діапазоні має незначний вплив на ефект нагрівання.

У результаті статистичного оброблення даних отримано емпіричні залежності, що пов'язують між собою масову частку гарячого потоку μ_h , температуру флюїду на вході T_i , температуру холодного T_c та гарячого T_h потоків.

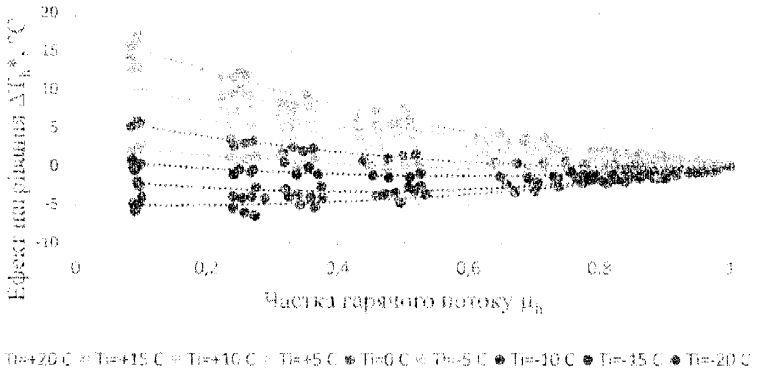


Рисунок 2 – Графік залежності ефекту нагрівання ΔT_h^* від частки гарячого потоку для різних значень вхідної температури T_i та відношення тисків π

Для режиму з $\mu_h < 1$ залежність має вигляд:

$$\Delta T_h^* = a\mu_h^2 + b\mu_h + c, \quad (9)$$

$$a = 0,1101T_i + 8,7056, \quad (10)$$

$$b = -0,6639T_i - 15,104, \quad (11)$$

$$c = 0,5647T_i + 6,418. \quad (12)$$

Для визначення ефекту нагрівання при $\mu_h > 1$, тобто на режимі ежектування, слід використовувати наведене вище рівняння (8) теплового балансу, яке набуде наступного вигляду:

$$\Delta T_h^* = \frac{(1 - \mu_h)}{\mu_h} (T_i - T_c - \Delta T_{TT}), \quad (13)$$

де T_c – температура газу, що надходить ззовні у вихрову трубу через діафрагму.

За результатами порівняння отриманих даних з відомими експериментальними даними інших дослідників максимальне відхилення експериментальних точок від розрахункових складало приблизно 10%.

У третьому розділі подаються результати промислових досліджень розробленого та запатентованого зразка вихрової труби. Основні розміри вихрового апарату та його елементів аналогічні прийнятим у чисельній моделі.

При плануванні досліджень було передбачено проведення двофакторного експерименту. Відношення тисків π та частка гарячого потоку μ_h виступали контрольованими факторами. У зв'язку з відсутністю можливості тривалого проведення експериментів, вони були проведені з двома репліками.

Дослідження проводились на двох промислових установках комплексної підготовки газу, принципова схема яких зображена на рис. 3.

При проведенні експериментів проводились заміри таких параметрів потоку: температура та тиск вхідного потоку, температура та тиск вихідних потоків, витрата газу. У процесі промислових випробувань вихрового апарату було проведено дві серії дослідів. Перша та друга серії дослідів відрізнялись місцем проведення експерименту, а відповідно і складом робочого газу, вмістом рідини у потоці та температурним режимом роботи свердловини.

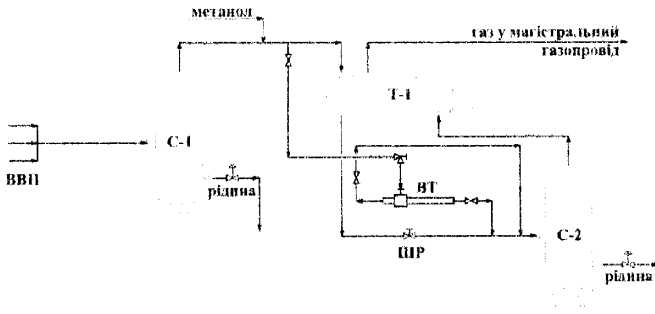


Рисунок 3 – Принципова схема підключення вихрової труби на установках комплексної підготовки газу при проведенні досліджень

Значення величини вхідного тиску P_i задавалось згідно з розробленим планом проведення факторного експерименту. Тиск на холодному P_c та гарячому P_h виходах вихрового апарату повністю задавався режимом магістрального газопроводу. Температура вхідного потоку T_i визначалась температурним режимом роботи свердловини без можливості її ручного регулювання.

Кут повороту конусного регулятора також змінювався згідно з планом проведення факторного експерименту, забезпечуючи цим зміну частки гарячого потоку μ_h .

