

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія
Кондратюка»

Навчально-науковий інститут нафти і газу
Кафедра нафтогазової інженерії та технологій
Спеціальність 185 Нафтогазова інженерія та технології

До захисту
завідувач кафедри



МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему: «Аналіз ефективності використання T-junction сепараторів при
підготовці природного газу»

Пояснювальна записка

Керівник

старший викладач, Забишиний І.В.
посада, наук. ступінь, ПІБ


підпис, дата

Виконавець роботи

Туренко Я.С.
студент, ПІБ

група 601MB


підпис, дата

Консультант за 1 розділом

доцент, с.н.с. Михайлюк О.В.
посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Консультант за 2 розділом

доцент, к.т.н. Устеришко Т.М.
посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Консультант за 3 розділом

доцент, к.т.н. Устеришко Т.М.
посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Консультант за 4 розділом

доцент, к.т.н. Федченко М.М.
посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Дата захисту 23.01.2025

Полтава, 2024

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Навчально-науковий інститут нафти і газу

Кафедра нафтогазової інженерії та технологій

Освітньо-кваліфікаційний рівень: Магістр

Спеціальність 185 Нафтогазова інженерія та технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри НГІТ

“ ” 20 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Туренку Ярославу Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз ефективності використання T-junction сепараторів при підготовці природного газу

Керівник роботи Забишний Іван Вікторович, старший викладач

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “29” 08 2024 року № 887/24

2. Строк подання студентом роботи 28.12 2024 року

3. Вихідні дані до роботи 1. Науково-технічна література, періодичні видання, патенти на винаходи. 2. Геологічні звіти за профілем роботи (за необхідності). 3. Проекти розробки родовищ, технологічні схеми облаштування родовищ або інші технологічні схеми за профілем роботи. 4. Паспорти свердловин та обладнання, що експлуатується.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

1 Інформаційно-оглядова частина.

2. Теоретична частина.

3. Моделювання. Експериментальна частина (за необхідності).

4. Впровадження результатів досліджень. Висновки по роботі.

5. Перелік графічного матеріалу

Презентація із демонстрацією результатів наукової роботи, вказати мету роботи, задачі, практичну та наукову новизну та/або цінність, методи (технології) дослідження, аналіз сучасного стану теорії і практики застосування сепараторів такого виду, принципові технологічні схеми установки підготовки газу за варіантами модернізації, імітаційні моделі установки підготовки газу, загальні висновки по роботі.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1.	Михайловська О.В. доцент		
2.	Нестеренко Т.М., доцент		
3.	Нестеренко Т.М., доцент		
4.	Тодушків М.М., доцент		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Етапи підготовки	Термін виконання
1	Інформаційно-оглядова частина	14.10-20.10
2	Теоретична частина	21.10-03.11
3	Моделювання. Експериментальна частина.	04.11-17.11
4	Впровадження результатів досліджень	18.11-15.12
5	Оформлення та узгодження роботи	16.12-29.12
6	Попередні захисти робіт	06.01-19.01
7	Захист магістерської роботи	20.01-24.01

Студент

(підпис)

Туренко Я.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Забинський І.В.

(прізвище та ініціали)

Анотація

Магістерська робота на тему: «Аналіз ефективності використання T-junction сепараторів при підготовці природного газу».

Магістерська робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр» за спеціальністю 185 «Нафтогазова інженерія та технології». – Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, 2024.

У магістерській роботі досліджується ефективність використання надзвукових T-junction сепараторів для підготовки природного газу. У першому розділі проаналізовано конструктивні рішення сепараційного обладнання, включаючи огляд існуючих конструкцій сепараторів та специфіку надзвукових пристроїв, таких як 3S-сепаратори та T-junction сепаратори.

У другому розділі проведено теоретичні дослідження процесу підготовки газу із застосуванням T-junction сепараторів. Розглянуто основні термодинамічні моделі, визначено залежність вилучення цільових компонентів від параметрів, таких як тиск і температура.

Третій розділ присвячений аналізу технології збору та підготовки вуглеводневої продукції на газоконденсатному родовищі. Представлено опис технологічних схем підготовки газу, конденсату та супутньої пластової води, а також розглянуто компонентний склад сировини.

У четвертому розділі виконано моделювання надзвукової технології підготовки газу на родовищі. Проведено розрахунки матеріального балансу для існуючої та модернізованої схеми.

Робота підтверджує доцільність використання надзвукових T-junction сепараторів для підвищення ефективності підготовки природного газу та покращення економічних і екологічних показників виробничого процесу.

Ключові слова: природний газ, підготовка газу, надзвукові сепаратори, термодинамічні моделі, газоконденсатне родовище.

Зміст

Вступ.....	4
Розділ 1 Аналіз конструктивних рішень сепараційного обладнання.....	6
1.1 Огляд конструкцій існуючих сепараторів.....	6
1.2 Надзвукові сепаратори для очищення природного газу.....	17
1.2.1 Надзвуковий 3S-сепаратор.....	17
1.2.2 T-junction сепаратори.....	19
Висновки до розділу 1.....	22
Розділ 2. Теоретичні дослідження процесу підготовки природного газу з використанням T-junction сепараторів.....	23
2.1 Допущення при теоретичних дослідженнях.....	23
2.2 Існуючі термодинамічні числові моделі.....	24
2.3 Основні рівняння для теоретичних досліджень.....	30
2.4 Визначення тиску та температури при газодинамічному розділенні сумішей.....	32
2.5 Моделювання процесу надзвукової сепарації.....	34
Висновки до розділу 2.....	48
Розділ 3 Технологія збору й підготовки вуглеводневої продукції на газоконденсатному родовищі.....	50
3.1 Технологічна схема збору й підготовки вуглеводневої продукції на родовищі.....	50
3.1.1. Опис технологічної схеми підготовки газу.....	50
3.1.2 Опис технологічної схеми підготовки конденсату та супутно-пластової води.....	63
3.1.3 Опис дренажної системи.....	66

3.2 Компонентний склад вхідної та вихідної сировини свердловин. Конструкція свердловин.....	67
Висновки до розділу 3	71
Розділ 4 Моделювання надзвукової технології на газоконденсатному родовищі.....	72
4.1 Вихідні дані для моделювання	73
4.2 Результати моделювання існуючої та удосконаленої технологічної схеми підготовки вуглеводнів.....	76
4.3 Підбір конструкції сепаратора.....	78
Висновки за розділом 4.....	82
Загальні висновки.....	83
Список використаних літературних джерел	84

Вступ

Магістерської роботи «Аналіз ефективності використання T-junction сепараторів при підготовці природного газу» є надзвичайно актуальною через сучасні вимоги до оптимізації технологічних процесів у газовій промисловості. Зростання попиту на природний газ стимулює пошук нових підходів до його підготовки. У цьому контексті надзвукові сепаратори типу T-junction набувають особливого значення завдяки своїй здатності ефективно розділяти газові та рідкі фази в потоці.

Надзвукові T-junction сепаратори забезпечують високу енергоефективність, оскільки їх використання дозволяє значно зменшити втрати енергії в процесі підготовки газу. Ці технології також мають переваги компактності, надійності та можливості роботи в умовах високих швидкостей і тисків.

Екологічний аспект також відіграє важливу роль, адже підвищення ефективності підготовки природного газу сприяє зменшенню викидів шкідливих речовин у довкілля. Крім того, застосування таких технологій дозволяє знизити експлуатаційні витрати та підвищити якість продукту, що особливо важливо в умовах сучасної енергетичної кризи та необхідності забезпечення міжнародної конкурентоспроможності.

Дослідження ефективності надзвукових T-junction сепараторів сприятиме впровадженню інноваційних рішень у газодобувну галузь, дозволяючи досягти оптимального балансу між економічністю, екологічністю та технологічною ефективністю. Ці фактори визначають актуальність теми роботи та її важливість для розвитку енергетичного сектору.

Мета роботи – удосконалити систему збору та підготовки вуглеводнів газоконденсатного родовища, шляхом модернізації його технологічної схеми.

Основні задачі досліджень:

- проаналізувати існуючі види сепараційного обладнання;
- виконати моделювання схем підготовки природного газу з використанням надзвукової сепарації;
- провести імітаційне моделювання процесу підготовки природного газу з урахування встановлення додаткового обладнання;

Об'єкт дослідження – процес підготовки природного газу із застосуванням надзвукових T-junction сепараторів.

Предмет дослідження – ефективність роботи надзвукових T-junction сепараторів та їх вплив на якість підготовки природного газу на установці підготовки газу.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- обґрунтуванні моделі надзвукової сепарації при складанні технологічної схеми процесу.

Практичне значення одержаних результатів:

запропонована модель надзвукової сепарації, яку можна використати при розрахунку матеріального балансу удосконаленої системи збору і підготовки вуглеводнів газоконденсатного родовища.

Особистий внесок автора роботи полягає у:

- проведенні літературного пошуку та його обробці;
- виборі схеми для імітаційного моделювання сепарації та розрахунку матеріального балансу установки підготовки природного газу газоконденсатного родовища з урахування запропонованої схеми.

Структура та об'єм роботи. Магістерська робота складається з вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел.

Робота виконана на кафедрі нафтогазової інженерії та технологій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

Розділ 1 Аналіз конструктивних рішень сепараційного обладнання

1.1 Огляд конструкцій існуючих сепараторів

Нафтові та природні гази, які видобуваються, насичені водною парою. В процесі переробки та транспорту багато разів змінюється термодинамічний їх стан. При цьому виникають умови при яких досягаються значення температури точки роси, при якій водяна пара й високомолекулярні вуглеводні, які утримуються у газі, конденсуються при існуючому тиску. При умові конденсації у технологічних системах створюються гідрати, які закупорюють трубопроводи та трансферні лінії обладнання. При умісті у газах парів води та сірчистих сполук створюються умови, що сприяють корозії. Таким чином вміст вологи у природному газі регламентується Кодексом газотранспортної системи, а питання очищення газу є одним із найважливіших в технологічному етапі підготовки та транспортування газу.

Очистка газу здійснюється на усіх етапах технологічного циклу:

- при видобуванні газу на родовищах, в складі установок комплексної підготовки газу (УКПГ) газоочисне обладнання є основним;
- при транспорті на компресорних станціях (КС);
- на газорозподільних станціях (ГРС).

Краплинна рідина та тверді частки, які утримуються у газі, викликають стрімке зношування лопатей турбокомпресорів на дотискуючих компресорних станціях (ДКС) магістральних трубопроводів. Тому однією із актуальних проблем, які стають перед нафтогазовою галуззю на даному етапі, є удосконалення газосепараційних технологій й техніки поряд із традиційно застосовуваними низькоефективними способами й конструкціями. Окрім того, це підштовхується усе більшими вимогами відносно якості продуктів й ступеня використання енерго ресурсів нафтогазового комплексу.

Роботи з створення сучасних технологічних схем осушування природного газу закордонними виробниками (SIIRTECNIGI, OPCDrizo Inc., ProsernatIFP GroupTechnologies) мають широкий розвиток у останні роки.

Уведені у експлуатацію 1 промислова установка DRIGAS із навантаженням за діетиленгліколем (ДЕГ) 200 м³ /добу й більше сорока п'яти промислових установка DRIZO, які відповідають найбільш жорстким вимогам, які забезпечують низьку точку роси газу й потребують менших експлуатаційних витрат, в порівнянні з традиційними установками. Модернізацію абсорбційного устаткування досягнуто заміною існуючої тарілчастої ступені з відцентровими сепараційними елементами в абсорбері осушування газу на газорозподільну сепараційну насадкову секцію (регулярна пластинчаста насадка), досить металоємної конструкції й недостатньо технологічної для промислового серійного виготовлення.

Встановлення газорозподільної секції забезпечує рівномірний розподіл потоку газу по перерізу абсорбера і знижує його швидкість після виходу з контактного розділового елемента, створюючи більш сприятливі умови для поділу фаз в самій секції і в фільтруючі ступені, розташована вище. Важливо очищати природний газ безпосередньо перед його використанням як паливо на електростанціях.

Тверді частинки та гідрати, які утворюються, коли природний газ містить воду, можуть швидко засмічувати газові пальники, спричиняючи часті зупинки основного технічного обладнання. Значна частина природного газу використовується хімічними підприємствами для виробництва водню, ацетилену, етилену та інших продуктів. Наявність у газі води, конденсату та твердих часток може негативно вплинути на роботу реактора конверсії метану.

Вони спричиняють забруднення обладнання, що призводить до утворення побічних продуктів, для очищення яких необхідно встановити складне та дороге обладнання. Набагато дешевше очистити природний газ перед використанням. Тому для очищення природного газу газосепаратори

слід встановлювати за свердловинами, перед компресорними станціями і на промислових підприємствах, що використовують газ. Сепараційне обладнання є невід'ємним елементом різноманітних технічних рішень для індустріалізації нафтових, газових і конденсатних нафтових родовищ, а також є невід'ємною частиною нафтогазового промислового обладнання в процесі переробки нафти конденсату, стиснення газу та видобутку нафти, попередньої стадія сепарації газ-рідина на компресорних станціях магістральних нафто- і газопроводів. Будучи складовою частиною компресорної станції, газовіддільник працює при різних тисках (від 0,1 до 60 МПа) й температурах (від - 80 до +150 °С), сепаровані суміші є багатокомпонентними (гетерогенними) вуглеводневими системами [4, 7].

Типові сепараційні установки широко використовуються в обладнанні компресорних станцій попутного газу; установках криогенної сепарації та криогенної конденсації; установках деетанізації та газофракціонування в складі газопереробних установок; установок переробки нафти та конденсату, газліфтних компресорних установок. Сучасне сепараційне обладнання для розділення газових, конденсатних і водонафтових сумішей можна класифікувати за основними функціями та конструктивними особливостями (рис.1.1).

Найбільш компактними і найменш металомісткими є кулькові сепаратори. Чим вищий тиск і продуктивність сепаратора, тим більше ці переваги стають очевидними. Основним недоліком кулькових сепараторів є обмежений простір, який виключає можливість розміщення в корпусі коагуляційної частини та частини збору рідини. В результаті ефективність очищення газових потоків із високодисперсним розподілом рідини та початковим її вмістом більше 100 см³/м³ в кульових сепараторах не значна [1].

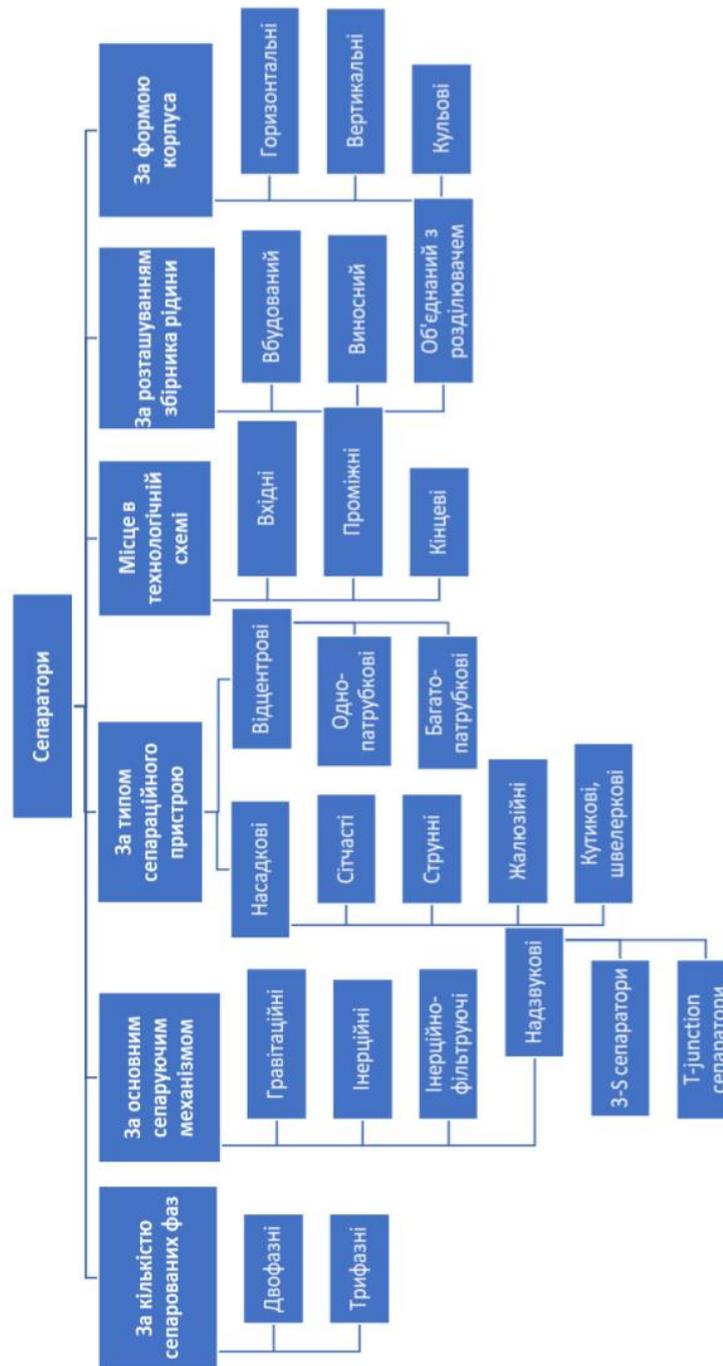


Рис. 1.1 – Класифікація сепараторів по основним функціональним і конструктивним ознакам

Основною перевагою горизонтальних циліндричних сепараторів є можливість досягнення значної питомої потужності. Ці сепаратори призначені для поділу газорідних сумішей із високим вмістом рідини або для поділу пінистих рідин. Недоліком горизонтальних сепараторів є складність видалення твердих домішок із сепаратора. Це те, чого не вистачає вертикальному циліндричному сепаратору, овальне дно якого дозволяє рідким і твердим домішкам стікати на дно пристрою і в подальшому в дренажну систему. Секція для збирання рідини можна зняти з корпусу сепаратора і перетворити на горизонтальний циліндр (використовуйте кульові колектори для високого тиску). Осідання крапель у гравітаційних сепараторах проходить у основному за рахунок дії сили тяжіння (рис. 1.2). Ефективність газорідного поділу збільшується з розміром крапель у повітряному потоці та швидкістю самого потоку у сепараторі. Тому при значного об'ємі видобування газу і зменшення великих крапель при русі газорідного потоку у промисловому колекторі важко досягнути високої ефективності.

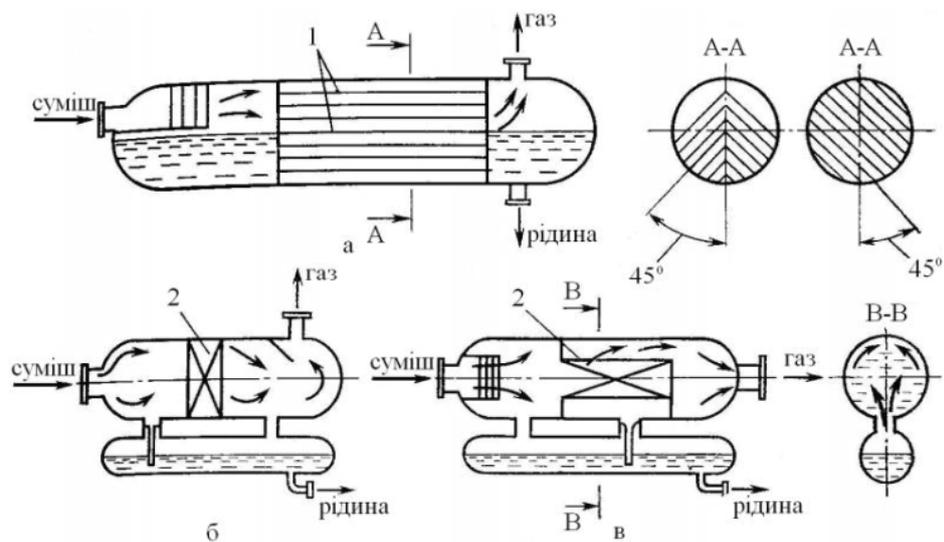


Рис. 1.2 – Газорідні гравітаційні сепаратори: а – з пластинами Діксона; б, в – з жалюзійними насадками; 1 – плоскопаралельні пластини Діксона; 2 – жалюзійні насадки

Гравітаційні газосепаратори можна комплектувати плоскопаралельними пластинками Діксона (рис. 1.2 а), які дозволяють збільшення робочої швидкості і ефективність краплевідкладення, і жалюзійними насадками, що збільшують робочу площу і газопродуктивність у порівнянні із попередньою конструкцією. У горизонтальному варіанті жалюзійні насадки монтуються в поперечному перерізі пристрою (рис. 1.2 б) або з обох сторін відносно осі апарату (рис. 1.2 в). У інерційному сепараторі рідина відокремлюється від газу переважно під дією сил інерції (рис. 1.3). Ефективність насадкового інерційного сепаратора визначається у першу чергу конструкцією насадки, що використовується, і положенням насадки у корпусі сепаратора і може досягати 99,5-99,8 % при швидкостях газу у 3-5 разів вище, ніж у гравітаційних сепараторів [1]. Висока ефективність цих сепараторів обумовлена великою поверхнею контакту сепаруючого елемента із газорідинним потоком. Забезпечується відділення крапель діаметром не менш 3...5 мкм для сіток і 10...20 мкм для жалюзей [6].

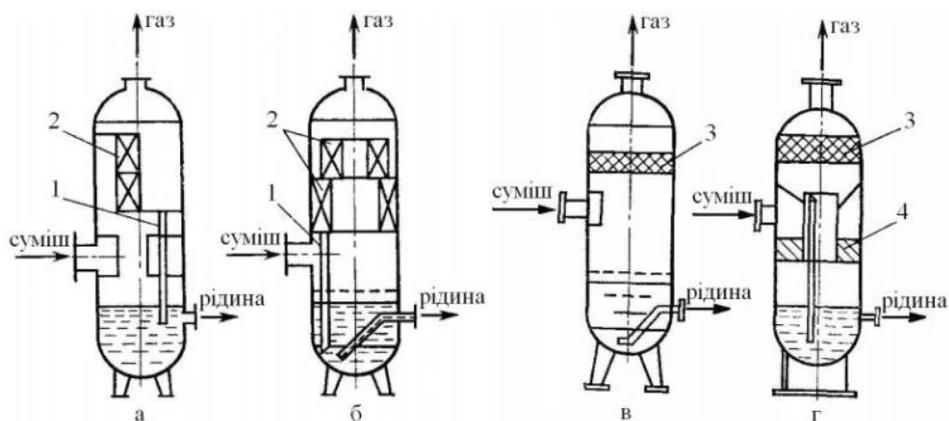


Рис. 1.3 – Насадкові інерційні сепаратори: а, б – з жалюзійними насадками; в, г, – з горизонтальною сітчастою насадкою; 1 – краплевідбійник; 2, 3 – жалюзійні та сітчаста насадки; 4 – завихрювач.

Для підвищення продуктивності жалюзійна насадка може бути односекційною або двосекційною (рис. 1.3 а). Кільцеве розташування насадок підвищує ефективність роботи газосепаратора жалюзійного (рис. 1.3, б). У практиці жалюзійні сепаратори застосовуються в низькотемпературної сепарації (НТС) як вхідний, проміжний і кінцевий ступені сепарації, основне їх призначення - попереднє відділення газів від рідин. В зарубіжній практиці жалюзійні сепаратори застосовують для очищення газів від рідини. Відомі випадки використання таких сепараторів як попередній рівень сепарації на компресорних станціях магістральних газопроводів. Вертикальний сітчастий сепаратор використовуються як кінцеві сепаратори на установках НТС, проміжні та кінцеві сепаратори на газопереробних заводах (ГПЗ), де здійснюється очищення газів від рідини перед подачею на факел і натомість вхідного сепаратора, при умові що виникає потреба високоефективного очищення газу перед основними технологічними апаратами (абсорбер осушування).

В відцентрових сепараторах використовують для перетворення поступального потоку у обертальний рух завихрювач (рис. 1.4, 1.5). Головною перевагою відцентрових сепараторів є висока швидкість газу всередині корпусу відцентрового елемента за рахунок дії відцентрової сили. Краплі діаметром понад 10-20 мікрон можна відокремити від газів. З іншого боку, значення ефективності поділу при високому тиску становлять від 80 до 99% [1, 6]. З метою підвищення ефективності багатопатрубкові відцентрові сепаратори комплектуються відцентровими елементами малого діаметра.

Однотрубкові відцентрові прямоочні газові сепаратори (рис. 1.4, а, в) для попереднього поділу рідини із горизонтальним рухом закрученого потоку та сепаратори, з яких відбувається відділення газу від рідини у закрученому потоці (потік направлений зверху-вниз (рис. 1.4, б) встановлюють регульований завихрювач 1, що призначений для підтримування ефективної швидкості сепарації за умови змінювання

продуктивності та тиску, а наявність каналу 2 підвищує ефективність сепараторів і передбачає приріст продуктивності. Відцентрові елементи каскадного типу (рис. 1.4, в) знижують гідравлічний опір пристрою, що дозволяє проводити ефективне газоочищення.

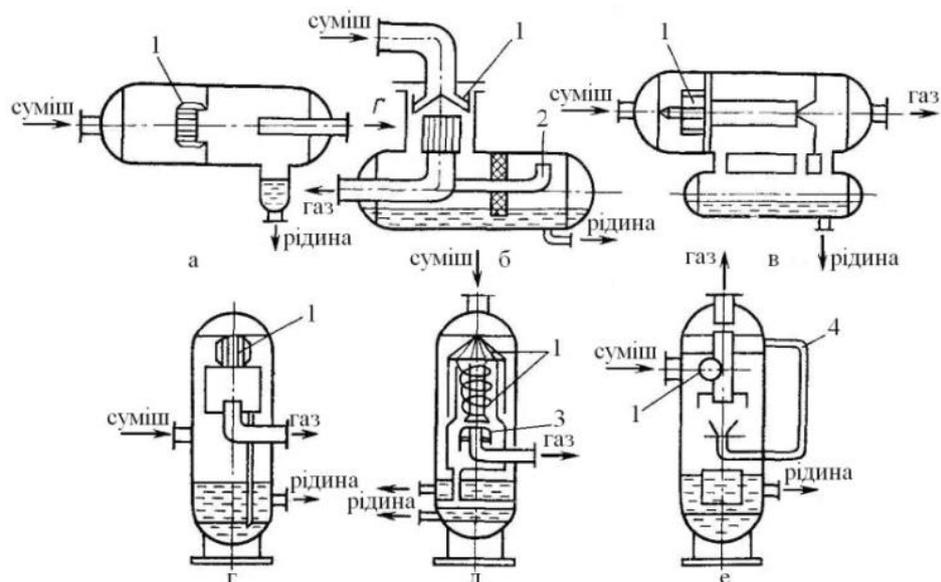


Рис. 1.4 – Відцентрові однопатрубкові прямоточні сепаратори: 1 – регульований завихрювач; 2 – канал відсмоктування; 3, 4 – отвори та труба рециркуляції

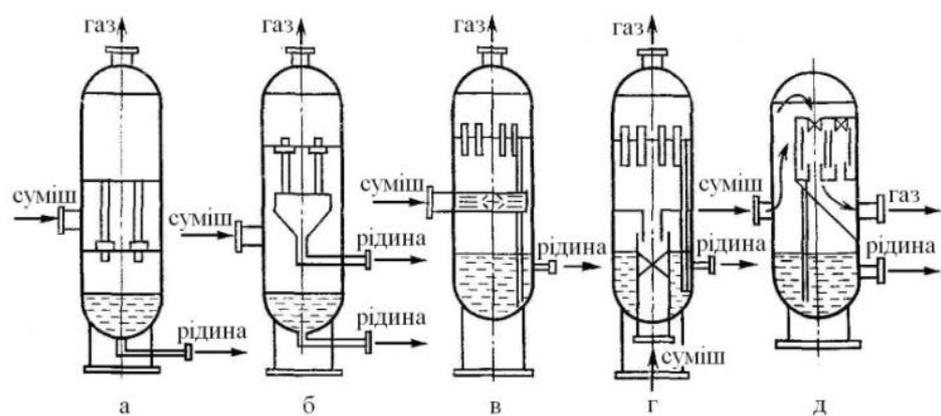


Рис. 1.5 – Відцентрові багатопатрубкові сепаратори

Наявність у сепараторі засобів (рис. 1.4 ж, г, д) для початкового відділення рідини в вигляді відбійної пластини та поворота потоку на 90° , отвору 3 і труби рециркуляції газу 4 сприяє підвищенню продуктивності і ефективності сепарації. Газоочищувачі відцентрового багатопатрубкового апарату (рис. 1.5, а) являють собою циклонні елементи протиточної конструкції, змонтовані на решітці, розташованій нижче патрубку введення газу. Вихідні труби цих елементів закріплені у решітці, розташованій над газовими вхідними патрубками.

Досвід використання сепараторів такої конструкції показав, що завихрювачі можуть забиватися різними домішками. Одна із цих конструкцій (рис. 1.5, б) має камеру первинного відділення домішок та розташування завихрювачей циклонів біля верхніх ґрат. Однак при застосуванні цього пристрою також буває така ситуація, що завихрювачі блокуються, що впливає на ефективну роботу пристрою.