При проведенні промислових досліджень, як і в математичній моделі, спостерігалось явище ежктування, яке виникало при відкритті конусного регулятора на гарячому виході на 1,5 оберти і більше, що відповідає результатам чисельного моделювання. Внаслідок надмірного відкриття регулятора, в приосьовій зоні вихрової труби виникала область пониженого тиску (нижче тиску в сепараторі другого ступеня С-2), що спонукало газ з більшим тиском рухатись всередину вихрової труби.

Криві залежностей ефекту охолодження ΔT_c^* та ефекту нагрівання ΔT_h^* від частки гарячого потоку μ_h , отримані експериментальним шляхом (у першій серії дослідів) та результати розв'язку математичної моделі зображені рис. 4, 5.

Максимальний ефект охолодження у першій серії дослідів на вихровій трубці склав $\Delta T_c = 17,7^\circ\text{C}$, що у порівнянні з ефектом дроселювання $\Delta T_{\text{др}} = 16^\circ\text{C}$ більше на 10% або на $1,7^\circ\text{C}$. Максимальна різниця температур між виходом гарячого потоку та

виходом на вихровій трубіці складала $\Delta T_h = -7,5$ °С, а ефект нагрівання з урахуванням дроселювання $\Delta T_h^* \approx 8,6$ °С.

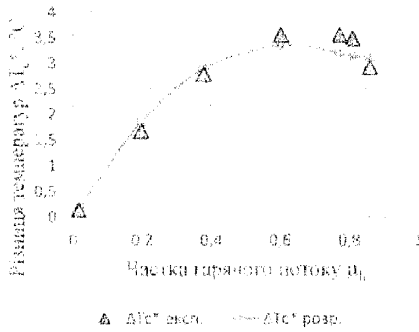


Рисунок 4 – Графік залежності різниці температури ΔT_c^* від частки гарячого потоку

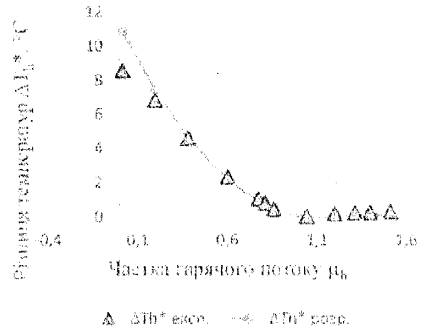


Рисунок 5 – Графік залежності різниці температури ΔT_h^* від частки гарячого потоку

Експериментальні точки майже на всьому діапазоні значень μ_h відповідають розрахунковим даним. Деяка розбіжність спостерігається для зниження температури холодного потоку при $\mu_h = 0,7 - 1,0$. Це можна пояснити початком перебудови потоку з вихрового режиму течії на режим ежектування. У цей період режим течії нестабільний, відбувається зміна структури потоку та його напрямку руху, що без сумніву впливає на точність вимірювань.

Також бачимо незначну розбіжність для ефекту нагрівання гарячого потоку при $\mu_h = 0 - 0,3$. Причиною цього може бути скупчення рідини (конденсату, води, метанолу) у вихровій трубі внаслідок дуже малого відкриття конусного регулятора. Це призводить до порушення структури потоку та зниження ефективності роботи вихрової труби.

Отже, результати першої серії промислових досліджень підтверджуються результатами розв'язку математичної моделі.

Друга серія промислових експериментів була проведена на іншій установці комплексної підготовки газу. Схема підключення була аналогічна попередній, як зображено на рис. 3. Вихрову трубу було випробувано на вхідних тисках $P_1 = 6,2; 7,8; 8,8$ МПа та тисках на другій ступені сепарації $P_2 = 4,2; 4,7$ МПа.

За результатами досліджень, величина зниження температури ΔT_c залежить від відношення тисків λ . Із збільшенням цього відношення від 1,465 до 1,854 ефект охолодження збільшується в середньому на 13 °С.

Для порівняння холодотворної та теплотворної здатності вихрової труби для різних режимів були побудовані графіки залежності параметру $(1-\mu_h)\Delta T_c$ та $\mu_h\Delta T_h$ від частки гарячого потоку μ_h , які представлені на рис. 6. Форма кривих на рис. 6 повністю відрізняється від відомих характеристик, отриманих для повітря та природного газу за малих тисків (0,3 – 0,7 МПа), де максимум спостерігається у точці

$\mu = 0.6$. Графіки залежностей на рис. 6 не відображують холодотворну та теплотворну здатності вихрової труби, оскільки містять в собі також залежність від ефекту Джоуля-Томсона за високих рівнів тиску. Тому для отримання більш правильних характеристик, залежності параметра $\mu_h \Delta T_h$ від частки гарячого потоку для всіх розглянутих значень π необхідно розглядати з урахуванням впливу ефекту дроселювання наступним чином:

$$\mu_h \Delta T_h^* = \mu_h (T_h - T_i + \Delta T_{JT}) \quad (14)$$

та будувати у координатах $\mu_h \Delta T_h^* = f(\mu_h)$.