У апаратах, головна сепараційна секція котрих виконана в вигляді прямооточних відцентрових елементу (рис.1.5, в, г, д), також може забезпечуватися відсмоктування фракцій газу (рис.1.5, в, г) або рециркуляція (рис.1.5, д). Первинна очистка газу в сепараторах, які обладнані патрубками із осьовими чи тангенціальними завихрювачами, виконуються за рахунок радіально щільного введення в вільному обсязі сепаратора (рис.1.5, в). Попередня очистка газу у сепараторах із відцентровими елементами каскадного типу (рис.1.5, г) проводиться за рахунок дії відцентрових сил в трубі підведення газу, яка виконана як окремий від-центровий сепараційний елемент. В деяких сепараторах використовують прямооточні елементи, які розташовуються поміж 2-ма решітками (рис.1.5, д). У елементів є канали рециркуляції, що можуть ефективно очищати газ при їх горизонтальному чи вертикальному розташуванні (рух потоку зверху вниз чи знизу нагору). Первинна очистка газу проходить за рахунок удару об перегородку у вільному об'ємі при повороті потоку на кут 90° (рис.1.5, д). Відцентрові сепаратори

використовують часто в якості вхідних та проміжних ступенів очистки установок пром.підготовки газу і магістральних газопроводах. Відомо, що використання відцентрових сепараторів при кінцевому ступені очистки. Більш ретельне очищення газу від рідини проводять у сепараторах, обладнаних сітчастими чи скловолокнистими коагуляторами (рис.1.6, 1.7).

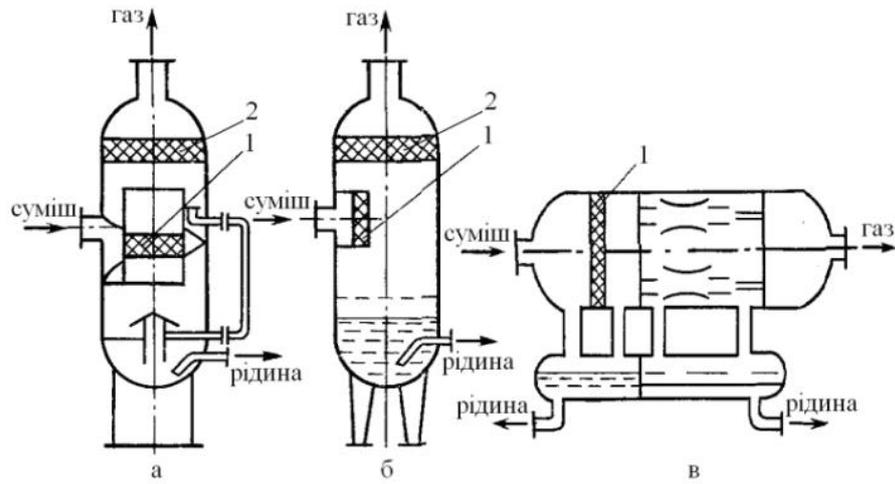


Рис. 1.6 – Сепаратори з сітчастим коагулятором: 1 – сітчастий коагулятор; 2 – сітчаста насадка

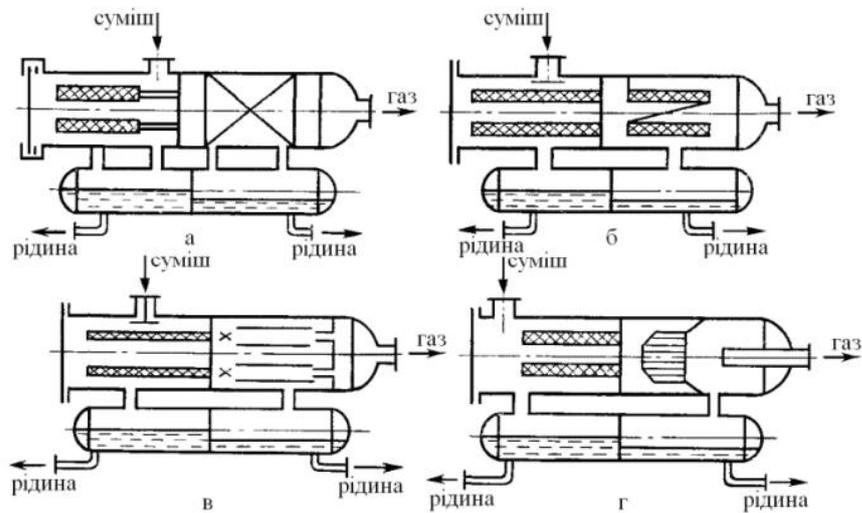


Рис. 1.7 – Сепаратор зі скловолокнистим коагулятором

Вхід газу в сепаратор (рис. 1.6 а) має гвинтовий завихрювач і горизонтальний сітчастий коагулятор, прикріплений до корпусу сепаратора та є пристроєм для попередньої сепарації рідини. Остаточна секція очистки газу виконана в вигляді сітчастої насадки 2 (горизонтальної). Первинне відділення газу від рідкої фракції може проводитись в вертикальних сітчастих коагуляторах (рисунок 1.6, б, в), які розташовані в сепараторах за патрубком уведення газу у апарат, в вільному об'ємі і при повороті газорідинного потоку на кут 90° (рис. 1.6, б) чи тільки в вільному об'ємі (рисунок 1.6, в). Кінцеве відділення газу проводить у сітчастій насадці чи за допомогою відцентрових прямоточних елементів.

За наявності у газовому потоку мілких краплин рідини використовують сепаратори з скловолокнистим коагулятором, який призначений для збільшення (укрупнення) краплин рідини (рисунок 1.7). Кінцеве відділення збільшених краплин рідини проходить у головній сепараційній секції, яка виконана як сітчаста насадка (рисунок 1.7, б), відцентрової конструкції (рис. 1.7, в, г) чи жалюзійної насадки (рис. 1.7, а).

Проаналізувавши класифікацію сепараторів по основним функціональним й конструктивним ознакам, встановлено, сепаратори перехідного виду (від інерційного типу до фільтруючого типу) – відсутні.

При підборі газоочисного обладнання для проведення процесу сепарації аеро-дисперсних систем (чи аерозолів) необхідно приймати до уваги техніко-економічні показники роботи сепаратори. При визначенні цих показників треба враховувати ступінь очистки газу, гідравлічний опір апарата, експлуатаційні витрати, вартість апарата та вартість очистки газу. Також повинно бути прийнято до уваги фактори, від котрих залежить ефективність очистки: вологість, температура та хім. агресивність газу; уміст в ньому та властивості частнок дисперсної фази, а також ще її фракційний склад.

1.2 Надзвукові сепаратори для очищення природного газу

1.2.1 Надзвуковий 3S-сепаратор

Використання холодильних машин і турбодетандерів пов'язане не тільки з істотним збільшенням капітальних і експлуатаційних витрат, але в багатьох випадках їх застосування неможливо через особливості їх експлуатації. Наприклад, використання цих агрегатів на багатьох морських платформах проблематично через необхідність їх постійного обслуговування, а в складі перспективних підводних видобувних комплексів їх застосування неможливо.

Застосування 3S-технології дозволяє у багатьох випадках відмовитися від використання холодильних машин і турбодетандерів, з одночасним поліпшенням експлуатаційних і економічних характеристик об'єктів [1]. Порівняльний графік ефективності зниження температури за допомогою різних пристроїв показаний на рис. 1.8.

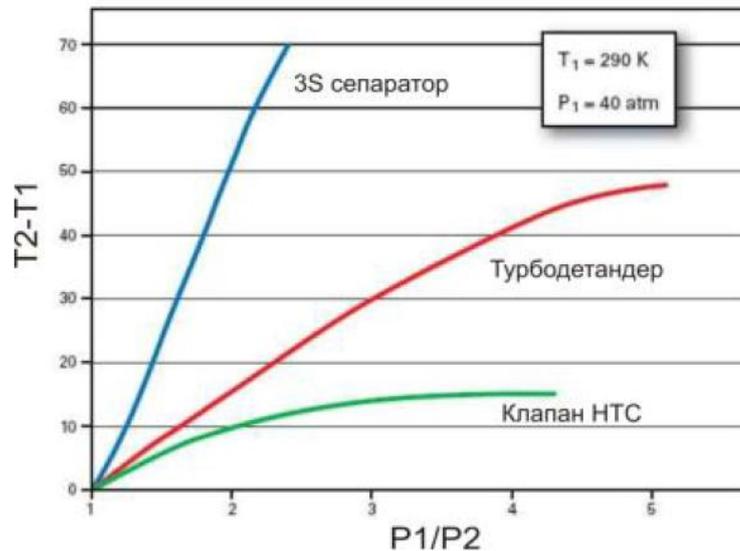


Рис. 1.8 – Порівняльний графік ефективності

Розробник і ліцензіар даної технології – компанія Trans Lang Technologies Ltd. – TLT (Канада). Технологія запатентована в США, Канаді, Європі, Азії, країнах Південної Америки і ін. [2]. Технологія надзвуковий сепарації газового сировини знайшла широке промислове застосування в складі наземних комплексів підготовки газу, в складі установок з підготовки газу на морських платформах, також є можливість використання технології в підводних умовах. На сьогоднішній день 3S– сепаратори експлуатуються на об'єктах, деякі з яких представлені нижче:

- УКПГ №1 і №2 родовища Talimu (Китай);
- Газопереробний завод «Okoloma», Shell Petroleum Development Company (Нігерія);
- Морська платформа B11, Petronas / SSB (Малайзія);
- Родовище Санару, Petrobras (Бразилія) [8,9].

Основним елементом технології є надзвуковий або 3S– сепаратор (від англ. – supersonic separator), що дозволяє реалізувати швидкість руху газу вище швидкості звуку в газовому середовищі (тобто з числами Маха M більше 1) [5]. Таке прискорення дозволяє домагатися інтенсивної конденсації і сепарації цільових фракцій природного газу. Схема 3S– сепаратора показана на рис. 1.9 та конструкція сепаратора наведена на рис.1.10.

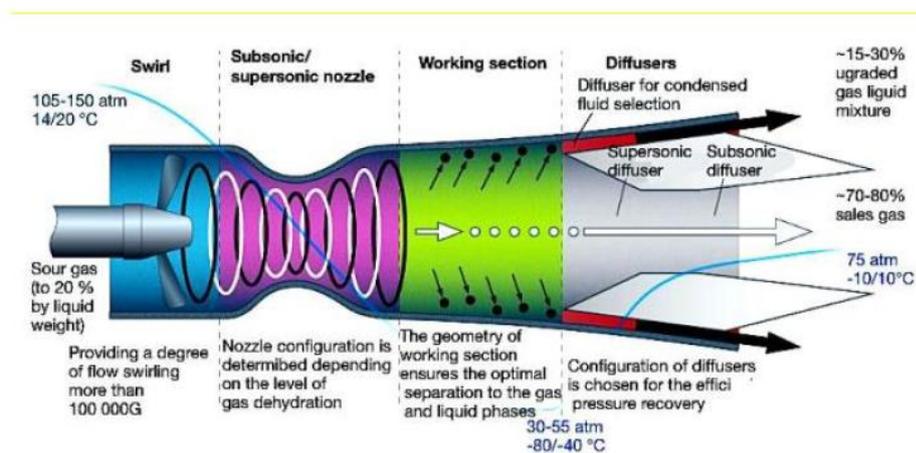


Рис. 1.9 – Схема 3S-сепаратора

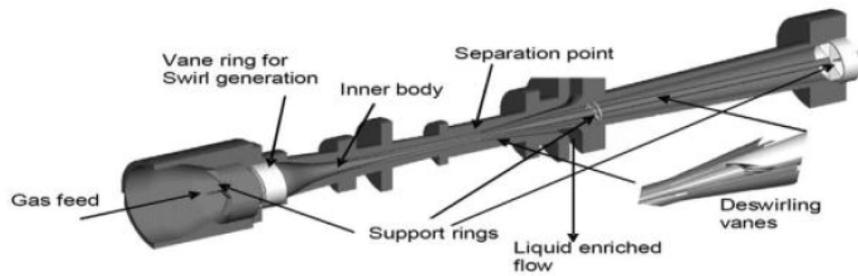


Рис. 1.10 – Конструкція 3S-сепаратора

1.2.2 T-junction сепаратори

Основною конструктивною особливістю надзвукового T-junction сепаратора є T-подібне з'єднання. У T-junction сепараторі вхідний потік газу закручується в статичному завихрювачі, далі в надзвуковому соплі Лавалля сировинний потік прискорюється до швидкості, що перевищує швидкість поширення звукової хвилі в середовищі вхідного газового потоку. В результаті надзвукового руху потоку відбувається перетворення частини потенційної енергії газу в кінетичну, що призводить до сильного охолодження газу. Охолоджений потік прямує в робочу частину, в якій відбувається конденсація цільових фракцій природного газу і води. Утворені краплі рухаються до стінок робочої частини T-junction сепаратора за рахунок відцентрових сил, обумовлених обертанням потоку. На виході з робочої частини формується центральне ядро потоку, очищене від цільових фракцій, і пристінковий двофазний прикордонний шар, що складається з рідини (вуглеводнів і води) і газу.

Двофазний пристінковий шар, відокремлений від ядра потоку, направляється в дифузор газоріднинної суміші щільної форми, в якому відбувається гальмування потоку. Очищений центральний газовий потік з

ядра потоку надходить в дифузор газу і також загальмовується.

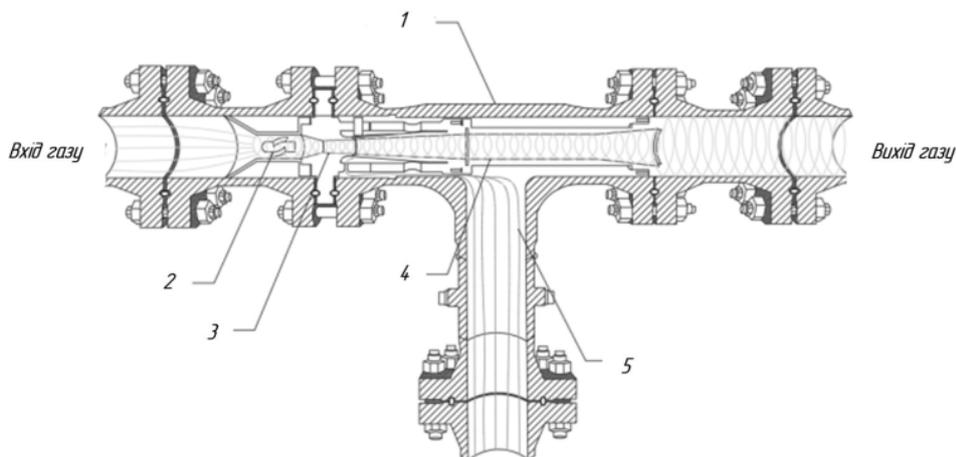


Рис. 1.11 – Конструктивна схема T-junction сепаратора: 1 – корпус, 2 – закручуючий пристрій; 3 – сопло Лаваля, 4 – дифузор; 5 – відділення конденсату

В результаті досягнення надзвукових швидкостей газу можуть бути реалізовані температури потоку до -100°C , тому T-junction сепаратор дозволяє реалізувати глибоке витяг цільових компонент з природного газу [6,7].