У результаті перерахунку було отримано залежності, зображені на рис. 7.

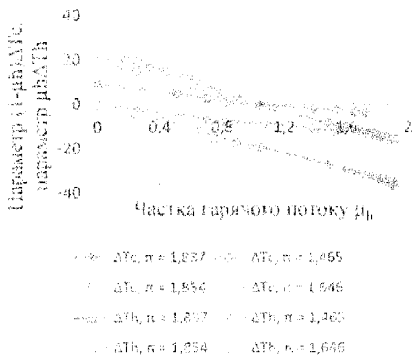


Рисунок 6 – Залежність параметра $(1-\mu_h)\Delta T_c$ та $\mu_h \Delta T_h$ від частки гарячого потоку μ_h за різних значень π

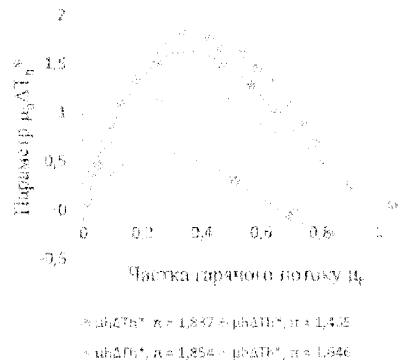


Рисунок 7 – Графік залежностей параметра $\mu_h \Delta T_h^*$ від частки гарячого потоку для різних значень π

Отже, необхідність розрахунку теплового балансу вихрової труби за модифікованою формулою (14) підтверджується.

Для визначення адекватності запропонованої математичної моделі та аналітичних рівнянь, на рис. 8, 9 наведено результати порівняння ефектів охолодження ΔT_c^* та нагрівання ΔT_h^* із математичної моделі (із врахуванням ΔT_{JT}) та промислових даних для дослідженого діапазону значень π .

Результати розрахунку математичної моделі вихрової труби відповідають отриманим промисловим даним, за виключенням крайніх точок цих характеристик, де холодний та гарячий потоки дуже нестабільні. Розроблена у цій роботі математична модель децю завижує значення ΔT_h^* при $\mu_h < 0,1$ та завищує значення ΔT_c^* при $\mu_h > 0,8$. Максимальне відхилення експериментальних значень ΔT_h^* від розрахункових складає 14,2% при $\pi = 1,854$ та $\mu_h = 0,03$, а максимальне відхилення експериментальних значень ΔT_c^* від розрахункових складає 26,8% при $\pi = 1,854$ та $\mu_h = 0,89$. При цьому 87% усіх точок знаходяться в межах 5%-го відхилення від розрахункових даних.

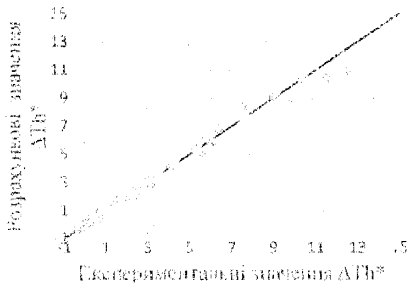


Рисунок 8 – Порівняльна характеристика експериментальних та розрахункових значень ефекту нагрівання ΔT_h^* для різних значень π

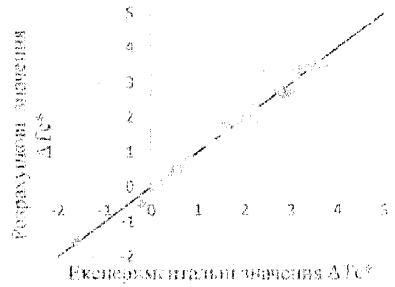


Рисунок 9 – Порівняння експериментальних та розрахункових значень ефекту охолодження ΔT_c^* для різних значень π

Отже, запропонована математична модель вихрової труби придатна для опису ефекту Ранка та режиму ежектування. Ця модель враховує ефект дроселювання на вхідних соплах та на конусному регуляторі та дозволяє розрахувати реально досяжні температури холодного та гарячого потоків для дослідженого діапазону параметрів експлуатації вихрової труби. Крім того, за допомогою створеної математичної моделі можна визначити параметри роботи вихрової труби на режимі ежектування. Дуже важливо, що в цій моделі відсутні фіксовані геометричні розміри вихрової труби та інші припущення, що дозволяє проводити розрахунки для різних положень конусного регулятора. Результати розрахунку математичної моделі підтверджуються даними промислових досліджень.