Низькотемпературна сепарація, заснована на технології надзвукової сепарації, знаходить застосування в установках підготовки природного газу до транспорту (витяг компонентів важче пентану $\text{C}_5 + \text{H}_2\text{O}$), в системах, що використовуються для вилучення вуглеводнів важче метану (етан, пропан, бутан і т.д.) . Також даний метод може бути використаний для отримання кислих компонентів (CO_2 , H_2S) зі складу вуглеводневого газу. За різними оцінками, на сьогоднішній день близько третини світових запасів природного газу має високий вміст кислих компонентів, і ця цифра зростає в міру виснаження запасів газу з низьким вмістом кислих компонентів. Даний факт є причиною зростаючого інтересу до надзвукової сепарації, як до способу очищення газу від кислих компонентів [8,9].

Основними перевагами надзвукової технології перед іншими процесами низькотемпературної сепарації є:

- відсутність динамічних елементів в конструкції апарату, що обумовлює надійність пристрою;
- простота монтажу і експлуатації;
- низькі капітальні та експлуатаційні витрати;
- порівняно малі габарити і металоємність установки;
- можливість роботи T-junction сепараторів при наявності рідини у вхідному потоці газу (що абсолютно неприйнятно для турбодетандерів);
- більш широкий діапазон робочих параметрів і складів сировини в порівнянні з турбодетандерними агрегатами;
- можливість роботи пристрою без контролю з боку технологічного персоналу, а також в підводних видобувних комплексах;
- відсутність необхідності використання інгібіторів гідратуутворення, оскільки час перебування сировини в T-junction сепараторі при низьких температурах становить соті частки секунди [1].

На рисунку 1.10 представлено комбіновану схему використання T-junction сепаратора.

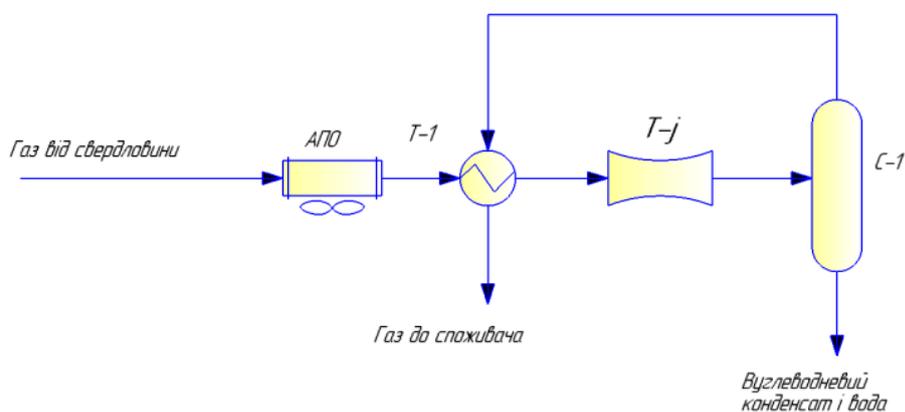


Рис. 1.10 – Комбінована схема використання T-junction: С-1 – сепаратор; Т-ј – T-junction, АПО – апарат повітряного охолодження, Т-1 – теплообмінник

Висновки до розділу 1

Проаналізовано існуючі конструктивні рішення сепараційних пристроїв та виділено перспективні, які можуть застосовувати при підготовці природного газу.

Застосування методів надзвукової сепарації є ефективним у порівнянні з іншими методами та можуть використовуватися в умов уже існуючих установок підготовки природного газу для їх модернізації. T-junction сепаратори мають досить багато переваг.

Розділ 2. Теоретичні дослідження процесу підготовки природного газу з використанням T-junction сепараторів

2.1 Допущення при теоретичних дослідженнях

Теоретичні дослідження базується на наступних припущеннях:

- сопло є адіабатичним, тому ефект теплопередачі не враховується;
- сопло працює в стабільному режимі без коливань подачі;
- вхідна температура (T_{in}), вхідний тиск (P_{in}), швидкість рідини на вході (u_{in}), компонентний склад потоку (z_{in}) і зворотний тиск на соплі (P_b);
- геометрія сопла та площа поперечного перерізу на виході (A_{out}) і в місці звуження (A_t) відомі;
- потік одновимірний;
- течія є ізентропічною в збіжному перерізі;
- потік перекривається на горловині сопла;
- у збіжному соплі немає бічного потоку;
- розташування бокового потоку вказується на основі обраної температури;
- звичайна ударна хвиля виникає в розбіжному соплі нескінченно малої товщини (тобто площі поперечного перерізу перед і після ударної хвилі рівні);
- місце ударної хвилі фіксоване, оскільки потік постійний;
- потік не є ізентропічним поперек ударної хвилі, що викликає збільшення ентропії;
- різкі зміни умов течії через ударну хвилю незворотні;
- немає бокового потоку після ударної хвилі;
- течія є ізентропічною після ударної хвилі;
- вказано ефективність розділення та фазовий перехід;

- ефект завихрення не враховується в розрахунках, але передбачається, що закручений рух сприяє роз'єднанню фаз.

2.2 Існуючі термодинамічні числові моделі

Термодинамічні моделі дозволяють проводити більш швидко моделювання, яке є більш придатним для потенційних досліджень оптимізації та процесів, що вимагають повторного моделювання, наприклад, циклу переробки [21]. Хороші чисельні моделі можуть точно прогнозувати термодинамічні властивості робочої рідини, працювати з діапазоном параметрів стану [10].

У роботі Кастьє [21] має бути розроблено розширення цієї одновимірної моделі з тією ж здатністю відслідковувати появу та зникнення конденсованої фази за допомогою ізентальпійних та ізентропічних обчислень. Передбачається, що одновимірність цієї моделі не впливає на точність моделі. Це пояснюється тим фактом, що за відсутності або невеликої інтенсивності завихрення радіальні зміни термодинамічних параметрів незначні. Газове число Маха зменшується, коли сила завихрення збільшується, як зазначено We_p та ін. [3]. Таким чином, мала або середня сила завихрення вважається найкращою для збільшення відцентрової сили без впливу на ефективність розділення. У дослідженні Вена було досліджено вплив завихрення на продуктивність надзвукового сепаратора. Безрозмірний параметр сили завихрення S використовувався для характеристики сили завихрення:

$$S = \left(\int \frac{v}{a^*} dA/A \right)_t, \quad (2.1)$$

де v і a^* – тангенціальна та критична швидкості на звуженні сопла.

Розподіл статичної температури на вихідній площині надзвукового сепаратора з силою завихрення 0, 48,9% і 90,6% відповідно. При відсутності

або невеликій силі завихрення радіальні профілі температури є майже однорідними. Однак радіальна варіація є значною для тангенціальної швидкості [3]. Оскільки ця модель не спрямована на прогнозування гідродинамічної поведінки потоку та нехтує ефектом закручення на розрахунки фазової рівноваги, ця зміна не впливає на її здатність ідентифікувати основні конструктивні параметри сопла, такі як поділ фаз, розташування ударної хвилі.

Багатофазний потік.

Основною метою надзвукових сепараторів є конденсація та видалення важких вуглеводнів, кислих газів і домішок з основної маси природного газу та отримання сухого газу з високим вмістом CH_4 . Таким чином, багатофазний потік є основним явищем, яке визначає продуктивність сепаратора. Часто добутий природний газ також надходить зі слідами рідкої або твердої фази безпосередньо з резервуарів.

У багатьох літературних роботах обговорювалися моделі, які використовують термодинамічне моделювання для ідеального газу або рівняння станів, що описують лише поведінку однієї фази *PVT*.

Щоб уникнути ризику зіткнення з перехідною фази в надзвуковій області, робоча рідина вибирається як сухий CH_4 . Деякі інші роботи вибирають як робочу рідину природний газ, але не розглядають багатофазний потік, що призводить до нереалістичних областей однофазного надзвукового потоку [15].

За кількома винятками моделі не справляються з ефектами зміни фази, що виникають при надзвуковій сепарації сирого природного газу [15,10]. Це призводить до помилок в оцінці багатофазної термодинамічної швидкості звуку. Отже, багатофазний потік не накладає жодних фундаментальних обмежень чи похибок для розроблення скороченої моделі.

Термодинамічна швидкість звуку.

Надзвуковий сепаратор працює на основі надзвукового потоку, що призводить до значного падіння температури і тиску потоку за звуженням.

Надзвуковий означає, що швидкість потоку перевищує число Маха один ($Ma > 1$). Це відбувається, коли потік у звуженні перебивається швидкістю звуку при числі Маху, що дорівнює 1. Щоб визначити число Маха, необхідно знати термодинамічну швидкість звуку. Часткова конденсація може виникнути, починаючи зі звуження або в будь-якій точці уздовж сопла. Таким чином, необхідно вміти визначати термодинамічну швидкість звуку для багатофазного потоку [21]. Існує кілька методів для визначення багатофазної термодинамічної швидкості звуку, а саме ті, що представлені [11-12, 16].

Іншим методом було розширення методу Wood для багатокомпонентних фаз з використанням GERG EOS Secchi та ін. [17]. У цій роботі використовується метод, розроблений Кастьє.

Бічні потоки.

Бічні потоки є критичними для продуктивності надзвукового сепаратора. Розташування бічних потоків і кількість конденсованої фази, зібраної ними, визначають ефективність пристрою. У цій моделі тест стабільності фази використовується для виявлення появи рідких фаз, тоді як тверда фаза не розглядається. Подібно до підходу Кастьє, ця модель визначає розташування бічних потоків на основі заданої температури. Модель має вирішити задачі – помістити бічні потоки туди, де досягається задана температура. Вона також може розглядати профілі конденсованої фази. Щоб врахувати зміни в бічних потоках, матеріальні баланси відображаються нижче. Дві позиції, (b_{ss}) і (p_{ss}) позначені як позиції безпосередньо перед та після виведення бічного потоку відповідно. Наступні рівняння представляють баланси в цих положеннях на основі молярних витрат (n), мольних часток (z) на основі кожного компонента (i) і фази (j):

$$\dot{n}_{bss} = \sum_{j=1}^{n_{\pi}} \dot{n}_{j,bss} \quad , \quad (2.2)$$

$$\dot{n}_{i,bss} = \dot{n}_{bss} z_{i,bss} = \sum_{j=1}^{n_{\pi}} \dot{n}_{j,bss} z_{i,j,bss} \quad , \quad (2.3)$$

$$z_{i,bss} = \sum_{j=1}^{n_{\pi}} \beta_{j,bss} z_{i,j,bss} \quad , \quad (2.4)$$

де $\beta_{j,bss}$ визначається як частка загальної молярної швидкості потоку, присутня у фазі j перед боковим потоком і виражається як:

$$\beta_{j,bss} = \frac{\dot{n}_{j,bss}}{\dot{n}_{bss}} \quad . \quad (2.5)$$

Визначаючи α_j як відведену фракцію в бічному потоці фази (j) на молярній основі, отримують такі баланси

$$\dot{n}_{ass} = \dot{n}_{bss} - \sum_{j=1}^{n_{\pi}} \alpha_j \dot{n}_{j,bss} \quad . \quad (2.6)$$

Тоді

$$\frac{\dot{n}_{ass}}{\dot{n}_{bss}} = 1 - \sum_{j=1}^{n_{\pi}} \alpha_j \frac{\dot{n}_{j,bss}}{\dot{n}_{bss}} = 1 - \sum_{j=1}^{n_{\pi}} \alpha_j \beta_{j,bss} \quad . \quad (2.7)$$

Молярна швидкість потоку компонента (i), відведеного в бічний потік, виражається як:

$$\dot{n}_{i,ass} = \dot{n}_{ass} z_{i,ass} = \dot{n}_{bss} z_{i,bss} - \sum_{j=1}^{n_{\pi}} \alpha_j \dot{n}_{j,bss} z_{i,j,bss} \quad . \quad (2.8)$$

Потім

$$\frac{\dot{n}_{ass}}{\dot{n}_{bss}} z_{i,ass} = z_{i,bss} - \sum_{j=1}^{n_{\pi}} \alpha_j \frac{\dot{n}_{j,bss}}{\dot{n}_{bss}} z_{i,j,bss} = z_{i,bss} - \sum_{j=1}^{n_{\pi}} \alpha_j \beta_{j,bss} z_{i,j,bss} \quad , (2.9)$$

$$(1 - \sum_{j=1}^{n_{\pi}} \alpha_j \beta_{j,bss}) Z_{i,ass} = Z_{i,bss} - \sum_{j=1}^{n_{\pi}} \alpha_j \beta_{j,bss} Z_{i,j,bss} \quad , \quad (2.10)$$

$$Z_{i,ass} = \frac{Z_{i,bss} - \sum_{j=1}^{n_{\pi}} \alpha_j \beta_{j,bss} Z_{i,j,bss}}{1 - \sum_{j=1}^{n_{\pi}} \alpha_j \beta_{j,bss}} \quad . \quad (2.11)$$

Щоб зв'язати $\beta_{j,bss}$ і $\beta_{j,ass}$, можна вивести таке співвідношення:

$$\beta_{j,ass} = \frac{\dot{n}_{j,ass}}{\dot{n}_{ass}} = \frac{\dot{n}_{j,bss}(1 - \alpha_j)}{\dot{n}_{bss} - \sum_{j=1}^{n_{\pi}} \alpha_j \dot{n}_{j,bss}} = \frac{\beta_{j,bss}(1 - \alpha_j)}{1 - \sum_{j=1}^{n_{\pi}} \alpha_j \beta_{j,bss}} \quad . \quad (2.12)$$

Розташування ударної хвилі.

Виникнення та положення ударної хвилі є ключовим явищем у надзвуковій сепарації газу. Після того, як потік стає надзвуковим за звуженням, тиск і температура значно падають, що дозволяє конденсувати воду, кислі гази та важкі вуглеводні. Після відділення конденсованої фази потік має повернутися до газоподібної фази під високим тиском, щоб забезпечити належний потік у трубопроводі. Відновлення початкового стану потоку дозвукового, високого тиску та однофазного є функцією ударної хвилі.