Для можливості оцінки величини зниження температури холодного потоку ΔT_c на режимах, які не були відпрацьовані, була побудована модель регресії третього порядку. Її рівняння має наступну форму

$$\begin{aligned} \Delta T_c = & -12494,767 - 88,917\mu_h + 22687,002\pi + 99,448\mu_h\pi + 14,394\mu_h^2 \\ & - 13670,983\pi^2 - 2,981\mu_h^2\pi - 26,161\mu_h\pi^2 - 16,204\mu_h^3 \\ & + 2737,872\pi^3. \end{aligned} \quad (15)$$

Отримана регресійна модель може бути використана в діапазоні відношень вхідного і вихідного тисків $\pi = 1,465 - 1,854$ для діапазону вхідних температур газу $T_c = -2 \dots +9$ °C та часток гарячого потоку $\mu_h = 0 - 1,0$. Адекватність регресійної моделі на більш широкому діапазоні цих параметрів необхідно підтверджувати шляхом проведення додаткових експериментальних досліджень.

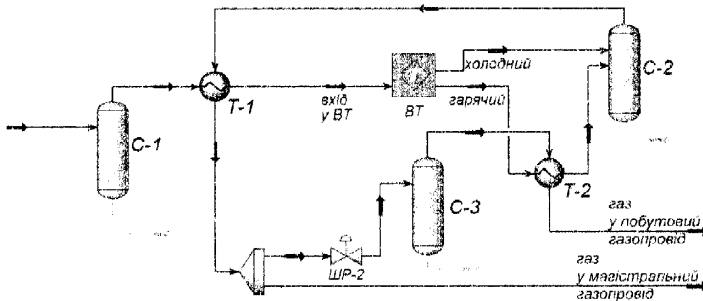
У четвертому розділі представлена методика для розрахунку геометричних параметрів (діаметра сопла/сопел, діафрагми та розмірів конусного регулятора), а також часток потоків для отримання необхідних ефектів нагрівання і охолодження газу за відомого відношення тисків, яка була розроблена на основі запропонованих емпіричних залежностей.

Розроблено та запатентовано технологічні схеми підготовки газу з використанням вихрової труби. Не дивлячись на те, що вихрова труба може бути використана у технології низькотемпературної сепарації, рекомендується її застосування на установках, до складу яких входить АГРС. Ця рекомендація пов'язана з тим, що достатньо ефективно вихрова труба починає працювати при відношенні тисків $\pi > 2,0$, у той час як відношення тисків на установці НТС рідко перевищує $\pi = 2,0$, особливо на завершальній стадії розробки родовищ. На АГРС, як правило, маємо відношення тисків $\pi > 3,0$, що дозволяє ефективно використати вихрову трубу для підготовки природного газу.

До розроблених технологічних схем відносяться:

- Схема підготовки газу з використанням вихрової труби для нагрівання газу, що виходить з АГРС (рис. 10)
- Схема підготовки газу з використанням вихрової труби для охолодження вхідного потоку газу на НТС (рис. 11)
- Схема підготовки нежирного газу з використанням вихрової труби при подачі газу у побутовий газопровід (рис. 12)

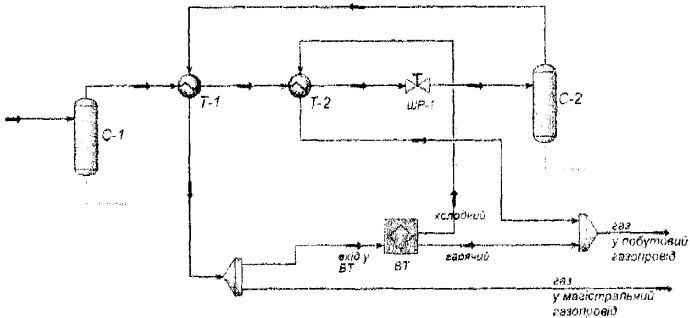
Основною задачею вихрової труби в схемі на рис. 10 є нагрівання газу, що подається у побутовий газопровід, гарячим потоком з вихрової труби. При цьому значно скорочується витрата паливного газу для нагрівання теплоносія та електроенергії для здійснення його циркуляції у системі.



С-1 – сепаратор першого ступеня, Т-1 – теплообмінник; ВТ – вихрова труба, ШР-2 – штуцер, С-2 – сепаратор другого ступеня, С-3 – сепаратор третього ступеня, Т-2 – підігрівач газу на АГРС

Рисунок 10 – Схема підготовки газу з використанням вихрової труби для нагрівання газу, що виходить з АГРС

Іншою модифікацією системи низькотемпературної сепарації газу може бути схема, розроблена для отримання більш низьких температур (рис. 11). Представлена технологія дозволяє отримати нижчі температури сепарації, ніж з використанням дросель-ефекту. Особливо це помітно при низьких тисках на вході в установку, коли дроселювання не дає значного ефекту. Температура газу, що подається у побутовий газопровід, також забезпечується на необхідному рівні, тобто вище 0 °С.

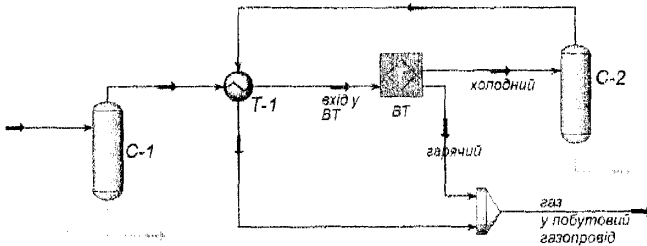


С-1 – сепаратор першого ступеня, Т-1, Т-2 – теплообмінники; ШР-1 – штуцер, ВТ – вихрова труба, С-2 – сепаратор другого ступеня

Рисунок 11 – Схема підготовки газу з використанням вихрової труби для охолодження вхідного потоку газу на НТС

Технічним результатом впровадження запропонованих схем є отримання більш низької температури холодного потоку, ніж зі звичайним дросельним пристроєм, і в той же час отримання гарячого потоку, який можна використати для підігрівання газу, що подається у вихідний побутовий колектор, який зазвичай підігрівався гарячим теплоносієм або за допомогою підігрівача. Також має місце зменшення енерговитрат і експлуатаційних витрат в порівнянні з прив'язкою турбодетандера і підігрівача газу та покращення якості підготовки природного газу з більш тривалим терміном розробки родовища.

На деяких родовищах природного газу з дуже малим вмістом фракцій C_{5+} установки підготовки газу запроєктовані на постачання газу тільки побутовим споживачем через АГРС чи ВРГ. У такому випадку доцільно встановлювати вихрову трубу у комбінації з регулюючим клапаном або замість нього (рис. 12).



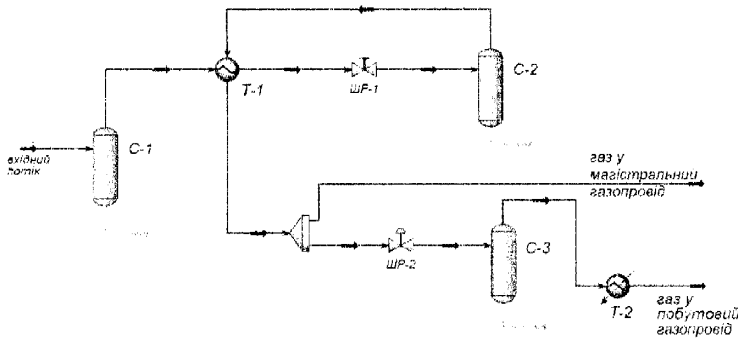
С-1 – сепаратор першого ступеня, Т-1 – теплообмінник; ВТ – вихрова труба, С-2 – сепаратор другого ступеня

Рисунок 12 – Схема підготовки нежирного газу з використанням вихрової труби при подачі газу у побутовий газопровід

Така технологія є найбільш ефективною у випадках подачі природного газу для побутових потреб, коли тиск на усті свердловин перевищує тиск у побутовому колекторі, але при цьому дроселювання є неефективним внаслідок незначного перепаду тисків. Використовуючи дану технологію, можна значно знизити температуру сепарації та продовжити термін розробки родовища, не втрачаючи при цьому якості підготовки газу.

Для аналізу ефективності розроблених технологічних схем підготовки газу для подачі у магістральні та побутові газопроводи були проведені розрахунки їх матеріально-теплого балансу. Обчислення виконувались у програмі Aspen HYSYS програмного комплексу AspenOne 9.0.

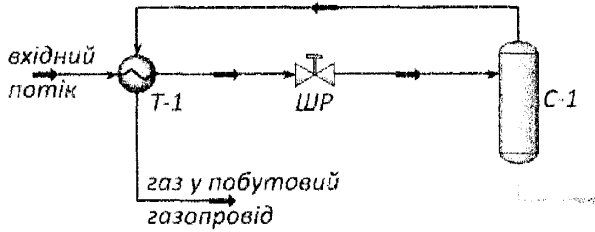
За базу порівняння для схем на рис. 10, 11 була обрана типова схема низькотемпературної сепарації з подачею підготовленого газу в магістральний газопровід та на АГРС (рис. 13).