Положення ударної хвилі істотно впливає на продуктивність сопла [14, 19]. Розташування ударної хвилі в розбіжному соплі залежить від граничних умов, а саме тиску та сили завихрення [13, 14, 18]. Визначення розташування ударної хвилі пов'язане з шістьма термодинамічними змінними, а саме температурою, тиском, густиною, ентропією, ентальпією та швидкістю потоку. Усі ці змінні проходять раптову, незворотну зміну своїх значень, за винятком ентальпії, яка зберігається через ударну хвилю.

Рівняння стану.

Оцінка властивостей рідини здійснюється за допомогою рівняння стану (EOS). Помилкова оцінка *PVT* даних призводить до поганого

прогнозування властивостей потоку. Таким чином, а EOS реального газу необхідне для розрахунку термодинамічних властивостей у широкому діапазоні умов, включаючи високий тиск і низькі температури.

На додаток до даних PVT, рівняння стану надає значення залишкової ентальпії, залишкової ентропії, коефіцієнтів летучості та термодинамічної швидкості звуку. Кубічні рівняння стану є цінними для прогнозування даних тиску пари, даних PVT та даних рівноваги пар-рідина. Ці рівняння можна виразити в такому загальному форматі:

$$P = \frac{RT}{v - b} - \frac{\xi}{(v + c) + (v + d)}, \quad (2.13)$$

де b , c та d константами. Крім того, ξ є функцією температури. Рівняння стану Пенга-Робінсона є одним із найбільш використовуваних рівнянь стану в дослідженнях надзвукового поділу. У порівнянні з більшістю попередніх кубічних рівнянь стану, EOS Пенга-Робінсона має третій параметр α для підвищення точності даних про стисливість [12]. EOS Пенга-Робінсона можна виразити наступним чином

$$P = \frac{RT}{v - b_m} - \frac{a_m \alpha}{v(v + b_m) + b_m(v - b_m)}. \quad (2.14)$$

Параметри a_m і b_m залежать лише від властивостей чистих компонентів і знаходяться з наступних рівнянь:

$$a_i = 0.45724 \frac{R^2 T_{ci}^2}{P_{ci}}, \quad (2.15)$$

$$b_i = 0.0778 \frac{RT_{ci}}{P_{ci}}, \quad (2.16)$$

$$\alpha_i = \left[1 + \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_{ci}}} \right) (0.37464 + 1.54226\omega_i - 0.26992\omega_i^2) \right]^2, \quad (2.17)$$

При роботі з багатокомпонентними сумішами визначення параметрів a і b рівняння стану можна розширити за допомогою наступних правил змішування Ван-дер-Ваальса [19]

$$a_m = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j a_{ij} \quad , \quad (2.18)$$

$$a_{ij} = \sqrt{a_{ii} a_{jj}} (1 - k_{ij}) \quad , \quad (2.19)$$

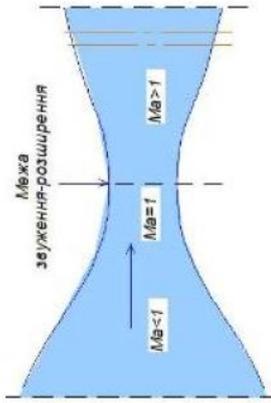
$$b_m = \sum_{i=1}^N x_j b_i \quad . \quad (2.20)$$

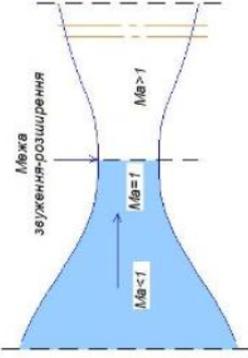
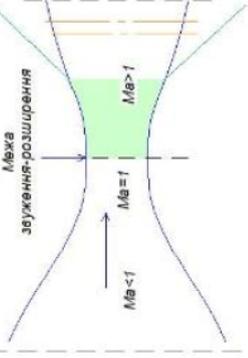
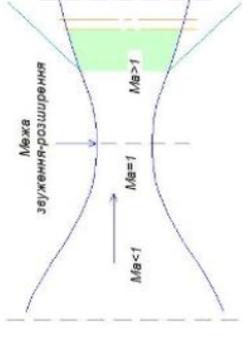
У цій роботі використовується EOS Пенга-Робінсона. Однак розробка та формулювання моделі є загальними та дозволять використовувати рівняння стану більшої складності в майбутньому.

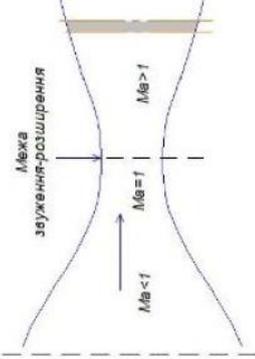
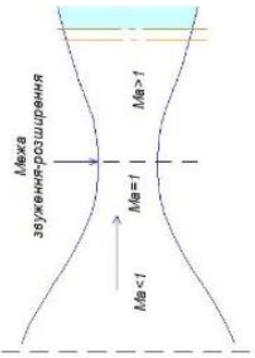
2.3 Основні рівняння для теоретичних досліджень

Основні рівняння виводяться з балансів маси, енергії, ентропії та імпульсу. Конкретні суттєві баланси перераховані в таблиці 2.1 на основі різних секцій у звужуючому-розширюючому соплі.

Таблиця 2.1 Основні рівняння

Опис	Рівняння	Секція
Загальний баланс між входом і виходом сопла, щоб перевірити, чи є потік звуковий або надзвуковий	$\frac{A_t u_t}{v_t(T_t, P_t, z_{in})} = \frac{A_{out} u_{out}}{v_{out}(T_{out}, P_b, z_{in})}$	
	$h_{in} + M_{in} \frac{u_{in}^2}{2} = h_t(T_t, P_t, z_{in}) + M_{in} \frac{u_t^2}{2}$	
	$h_{in} + M_{in} \frac{u_{in}^2}{2} = h_{out}(T_{out}, P_{out}, z_{in}) + M_{in} \frac{u_{out}^2}{2}$	
	$s_{in} = s_t(T_t, P_t, z_{in})$	
	$s_{in} = s_{out}(T_{out}, P_b, z_{in})$	

Опис	Рівняння	Секція
Ізентропічний шлях від входу у звуження використовується для визначення умов у звуженні	$h_{in} + M_{in} \frac{u_{in}^2}{2}$ $= h_t(T_t, P_t, z_{in}) + M_{in} \frac{a((T_t, P_t, z_{in}))^2}{2}$ $s_{in} = s_t(T_t, P_t, z_{in})$	
Перша ділянка надзвукової області після звуження розташована до бічних потоків	$\frac{A_t u_t}{v_t(T_t, P_t, z_{in})} = \frac{A_{bss} u_{bss}}{v_{bss}(T_{bss}, P_{bss}, z_{in})}$ $h_t + M_{in} \frac{a((T_t, P_t, z_{in}))^2}{2}$ $= h_{bss}(T_{bss}, P_{bss}, z_{in}) + M_{in} \frac{u_{bss}^2}{2}$ $s_t = s_{bss}(T_{bss}, P_{bss}, z_{in})$	
Після вилучення рідина, що залишилася, тече ізентропічно, доки не відбувається певна ударна хвиля. Розділ 4.2.4	$\frac{A_{pss} u_{pss}}{v_{pss}(T_{pss}, P_{pss}, z_{pss})} = \frac{A_2 u_2}{v_2(T_2, P_2, z_{pss})}$ $h_{pss}(T_{pss}, P_{pss}, z_{pss}) + M_{pss} \frac{u_{pss}^2}{2}$ $= h_2(T_2, P_2, z_{pss}) + M_{pss} \frac{u_2^2}{2}$ $s_{pss} = s_2(T_2, P_2, z_{pss})$	

Опис	Рівняння	Секція
Система поперек ударної хвилі є неізентропічною. Точки 2 і 2* позначають розташування вище і нижче за течією ударної хвилі	$\frac{A_2 u_2}{v_2(T_2, P_2, z_{pss})} = \frac{A_{2^*} u_{2^*}}{v_{2^*}(T_{2^*}, P_{2^*}, z_{pss})}$ $h_2 + M_{pss} \frac{u_2^2}{2}$ $= h_{2^*}(T_{2^*}, P_{2^*}, z_{pss}) + M_{pss} \frac{u_{2^*}^2}{2}$	
	$P_{2^*} - P_2 = \frac{M_{pss} u_2}{v_2(T_2, P_2, z_{pss})} (u_2 - u_{2^*})$	
Остання ділянка по ізентропійному напрямку від ударної хвилі до площини виходу	$\frac{A_{2^*} u_{2^*}}{v_{2^*}(T_{2^*}, P_{2^*}, z_{pss})} = \frac{A_{out} u_{out}}{v_{out}(T_{out}, P_{out}, z_{pss})}$ $h_{2^*} + M_{pss} \frac{u_{2^*}^2}{2}$ $= h_{out}(T_{out}, P_b, z_{pss}) + M_{pss} \frac{u_{out}^2}{2}$ $s_{2^*} = s_{out}(T_{out}, P_b, z_{pss})$	

2.4 Визначення тиску та температури при газодинамічному розділенні сумішей

Газодинамічний метод розділення газових сумішей заснований на наданні газовому потоку високої швидкості (аж до надзвукової) для створення швидкісної (статичної) температури ($T_{ст}$), яка свідомо нижче температури гальмування на вході в струменевий апарат (T_b). За таким

принципом побудовані конструкції газодинамічних осушувачів, вихрових сепараторів, 3S-сепараторів і вихрових труб (ВТ). Низька статична температура в цих пристроях сприяє інтенсивній конденсації домішок з газових сумішей для подальшої сепарації рідкої фази і отримання кондиційного продукту.

Статична температура, як показник переходу потенційної енергії тиску газу в кінетичну енергію потоку, що рухається, визначається співвідношенням:

$$T_{cm} = T_g - \frac{v^2}{2 \cdot C_p} \quad (2.21)$$

Із формули (2.21) видно, що статична температура тим нижча, чим вища швидкість витікання газу. Розрахунок T_{ct} зручно вести за допомогою основного критерію подібності для швидкісних газових течій - числа Маха (M) за формулою:

$$M = \frac{v}{a}, \quad (2.22)$$

де $a = \sqrt{\kappa \cdot g \cdot R \cdot T}$ - швидкість звуку.

При цьому якщо $M < 1$, то течія газу дозвукова, при $M = 1$ - звукова (критична) і при $M > 1$ - надзвукова. Відомі термодинамічні залежності, за якими можна розрахувати T_{ct} за відомим значенням числа Маха [3,4]. Так, для $M < 1$ статична температура буде дорівнювати:

$$T_{cm} = T_g [1 - M^2 (\kappa_g - 1) (\kappa_g + 1)^{-1}] \quad (2.23)$$

при $M = 1$

$$T_{cm} = T_g [2(\kappa_g + 1)^{-1}]; \quad (2.24)$$

при $M > 1$

$$T_{cm} = \frac{T_g [2(\kappa_g + 1)^{-1}] \cdot [1 + 0,5(\kappa_g - 1)]}{1 + 0,5(\kappa_g - 1) \cdot M^2} \quad (2.25)$$

З наведених рівнянь видно, що для оцінки $T_{ст}$ при $M = 1$ потрібно знати тільки T_b і показник адиабати $k_{ст}$. При визначенні $T_{ст}$ для дозвукового і надзвукового витікань необхідно також знати число Маха. Якщо параметр M відомий, то можна розрахувати не лише $T_{ст}$, але не менш важливий параметр для процесу конденсації - статистичний тиск $P_{ст}$. Його легко вивести з нижче наведеного співвідношення (2.27) [3]:

$$M^2 = 2(k_g - 1)^{-1} \cdot [(P_g / P_{ст})^{(k_g - 1)/k_g} - 1]. \quad (2.26)$$

Провівши необхідні перетворення, отримаємо:

$$P_{ст} = \sqrt[n]{\frac{2 \cdot (P_g)^n}{M^2 \cdot (k_g - 1)}}, \quad (2.27)$$

$$n = \frac{(k_g - 1)}{k_g}. \quad (2.28)$$

У формулі (2.28) є одна незалежна змінна - це число Маха. Звідси випливає, що при $M = 0$ (стаціонарний стан газу) $P_{ст} = P_m$.

Але як тільки з'являється швидкість, тобто $M > 0$, то статичний тиск стає нижче вхідного ($P_{ст} < P_m$). Таким чином, при розгоні газу в профільованому тракті газодинамічного апарату відбувається одночасне зниження і статичної температури, і статичного тиску.

Тому процес конденсації компонентів в швидкісному струмені визначається сукупністю цих факторів. Але якщо зниження $T_{ст}$ сприяє механізму конденсації, то зменшення $P_{ст}$ зменшує інтенсивність цього процесу.

2.5 Моделювання процесу надзвукової сепарації

Моделі T-junction сепаратора.

Моделювати роботу сепараційного обладнання можливо з використанням сучасного програмного забезпечення, але, оскільки, T-junction сепаратор відноситься до нестандартного сепараційного

обладнання, тому потрібно визначитися з моделлю процесу надзвукової сепарації. При огляді літературних джерел було розглянуто різні схеми, що використовуються для моделювання. За основу прийнято наступну схему (рис. 2.1, 2.2).

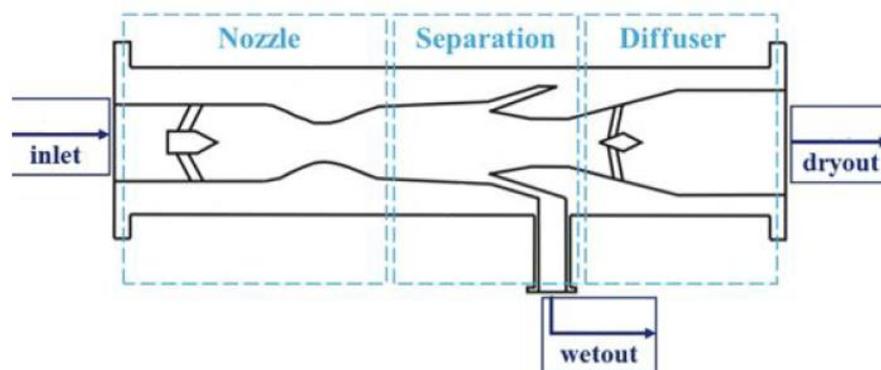


Рис. 2.1 – Принципова схема надзвукового сепаратора

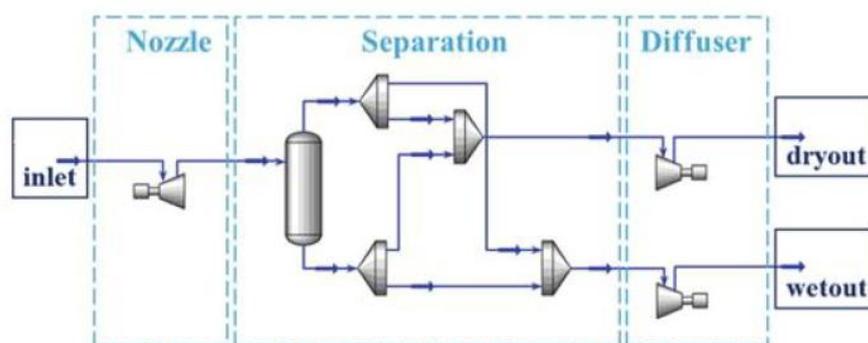


Рис. 2.2 – Еквівалентна схема надзвукового сепаратора в HYSYS

Функції зрідження, розділення та дифузії в надзвуковому газовому сепараторі мають бути еквівалентно замінені та ефективно спрощені в програмному забезпеченні моделювання процесу HYSYS. Варто зазначити, що два розділених потоки рідини не є чистим газом або рідиною у справжньому надзвуковому сепараторі. Отже, необхідно перерозподілити і рекомбінувати ці два потоки певним чином і в певній пропорції, щоб

наблизитися до реальної продуктивності надзвукового сепаратора. А далі витікають відповідно подвійні перегруповані потоки.