C-1 – сепаратор першого ступеня, T-1 – теплообмінник; ШР-1, ШР-2 – штуцери, C-2 – сепаратор другого ступеня, C-3 – сепаратор третього ступеня, T-2 – підігрівач газу на АГРС

Рисунок 13 – Базова схема НТС з подачею газу на АГРС та у магістральний газопровід

За базу порівняння для схеми на рис. 12 була обрана типова схема низькотемпературної сепарації з відбиранням газу із магістрального газопроводу та його подачею побутовим споживачам (рис. 14).

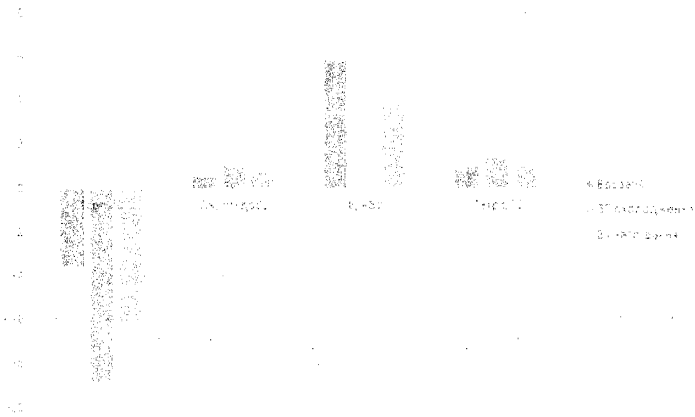


Т-1 – теплообмінник; ШР – штуцер, С-1 – сепаратор другого ступеня
Рисунок 14 – Базова схема НТС з подачею газу побутовим споживачам

Порівняння ефективності запропонованих технологій підготовки газу з базовими варіантами проводилось за наступними показниками:

1. Температура сепарації в сепараторі другого ступеня С-2;
2. Об'єм виділення конденсату з сепаратора другого ступеня С-2;
3. Витрата енергії на підігрівання газу на АГРС (в Т-2);
4. Температура газу на виході з АГРС;

Порівняльна характеристика цих показників наведена на діаграмі нижче (рис. 15)



$T_{сеп}$ – температура сепарації газу (°C), Q_k – видобуток конденсату (м³/добу), E – кількість витраченої на АГРС енергії для підігрівання газу (кВт), $T_{АГРС}$ – температура газу на виході з АГРС (°C)

Рисунок 15 – Порівняльна характеристика технологічних показників розроблених схем підготовки газу

При роботі за запропонованими технологічними схемами (рис. 10, 11) виникає можливість отримати кращі технологічні показники при заданих вхідних умовах у порівнянні з базовим варіантом (рис. 13):

- зниження температури сепарації на 5,2 та на 2,4 °С
- збільшення видобутку конденсату на 0,5 та 0,22 м³/добу
- зменшення витрати енергії для підігрівання газу на 5,866 та 2 кВт

Витрати на нагрівання газу на виході АГРС пов'язані зі спалюванням паливного газу для підігрівання теплоносія та витратою електроенергії для роботи насосів теплоносія, що здійснюють його циркуляцію в системі. Таким чином, при зменшенні або повній економії електроенергії для роботи системи підігрівання теплоносія на 5,866 кВт та 2 кВт можна заощадити близько 0,5 – 1,0 тис.м³ паливного газу та до 265кВт електроенергії за добу.

Порівнюючи технологічну схему, представлену на рис. 12 з базовим варіантом (рис. 14), бачимо наступні переваги запропонованої технології з вихровою трубою:

- зниження температури сепарації на 11 °С;
- підтримання температури газу на виході з АГРС на тому ж рівні, що і в базовому варіанті (+4 °С);
- збільшення вилучення конденсату за рахунок зниження температури сепарації у порівнянні з базовим варіантом;
- можливість регулювати температуру газу на виході з АГРС в залежності від потреб виробництва та пори року;

Отже, технологічні схеми підготовки газу, представлені на рис. 10 – 12 є більш ефективними у порівнянні з базовими варіантами (рис. 13, 14).

ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою, в якій за результатами експериментальних і теоретичних досліджень та дослідно-промислових випробувань удосконалено технології використання вихрових труб при підготовлянні природного газу. Основні результати зводяться до наступного.

1. У результаті аналізу технічної та наукової літератури була розроблена математична модель вихрової труби, у якій вперше використано кубічне рівняння стану газу Пенга-Робінсона для опису властивостей робочого агента – метану. Застосування такої моделі дозволяє врахувати реальні властивості природного газу в умовах експлуатації двопотокової вихрової труби в системі низькотемпературної сепарації газу та дослідити термодинамічні параметри вихрової труби на різних режимах її роботи.

2. З використанням математичної моделі досліджено явище ежектування у вихровій трубі, встановлено умови його виникнення та вплив на термодинамічні параметри роботи двопотокової вихрової труби. Отримано закономірності зміни основних термодинамічних параметрів залежно від вхідної температури, відношення вхідного і вихідного тисків, масової частки гарячого потоку та геометричних розмірів двопотокової вихрової труби, характерних для роботи на установці низькотемпературної сепарації газу.

сн 2757

3. Отримано залежності масової частки гарячого потоку від відношення вхідного та вихідного тисків, діаметра діафрагми та розмірів кільцевого отвору на виході гарячого потоку. Отримані залежності придатні для використання як при вихровому режимі течії, так і при режимі ежектування під час роботи на установці низькотемпературної сепарації газу.

4. Отримано залежність ефекту нагрівання газу від температури вхідного потоку газу та масової частки гарячого потоку, за допомогою якої можна визначити досяжні ефекти нагрівання та охолодження газу за заданого положення конусного регулятора на виході гарячого потоку в умовах роботи на установці низькотемпературної сепарації газу.

5. Запропоновано методику розрахунку термодинамічних показників роботи вихрових труб та методику визначення геометричних розмірів вихрових труб для досягнення заданих термодинамічних показників.

6. На основі математичної моделі сконструйовано, запатентовано та запущено в експлуатацію промисловий зразок вихрової труби, за допомогою якого проведено промислові дослідження ефекту Ранка в умовах установки низькотемпературної сепарації природного газу.

7. Розроблено та запатентовано технології використання вихрової труби в системі низькотемпературної сепарації при подачі газу у магістральний газопровід та для побутових потреб. Доведено за допомогою розрахунків матеріально-теплого балансу їх підвищену ефективність у порівнянні з типовими схемами підготовки газу. Розроблено технологічні схеми, які дозволяють заощаджувати енергоресурси, необхідні для підготовки природного газу до транспортування.

8. Результати проведених досліджень, наукові розробки та сконструйоване обладнання були випробувані в ТОВ «Праймгаз» та впроваджені в технологічний процес в ПрАТ «Природні ресурси». За період експлуатації вихрової труби на одній з технологічних ліній тимчасової вимірної-сепараційної установки ПрАТ «Природні ресурси» на Луценківському ГКР температура сепарації газу була знижена на 3-5 °С (17 – 20%) порівняно з використанням дроселювання за аналогічних умов експлуатації.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті, в яких опублікуванні основні результати дисертації

1. Gutak A.D. Experimental investigation and industrial application of Ranque-Hilsch vortex tube. *International Journal of Refrigeration*. 2015. №49. P. 93 – 98.
2. Кондрат О.Р., Гутак А.Д. Енергоефективна модифікація установки низькотемпературної сепарації газу. *Нафтогазова галузь України*. 2015. №5. С.26 – 30.
3. Кондрат О.Р., Гутак А.Д. Удосконалення методики розрахунку вихрових труб для підготовки природного газу. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2018. №2(67). С. 53-61.
4. Гутак А.Д. Використання вихрових труб для підготовки природних газів. *Нафтогазова галузь України*. 2014. №6. С. 21 – 24.

5. Gutak A.D. Numerical simulation of temperature separation in methane stream in Ranque-Hilsch vortex tube. Refrigeration Engineering and Technology. 2015. №51(3). P. 76 – 83.

Тези наукових конференцій

6. Гутак А.Д. Эффект Ранка как альтернатива дросель-эффекту. Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції «Нафтогазова енергетика - 2013». Івано-Франківськ, 2013. С. 30 -- 33.

7. Гутак А.Д. Використання вихрових труб для підготовки та переробки природних газів. Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції «Інноваційні технології буріння свердловин, видобування нафти і газу та підготовки фахівців для нафтогазової галузі». Івано-Франківськ, 2012. С. 272 – 275.

Патенти

8. Пат. 84464 Україна. Термодинамічний апарат: №u201304182; заявл. 03.04.13; опуб. 25.10.13, Бюл. № 20.

9. Пат. 84048 Україна. Установа для низькотемпературної підготовки природного газу: №u201304183; заявл. 03.04.13; опуб. 10.10.13, Бюл. № 19.

АНОТАЦІЯ

Гутак А.Д. Удосконалення технології використання вихрових труб при підготовлянні природного газу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.15.06 – Розробка нафтових та газових родовищ. – Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2018.

Дисертація присвячена удосконаленню існуючих технологій підготовки природного газу до транспортування шляхом використання вихрових труб.