Відповідно до принципів роботи надзвукового сепаратора та функцій модулів HYSYS еквівалентною альтернативою є наступний. При надходженні в першу робочу секцію, сопло, газ розширюється адіабатично, і швидкість потоку зростає до надзвукової. При цьому його температура і тиск різко падають, і в цільових компонентах відбувається фазовий перехід і конденсація. Розширювальний модуль є еквівалентом насадки, реалізуючи холодильний ефект розширення та розрідження ключових компонентів. Після утворення високошвидкісного газорідинного потоку суміш надходить у другу робочу секцію циклону та сепарації, а краплі, що обертаються, видаляються через бічний вихід, таким чином реалізуючи розділення газу та рідини. Відповідно модульна комбінація сепаратора, трійників і змішувачів еквівалентна внутрішній циклон і сепараційна секція. Після поділу двофазної суміші сухий газ уповільнює і підвищує температуру і тиск в ділянці дифузії в кінцевій секції дифузора. А компресорний модуль еквівалентний дифузійній секції для відновлення тиску та температури.

У процесі моделювання HYSYS надзвукової сепарації допускаються такі припущення:

- у цій моделювальній роботі вибрано рівняння стану Пенга-Робінсона (PR EOS) як модель фізичних властивостей у HYSYS [2, 20], яка підходить для моделювання переробки газу. Стаціонарний режим течії всередині надзвукового сепаратора і надзвуковий процес сепарації.

- надзвуковий сепаратор може працювати нормально, а його очисна здатність (100 кг/год) у процесі моделювання перевищує мінімальну критичну пропускну здатність.

- коли об'єктом обробки є вологе повітря, коефіцієнти потоку розділень у газозфазних і рідкофазних трійниках, а саме коефіцієнти внутрішнього розподілу надзвукового сепаратора, відповідно встановлюються як набір емпіричних коефіцієнтів (0,7 + 0,3 і 0,32 + 0,68).

Коли об'єктом обробки був природний газ, коефіцієнти потоку розривів у двох трійниках були встановлені на інший набір емпіричних коефіцієнтів (0,75 + 0,25 і 0,002 + 0,998), відповідно.

- потоковий потік у всьому надзвуковому сепараторі можна розглядати як адіабатичний стан. В еквівалентному модулі адіабатичний ККД детандера та компресора встановлено на 99,00%.

- Моделювання еквівалентного модуля ідеально підходить для того, щоб він міг ефективно контролювати втрати енергії, викликані ударною хвилею та вторинною газифікацією конденсату.

- тиск і температура на виході з форсунок є ефективними мінімальними значеннями, які безпосередньо впливають на розділення.

На основі проведених досліджень пропонуємо нову схему для моделювання T-junction – сепарації. Засоби моделювання зображено на рисунку 2.3. Повна мнемосхема, отримана в результаті моделювання засобами Aspen Hysys, показана на рисунку 2.4.

Робоче середовище моделювання включає в себе необхідні для вирішення поставленого завдання складові компоненти сировини, об'єкти (матеріальні і енергетичні потоки, технологічне обладнання, засоби контролю і регулювання процесу, логічні операції) і утиліти.

Як термодинамічної пакета рівнянь для моделювання було вибрано рівняння стану Пенга–Робінсона. Для моделювання пристрою T-junction – сепаратора стандартним засобами, необхідно відтворити 3 фізичних процесу, що протікають в апараті:

- розширення вхідного потоку газу і його охолодження;
- сепарація сконденсованого газорідного потоку на газовий і газорідний потоки;
- компримування розділеного газового потоку.

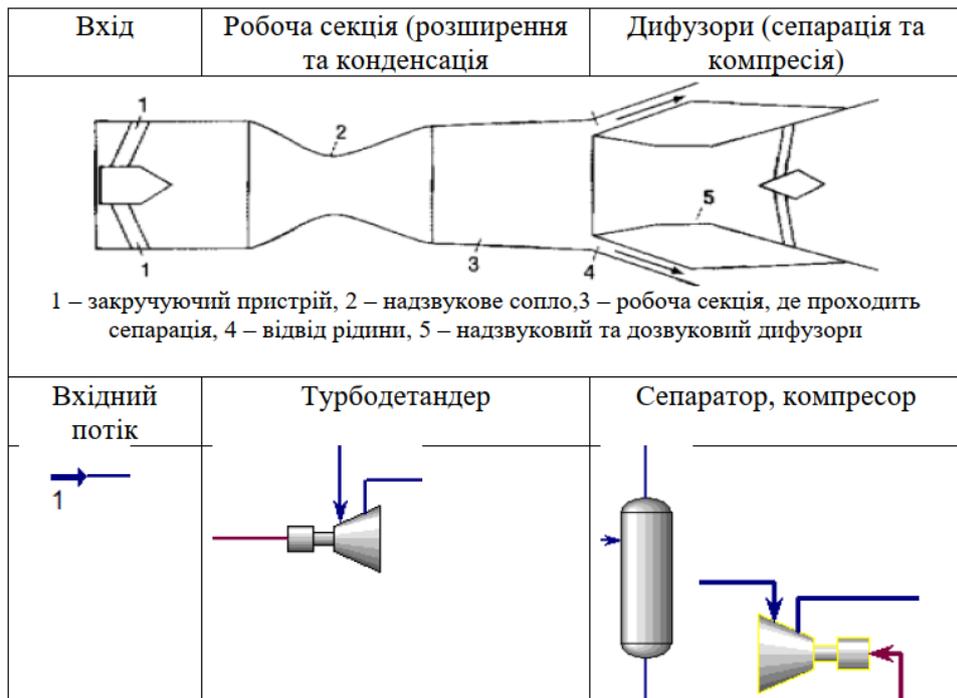


Рис. 2.3 – Засоби моделювання

Необхідно також зробити застереження, що програмне середовище дає найбільш точні результати при моделюванні рівноважних процесів.

Оскільки процес, що протікає в надзвуковому сепараторі нерівноважний, даний спосіб моделювання розглядається в якості першого наближення до реально протікаючих процесів.

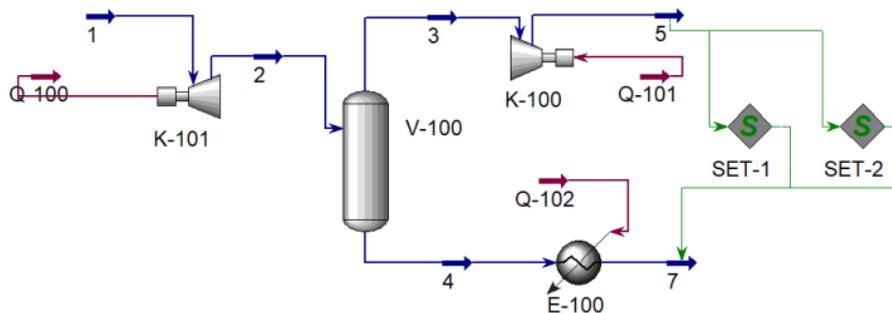


Рис. 2.4 – Мнемосхема, отримана в результаті моделювання засобами Aspen Hysys

Оскільки робоча частина T-junction –сепаратора, в якій відбувається розширення газу, представлена в моделюванні турбодетандером К– 100, то подається на прийом турбодетандера потік газової сировини (feed vapour) не повинен містити рідкої фази. Для цього перед К–100 встановлений двофазний сепаратор V– 102. Таким чином, процеси, що протікають в робочій частині надзвукового сепаратора симулюються в середовищі за допомогою двофазного сепаратора і турбодетандера. Значення перепаду тиску через турбодетандер задано рівним 70% від вхідного тиску.

Для відтворення процесів, що протікають в дифузорах T-junction – сепаратора (поділ на газожидкостної і газовий потоки; часткове відновлення початкового тиску потоку) програмними засобами використовувалися двофазний сепаратор V– 100 з частковим (15%) перенесенням газової фази в потік рідини, і компресор К– 101, робота якого здійснюється за рахунок генерується детандером К– 100 енергетичного потоку Q– 100.

Продукти надзвукового сепаратора представлені двома матеріальними потоками – газовим (gas phase) і газорідним (gas– liquid phase). Характеристики продуктових потоків (тиск і температура), відповідно до режиму роботи T-junction – сепаратора, наводяться до однакових значень за допомогою логічних операцій вирівнювання тиску і температури (SET– press, SET– temp).

Обґрунтування вибору моделі T-junction сепаратора.

Для обґрунтування вибору типу моделі проведемо дослідження для газу вивірювання. Його компонентний склад наведено на рис. 2.5.

Вплив тиску на витяг цільових компонентів. Для сировинного потоку вивчалася залежність вилучення фракції С3 + (% мас.) В сконденсовану фазу газорідного потоку (gas– liquid phase) від тиску на вході в T-junction – сепаратор в діапазоні 7– 15 МПа кроком 1МПа при температурі сировини +10 ° С. В таблиці 2.2, А.1 та на рисунках 2.5-2.8 наведено результати досліджень.

	Mass Fractions
Methane	0,5713
Ethane	0,2142
Propane	0,0905
i-Butane	0,0146
n-Butane	0,0161
i-Pentane	0,0021
n-Pentane	0,0038
Nitrogen	0,0007
CO2	0,0840
n-Hexane	0,0007
n-Heptane	0,0018
H2O	0,0002

Рис. 2.5 – Компонентний склад газу вивітрювання

Дослідження проведемо для обох моделей. *Основна модель* (рис.2.6).

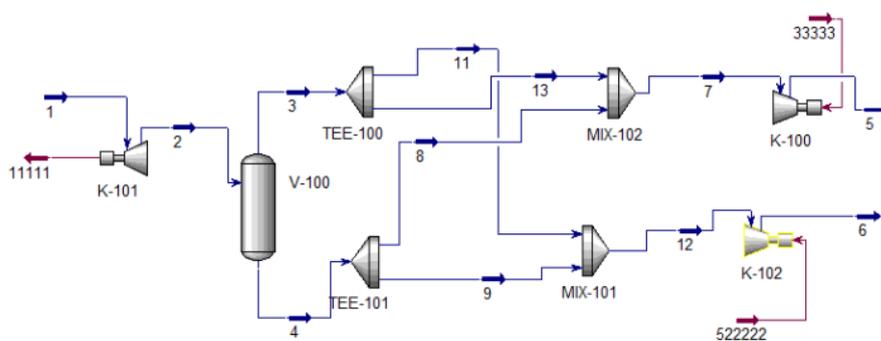


Рис. 2.6 – Схема 1 моделювання процесу сепарація

Таблиця 2.2 – Результати досліджень

Тиск, МПа	Газ, м ³ /добу	Газ, т/рік	Конденса т, т/рік	Температура точки роси по вуглеводнях, °C	Температура точки роси по волозі, °C
7	1883,52	580,42	295,58	-37,23	-41,69
8	1848,38	564,30	311,70	-37,95	-42,34
9	1810,79	548,01	327,99	-38,77	-43,03
10	1771,83	532,01	343,99	-39,62	-43,63
11	1732,77	516,78	359,22	-40,41	-44,05
12	1694,70	502,66	373,34	-41,14	-44,25
13	1658,27	489,82	386,18	-41,86	-44,20
14	1623,69	478,19	397,81	-42,73	-42,72
15	1590,93	467,69	408,31	-44,12	-43,53

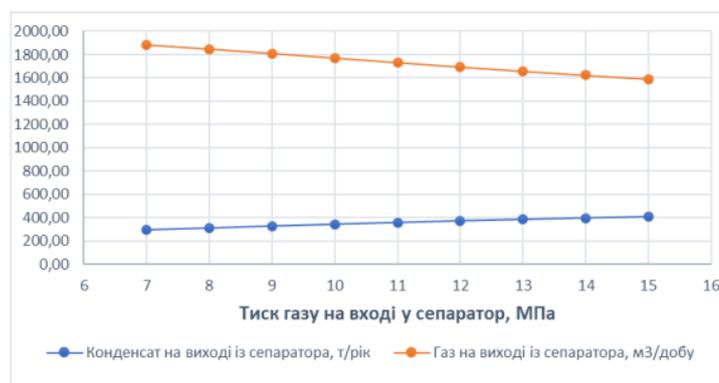


Рис. 2.8 – Графік залежності матеріальних потоків вилучення газу та конденсату від тиску на вході в апарат при $T_c = 283 \text{ K}$

Отримані в ході дослідження дані залежності вилучення фракції $C_3 +$ від тиску сировини дозволяють зробити висновок про те, що в розглянутому діапазоні тисків витяг цільових компонентів зростає не лінійно. На відмітці 12,5 МПа вміст фракції C_3+ практично не змінюється. Це підтверджує і графік 2.6, на якому маса конденсату за рік, починаючи від тиску у 12,5 МПа майже не змінюється. Температура точок роси по волозі та вуглеводням вилученого газу відповідають вимогам Кодексу газотранспортної системи України.

Вплив температури на вихід цільових компонентів. Результати дослідження залежності вилучення компонентів C_3+ в% мас. від температури вхідного сировинного потоку при тиску на вході в пристрій 10 МПа представлені в таблиці 2.3, А-1 та рис. 2.9-2.11.

Таблиця 2.3 – Результати досліджень

Температура, °С	Газ, м³/добу	Газ, т/рік	Конденсат, т/рік	Температура точки роси по вуглеводням, °С	Температура точки роси по волозі, °С
10	1771,83	532,01	343,99	-39,62	-43,63
11	1779,78	535,49	340,51	-39,00	-42,95
12	1787,51	538,89	337,11	-38,39	-42,28
13	1795,04	542,24	333,76	-37,78	-41,61
14	1802,41	545,53	330,47	-37,18	-40,95
15	1809,63	548,78	327,22	-36,58	-40,29
16	1816,69	551,98	324,02	-35,99	-39,64



Рис. 2.11 – Графік залежності матеріальних потоків вилучення газу та конденсату від тиску на вході в апарат при $P = 10$ МПа

Для всіх розглянутих потоків сировини відхилення графіків від лінійності незначне.

Необхідно також відзначити, що температура, на відміну від тиску, впливає антібатно на вихід зрідженого продукту.

Дослідження для моделі 2 (рис.2.12).

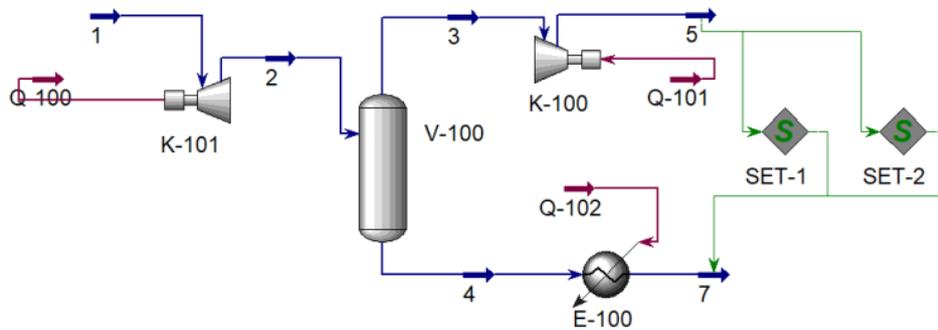


Рис. 2.12 – Схема 2 моделювання процесу сепарація

Аналогічні розрахункові дослідження виконуємо і для схеми 2. Таблиці 2.4, 2.5 та рис. 2.13-2.18.

Таблиця 2.4 – Результати досліджень

Тиск, МПа	Газ, м ³ /добу	Газ, т/рік	Конденсат, т/рік	Температура точки роси по вуглеводнях, °С	Температура точки роси по волозі, °С
7	2450,76	744,15	131,85	-42,24	-48,74
8	2401,34	722,90	153,10	-42,54	-49,27
9	2348,95	701,47	174,53	-43,01	-49,93
10	2294,88	680,40	195,60	-43,54	-50,57
11	2240,66	660,28	215,72	-44,06	-51,04
12	2187,59	641,51	234,49	-44,55	-51,24
13	2136,39	624,22	251,78	-45,10	-51,12
14	2087,17	608,32	267,68	-45,86	-50,72
15	2039,84	593,67	282,33	-47,43	-47,43

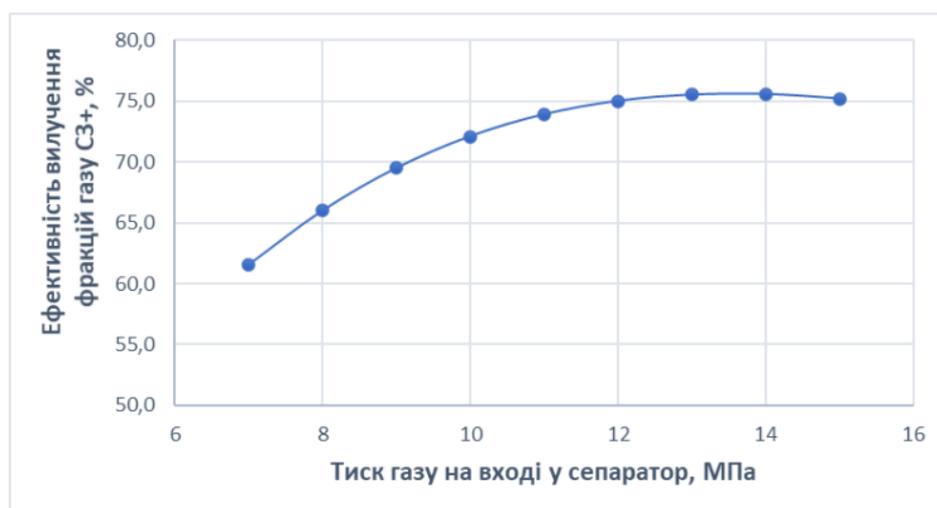


Рис. 2.13 – Графік залежності вилучення цільових компонентів C3+ від тиску на вході в апарат при Tс = 283 К

Таблиця 2.5 – Результати досліджень

Температура, °С	Газ, м³/добу	Газ, т/рік	Конденсат, т/рік	Температура точки роси по вуглеводнях, °С	Температура точки роси по волозі, °С
10	2294,88	680,40	195,60	-43,54	-50,57
11	2305,54	684,88	191,12	-42,97	-49,72
12	2315,93	689,27	186,73	-42,41	-48,91
13	2326,07	693,59	182,41	-41,85	-48,12
14	2336,00	697,83	178,17	-41,30	-47,35
15	2345,72	702,02	173,98	-40,76	-46,60
16	2355,25	706,14	169,86	-40,21	-45,87
17	2364,59	710,21	165,79	-39,67	-45,15
18	2373,75	714,23	161,77	-39,13	-44,45
19	2382,73	718,19	157,81	-38,59	-43,76
20	2391,48	722,07	153,93	-38,06	-43,09

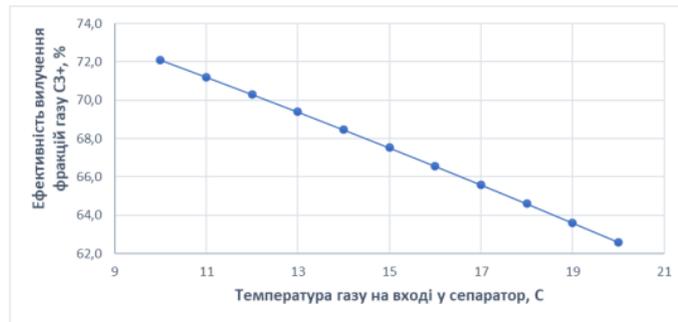


Рис. 2.16 – Графік залежності вилучення цільових компонентів C3 + від тиску на вході в апарат при P = 10 МПа



Рис. 2.17 – Графік залежності температура точки роси по волозі та вуглеводням вихідного потоку газу від тиску на вході в апарат при P = 10 МПа

2. Збільшення температури сирого газу для двох схем знижує ступінь вилучення цільових компонентів, на дослідженому інтервалі температур залежність лінійна, обернено пропорційна.

3. Температура точки роси за вологою °C при абсолютному тиску газу 3,92МПа не перевищує мінус 8 (-8), температура точки роси за вуглеводнями при температурі газу не нижче 0°C не перевищує 0° C, отримана в результаті моделювання при всіх режимах роботи має великий запас значень, що говорить про високу ефективність T-junction сепаратора з метою досягнення нормативних показників по ТТР.

4. Аналіз моделювання T-junction сепарації за двома варіантами, показав що за ефективністю вилучення C3+ компонентів кращий варіант 2, відсоток видалення цих компонентів складає відповідно 70% та 75% відповідно.

Розділ 3 Технологія збору й підготовки вуглеводневої продукції на газоконденсатному родовищі

3.1 Технологічна схема збору й підготовки вуглеводневої продукції на родовищі

3.1.1. Опис технологічної схеми підготовки газу

УКПГ призначена для: збору продукції газоконденсатних свердловин ГКР, підготовки природного газу (методом НТС) до транспортування в магістральний газопровід; компримування природного газу на дотискній компресорній станції (ДКС) та транспортування зкомпримованого газу на УППГ; підготовки та стабілізації газового конденсату для перевезення автомобільним транспортом.

Установка комплексної підготовки газу (УКПГ) працює за схемою низькотемпературної сепарації (НТС) із застосуванням холоду, отриманого при дроселюванні газу між першою та другою ступенями сепарації за рахунок ефекту Джоуля-Томсона.

На УКПГ підготовка газу (методом НТС) здійснюється (за необхідністю) на двох технологічних лініях (висконапірна та низьконапірна) загальною пропускною здатністю 2 млн. м³/добу. Висконапірна технологічна лінія складається з трьох сепараторів першої ступені (С-1-1, С-1-2, С-1-3) та блоків теплообмінників Т-1-1, Т-1-2. Низьконапірна лінія складається із сепаратора першої ступені С-1-Д. Сепаратори другої ступені С-2-1, С-2-2 є загальними для висконапірної та низьконапірної ліній.

Для проведення заміру продуктивності індивідуальної свердловини призначена повноцінна дослідна технологічна лінія (Технологічна лінія №2). Загальною пропускною здатністю 300.600 тис. м³/добу. яка складається з сепаратора першої ступені С-1, теплообмінника 1-1, сепаратора другої ступені С-2.

Висновки до розділу 3

Проаналізовано діючу систему підготовки вуглеводневої продукції газоконденсатного родовища. Вибрано основні дані для подальшого моделювання.

Встановлено, що газ вивітрювання з розділювачів першої ступені направляється на вхід в сепаратори другої ступені. Газ вивітрювання з розділювача другої ступені направляється на низьку сторону ежектора. Газ вивітрювання з ємності дегазатора конденсату направляється на компресор.

Також у разі необхідності існує можливість направити газ вивітрювання з розділювача другої ступені та з ємності дегазатора конденсату на компресора або ежектор. Також, при зупинці компресору, є можливість направити даний газ на сепаратор газу власних потреб. В разі відсутності споживання газу - надлишок газу вивітрювання з сепаратору газу власних потреб скидається на факел. Також існує можливість здійснювати подачу газу вивітрювання з розділювачів на компресор утилізації низьконапірних газів. В разі відсутності споживання газу - надлишок газу вивітрювання з буферної ємності скидається на факел.

Розділ 4 Моделювання надзвукової технології на газоконденсатному родовищі

За об'єкт моделювання обрана система підготовки вуглеводнів УКПГ. Вона має потужність для: газу – 2 млн.м³/добу, газового конденсату – 150 т/добу, пластової води – 52 т/добу.

Процес підготовки газу та конденсату на УКПГ для подальшого транспортування включає: збір газу на вузлі вхідних ниток УКПГ; сепарацію газу на вхідних сепараторах першого ступеня, попереднє охолодження на рекуперативних теплообмінниках (для газу високонапірних свердловин) дроселювання та сепарацію на низьконапірних сепараторах другого ступеня, підігрів на рекуперативних теплообмінниках (для газу високонапірних свердловин) перед подачею в магістральних газопровід; відокремлення газового конденсату від супутно-пластової води (СПВ) від конденсату в дегідраторі В-1; кінцеве відокремлення супутно-пластової води (СПВ) від газового конденсату в дегідраторі В-1; дегазація газового конденсату на дегазаторі В-2; остаточне розгазовування конденсату на трапі та в ємностях зберігання конденсату (як на УКПГ – Е-4-4, так і на УПЗГ).

Підготовка газу здійснюється на двох технологічних лініях (високонапірній та низьконапірній) загальною проектною продуктивністю в 2 млн м³/добу. Додатково, для виконання дослідження свердловин на продуктивність передбачена замірна технологічна лінія продуктивністю 300-600 тис. м³/добу.

Газоводоконденсатна суміш (ГВКС) з експлуатаційних свердловин ГКР на газопроводах-шлейфах поступає на вузол вхідних ниток УКПГ, де за допомогою регулюючих штуцерів задається технологічний режим роботи системи «пласт-свердловина-шлейф». Також на вузлі вхідних ниток відбувається розподіл газу (свердловин) на високонапірну та низьконапірну технологічні лінії або на замірну лінію для проведення продуктивності.

Газ, отриманий в результаті технологічного процесу, направляється на вузол комерційного обліку і далі транспортується в газопровід-підключення до магістрального газопроводу.

Конденсат, отриманий після стабілізації до атмосферного тиску і відділений від підтоварної води, відвантажується з ємностей конденсатного парку в автоцистерни.

Супутно-пластова вода, що в результаті технологічного процесу відділилась з конденсату, направляється байпасомна ємності зберігання пластової води.

Резервуарний парк УКПГ включає

- Ємності збору конденсату – 50 м³ (1x50 м³);
- Ємності збору конденсату (УПЗК) – 1375,5 м³ (1x50 м³, 12x70 м³, 5x77,5 м³);
- Ємності збору пластової води – 150 м³ (3x50 м³);
- Ємності зберігання метанолу – 75 м³ (3x25 м³);
- Ємності зберігання інгібітору корозії – 25 м³.

4.1 Вихідні дані для моделювання

До вихідних даних моделювання множимо віднести наступні параметри. I група – параметри елементів моделі. До неї відносять параметри насосів; компресорів; запірно-регулюючої арматури; конструктивних елементів свердловин; сепараторів; розділювачів; дегазаторів; охолоджувачів; підігрівачів; інжекційних клапанів (точок подачі інгібіторів); адсорберів тощо.

До II групи параметрів відносять компонентний склад вуглеводнів (флюїдів), вміст води в газі, параметри моделей емульсій, асфальтосмолопарафінових відкладень, характеристики інгібіторів (корозії

та гідратоутворення) та PVT властивості, які завантажуються у вигляді окремого файлу.

Третя група вихідних даних – це геометрія і параметри свердловин: траєкторія, інтервали перфорації свердловин у вимірних або абсолютних глибинах, внутрішній діаметр і шорсткість НКТ, внутрішній діаметр, шорсткість і еквівалентна довжина фонтанної арматури, розташування компонентів моделі (насоси, сепаратори і т.д), розташування датчиків, температура порід-колекторів, ефективна теплопровідність (між НКТ і оточуючими породами).

До четвертої групи параметрів можливо віднести геометрію та параметри трубопроводів та шлейфів: довжина і профіль; внутрішній діаметр і шорсткість; товщина стінки трубопроводу; товщина і теплопровідність теплоізоляції трубопроводу; розташування «точкових» компонентів моделі; розташування датчиків; температура зовнішнього середовища; ефективна теплопровідність (між трубопроводом і зовнішнім середовищем); схема з'єднання трубопроводів і розміщення свердловин.

П'ята група вихідних даних являє собою дані для калібрування моделі: зміни в конструкції свердловин і системі трубопроводів (зміна колони НКТ, заміна насоса на більш потужний, переукладання трубопроводів і т. д.); зміни в робочих параметрах обладнання (зміна потужності насоса, прохідного діаметру штуцера і т.п.); зміни значення тисків, температур і дебітів.

В результаті отримано графіки розподілу тисків, температур, відношення швидкостей ерозійного зносу.