У роботі досліджено процес температурного розділення потоку газу у вихровій трубі. Запропоновано удосконалену математичну модель вихрової труби. За допомогою чисельних методів досліджено умови виникнення явища ежектування у вихровій трубі. Встановлено характер впливу геометричних розмірів вихрової труби на її термодинамічну ефективність.

На основі запропонованої математичної моделі розроблено методіку розрахунку геометричних параметрів вихрової труби (діаметра сопла, діафрагми та розмірів конусного регулятора), а також часток потоків для отримання необхідних ефектів нагрівання і охолодження газу при відомому відношенні вхідного до вихідного тисків.

Встановлено особливості роботи вихрової труби в умовах установки підготовки природного газу. Запропонована модель регресії для визначення ефекту охолодження залежно від частки гарячого потоку та відношення вхідного до вихідного тисків. Обґрунтована доцільність використання математичної моделі для розроблення нових технологічних схем підготовки газу та конструювання нових промислових зразків вихрової труби.

Запропоновано ряд технологічних схем підготовки газу з використанням вихрової труби при подачі газу у магістральний газопровід та на газорозподільну станцію.

Результати теоретичних досліджень використано під час дослідно-промислових випробувань і було впроваджено в технологічний процес на установках підготовки природного газу в Україні.

Ключові слова: природний газ, низькотемпературна сепарація, вихрова труба, ефект Ранка, турбулентність, енергетичне розділення, гідродинаміка, моделювання.

ABSTRACT

Gutak A.D. Improved methods of calculation vortex tubes and technologies with their use in natural gas processing. - Qualifying scientific work, manuscript.

Thesis for a candidate degree (PhD) in specialty 05.15.06 – Development of oil and gas reservoirs. – Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2018.

The thesis is devoted to the development of new and improvement of existing natural gas processing technologies in which vortex tube is installed.

In current work, temperature stratification of gas steam in vortex tube is investigated. The enhanced mathematical model of vortex tube was proposed. With the help of mathematical model ejecting type of flow in vortex tube was investigated. The influence of several geometrical parameters on thermodynamic efficiency of vortex tube was defined.

Based on presented in current work mathematical model, a new method of calculation the geometrical parameters (nozzle diameter, diaphragm diameter, sizes of conical valve) and streams mass fraction, which are needed to reach the requested cooling and heating effects depending on the available pressure ratio, was developed.

Special operating features of vortex tube at natural gas processing plant conditions were defined. The regression model is proposed to estimate cooling effect of vortex tube depending on cold stream mass fraction and pressure ratio.

It was shown that the proposed mathematical model is suitable for development new technological schemes for natural gas processing and could be used in vortex tube design process.

Several new gas processing technological schemes with vortex tube were proposed in which natural gas is supplied to sales pipeline or to pressure reduction stations.

The results of theoretical and experimental investigations were used in pilot-scale tests and implemented into technological process on natural gas processing plants in Ukraine.

Keywords: natural gas, low-temperature separation, vortex tube, Ranque effect, turbulence, energy separation, CFD, numerical simulation.

АННОТАЦИЯ

Гутак А.Д. Усовершенствование технологии использования вихревых труб при подготовке природного газа. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.15.06 – Разработка нефтяных и газовых месторождений. – Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2018.

Диссертация посвящена усовершенствованию существующих технологий подготовки природного газа к транспортировке путем использования вихревых труб.

В работе исследован процесс температурного разделения потока газа в вихревой трубе. Предложена усовершенствованная математическая модель вихревой трубы. С помощью численных методов исследованы условия возникновения явления эжектирования в вихревой трубе. Определен характер влияния геометрических размеров вихревой трубы на ее термодинамическую эффективность.

Основываясь на предложенной математической модели, разработана методика расчета геометрических параметров вихревой трубы (диаметра сопла, диафрагмы и размеров конусного регулятора), а также долей потоков для получения необходимых эффектов нагрева и охлаждения газа при известном соотношении входящего и исходящего давлений.

Установлены особенности работы вихревой трубы в условиях установки подготовки природного газа. Предложена модель регрессии для определения эффекта охлаждения в зависимости от доли горячего потока и соотношения входящего и исходящего давлений. Обоснована целесообразность использования математической модели для разработки новых технологических схем подготовки газа и конструирования новых промышленных образцов вихревой трубы.

Предложен ряд технологических схем подготовки газа с использованием вихревой трубы при подаче газа в магистральный газопровод и на газораспределительную станцию.

Результаты теоретических исследований использованы при опытно-промышленных испытаниях и были внедрены в технологический процесс на установках подготовки природного газа в Украине.

Ключевые слова: природный газ, низкотемпературная сепарация, вихревая труба, эффект Ранка, турбулентность, энергетическое разделение, гидродинамика, моделирование.