Дані для прогнозних розрахунків: фіксоване або мінімальне значення тиску в кінцевій точці системи збору; цільове (планове) або максимальне значення видобутку нафти або газу або профіль видобутку нафти або газу по роках, включаючи максимальне значення; плановані (можливі) зміни системи трубопроводів; наявні додаткові обмеження (на видобуток води, швидкість потоку, видобуток газу або конденсату, споживання електроенергії та т. д.); прогнозні склади флюїду; тиск на виході УКПГ (або

4.2 Результати моделювання існуючої та удосконаленої технологічної схеми підготовки вуглеводнів

Результати моделювання існуючої схеми підготовки вуглеводнів наведено на рисунку 4.2.

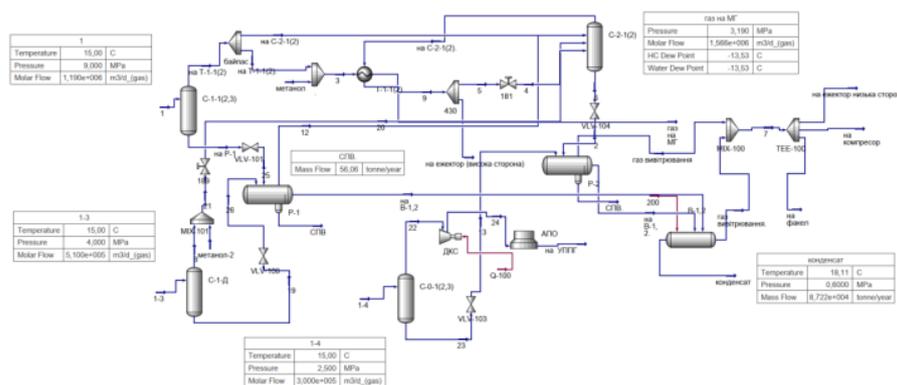


Рис. 4.2 – Моделювання існуючої схеми підготовки вуглеводнів

На рисунку наведені вхідні параметри газу по 3 лініях та наведені параметри підготовленого газу, газу вивітрювання, конденсату та супутно-пластової води.

Газ вивітрювання на УКПГ може утилізуватися наступним чином: з розділювача другої ступені направляється на низьку сторону ежектора, з ємності дегазатора конденсату направляється на компресор, також у разі необхідності існує можливість направити газ вивітрювання з розділювача другої ступені та з ємності дегазатора конденсату на компресора або ежектор. Також, при зупинці компресору, є можливість направити даний газ на сепаратор газу власних потреб. В разі відсутності споживання газу - надлишок газу вивітрювання з сепаратору газу власних потреб скидається на факел. Пропонується на УКПГ встановити T-junction надзвуконий сепаратор, і у разі відсутності споживання газу вивітрювання направляти його не на факел, а на цей сепаратор. Модель процесу надзвуконий сепарації із розділу 2 (модель 2). Результати моделювання удосконаленої схеми

підготовки вуглеводнів наведено на рисунку 4.3. Видно, що отримано додатковий конденсат в 1070 т/рік, це порівняно не багато, але також в надзвучовий сепаратор можна подавати газ, який відправляється на ПХУ ближньої УКПГ. Після надзвучової сепарації газу цей газ відповідає вимогам Кодексу газотранспортної системи (зокрема по температурам точки роси по волозі та вуглеводням) і може направлятися в магістральний газопровід.

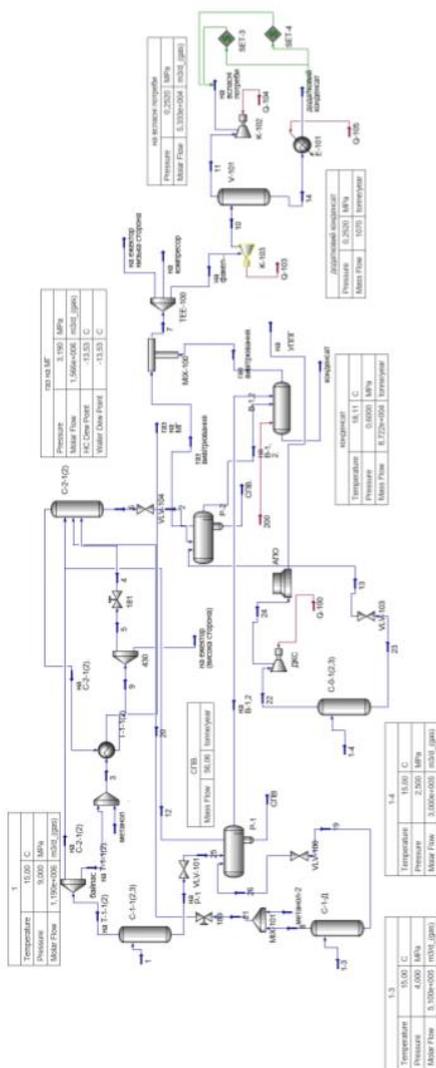


Рис. 4.3 – Моделювання удосконаленої схеми підготовки вуглеводнів

4.3 Підбір конструкції сепаратора

Для встановлення T-junction надзвукового сепаратора, визначимо геометрію надзвукового сопла Лаваля.

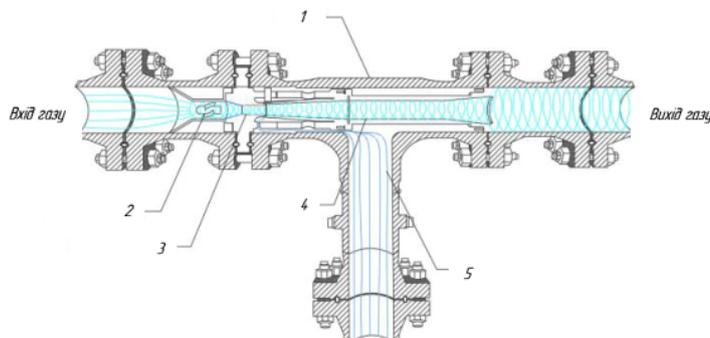


Рис. 4.5 – Розрахункова схема надзвукового T-junction сепаратора: 1 – корпус, 2 – закручуючий пристрій; 3 – сопло Лаваля, 4 – дифузор; 5 – відділення конденсату

Для розрахунку використаємо наступні вихідні дані:

Тиск на вході – 5,5 МПа;

Тиск на виході – 2,31 МПа;

Температура гальмування – 308 К;

Щільність газу – 0,796 кг/м³;

Питома газова стала – 268,6 Дж/кг*К;

Масова витрата газу – 6,02 кг/с.

Для визначення розмірів проведемо розрахунок основних та проміжних перерізів.

Визначаємо відношення тисків β

$$\beta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (4.1)$$

$$\beta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{2,31}{5,5} = 0,42 < 0,547$$

Визначаємо вихідну швидкість

$$C_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left(1 - \beta^{\frac{k-1}{k}}\right)} \quad (4.2)$$

$$C_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{1,29}{1,29-1} \cdot 268,6 \cdot 308 \cdot \left(1 - 0,42^{\frac{1,29-1}{1,29}}\right)} = 608 \text{ м/с}$$

де k - показник адіабати для складного газу, визначається за формулою Кобза і дорівнює 1,29;

R – питома газова стала суміші газу:

$$R = \frac{\bar{R}}{M_r} = \frac{8314,3}{30,95} = 268,6 \text{ Дж / (кмоль} \cdot \text{К)}$$

$$\bar{R} = 8314,3 \text{ Дж / (кмоль} \cdot \text{К)}$$

Визначаємо дійсну швидкість на вході із сопла

$$C_2^d = \varphi \cdot C_2, \quad (4.3)$$

$$C_2^d = 0,97 \cdot 608 = 590$$

Визначимо швидкість закінчення у мінімальному перерізі сопла

$$C_{кр} = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left(1 - \beta_{кр}^{\frac{k-1}{k}}\right)}$$

$$C_{кр} = \sqrt{2 \cdot \frac{1,29}{1,29-1} \cdot 268,6 \cdot 300 \cdot \left(1 - 0,547^{\frac{1,29-1}{1,29}}\right)} = 300 \text{ м/с} \quad (4.4)$$

Критичне співвідношення тисків $\beta_{кр}$

$$\beta_{кр} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = 0,547 \quad (4.5)$$

Визначення дійсної швидкості у критичному перерізі Сопла

$$C_{кр}^d = \varphi \cdot C_{кр}$$

$$C_{кр}^d = 0,97 \cdot 300 = 291 \text{ м/с} \quad (4.6)$$

Визначаємо питомий обсяг газу у звужуючому перерізі сопла

$$\vartheta_1 = \frac{R \cdot T_1}{P_1}$$

$$\vartheta_1 = \frac{268,6 \cdot 300}{13000000} = 0,006 \text{ м}^3/\text{кг} \quad (4.7)$$

Визначаємо питомий об'єм газу у критичному перерізі

$$\vartheta_{\text{кр}} = \vartheta_1 \left(\frac{1}{\beta_{\text{кр}}} \right)^{\frac{1}{k}}$$

$$\vartheta_{\text{кр}} = 0,006 \left(\frac{1}{0,547} \right)^{\frac{1}{1,29}} = 0,009 \text{ м}^3/\text{кг} \quad (4.8)$$

1) Визначаємо питомий обсяг газу у вихідному перерізі

$$\vartheta_2 = \vartheta_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}}$$

$$\vartheta_2 = 0,006 \left(\frac{13000000}{4000000} \right)^{\frac{1}{1,29}} = 0,015 \text{ м}^3/\text{кг} \quad (4.9)$$

2) Теоретична температура газу в мінімальному перерізі сопла при ізоентропійному перебігу

$$T_{\text{кр}} = \frac{P_{\text{кр}} \cdot \vartheta_{\text{кр}}}{R}$$

$$T_{\text{кр}} = \frac{13000000 \cdot 0,547 \cdot 0,009}{268,6} = 238 \text{ К} \quad (4.10)$$

3) Теоретична температура газу в мінімальному перерізі сопла при ізоентропійному перебігу

$$T_2 = \frac{P_2 \cdot \vartheta_2}{R}$$

$$T_2 = \frac{4000000 \cdot 0,015}{268,6} = 223 \text{ К} \quad (4.11)$$

4) Втрати кінетичної енергії у струмені газу в мінімальному перерізі

$$\Delta h_{\text{скр}} = (1 - \varphi^2) \cdot \frac{C_{\text{кр}}^2}{2}$$

$$\Delta h_{\text{скр}} = (1 - 0,97^2) \cdot \frac{300^2}{2} \cdot 10^{-3} = 2,6 \text{ Дж/кг} \quad (4.12)$$

5) Втрати кінетичної енергії у струмені газу у вихідному перерізі

$$\Delta h_{c_2} = (1 - \varphi^2) \cdot \frac{C_2^2}{2}$$
$$\Delta h_{c_2} = (1 - 0,97^2) \cdot \frac{407^2}{2} \cdot 10^{-3} = 4,9 \text{ Дж/кг} \quad (4.13)$$

6) Дійсна температура у критичному перерізі

$$T_{кр}^d = T_{кр} + \frac{\Delta h_{кр}}{C_p}$$
$$T_{кр}^d = 238 + \frac{2,6}{0,9} = 240 \text{ К} \quad (4.12)$$

Дійсна температура у вихідному перерізі

$$T_2^d = T_{кр} + \frac{\Delta h_{c_2}}{C_p}$$
$$T_2^d = 238 + \frac{4,9}{0,9} = 243 \text{ К} \quad (4.13)$$

Дійсний питомий об'єм у критичному перерізі

$$\vartheta_{кр}^d = \frac{R \cdot T_{кр}^d}{P_{кр}}$$
$$\vartheta_{кр}^d = \frac{268,6 \cdot 240}{0,547 \cdot 13000000} = 0,009 \text{ м}^3/\text{кг} \quad (4.14)$$

Дійсний питомий обсяг у вихідному перерізі

$$\vartheta_2^d = \frac{R \cdot T_2^d}{P_2}$$
$$\vartheta_2^d = \frac{268,6 \cdot 243}{4000000} = 0,016 \text{ м}^3/\text{кг} \quad (4.15)$$

Мінімальний переріз сопла

$$F_{min} = \frac{G \cdot \vartheta_{кр}^d}{C_{кр}^d}$$
$$F_{min} = \frac{2,4 \cdot 0,009}{291} = 0,000074 \text{ м}^2 \quad (4.15)$$

Максимальний переріз сопла

$$F_{max} = \frac{G \cdot \vartheta_2^d}{C_2^d}$$
$$F_{max} = \frac{2,4 \cdot 0,016}{395} = 0,000097 \text{ м}^2 \quad (4.16)$$

Визначення мінімального розміру перерізу

$$D_{\min} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\min}}{\pi}}$$

$$D_{\min} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,000024}{3,14}} = 0,0097 \text{ м} \quad (4.17)$$

Визначення максимального розміру перерізу

$$D_{\max} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\max}}{\pi}}$$

$$D_{\max} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,000097}{3,14}} = 0,011 \text{ м} \quad (4.18)$$

Висновки за розділом 4

Проведено розрахунки матеріального балансу УКПГ за існуючим та модернізованим варіантом підготовки вуглеводнів.

Надлишок газу вивітрювання з сепаратору газу власних потреб скидається на факел, тому для того щоб зменшити відсоток спалювання газу (зокрема його компонентів C3+) пропонується на УКПГ встановити надзвуковий сепаратор, і у разі відсутності споживання газу вивітрювання направляти його не на факел, а на T-junction сепаратор.

Результати розрахунків на модернізовану схемою показують, що отримано додатковий конденсат в 1070 т/рік, це порівняно не багато, але також в надзвуковий сепаратор можна подавати газ, який відправляється на ПХУ ближнього УКПГ. Після надзвукової сепарації газу цей газ відповідає вимогам Кодексу газотранспортної системи, зокрема, по температурам точки роси по волозі та вуглеводням та компонентному складу, і може направлятися в магістральний газопровід.

Загальні висновки

Проаналізовано існуючі конструктивні рішення сепараційних пристроїв та виділено перспективні, які можуть застосовувати при підготовці природного газу.

Проведено імітаційне моделювання процесу T-junction сепарації для двох моделей. Побудовано графіки залежності вилучення цільових компонентів від тиску потоку сировини, які до значення 12,5 МПа прямо пропорційні. На відмітці 12,5 МПа вміст фракцій C3+ практично не змінюється в обох випадках, що говорить про те, що цей показник оптимальний для даного випадку надзвукової сепарації. Збільшення температури сирого газу для двох схем знижує ступінь вилучення цільових компонентів, на дослідженому інтервалі температур залежність лінійна, обернено пропорційна. Аналіз моделювання надзвукової сепарації за двома варіантами, показав що за ефективністю вилучення C3+ компонентів кращий варіант 2, відсоток видалення цих компонентів складає відповідно 70% та 75% відповідно.

Надлишок газу вивітрювання з сепаратору газу власних потреб скидається на факел, тому для того щоб зменшити відсоток спалювання газу (зокрема його компонентів C3+) пропонується на установці підготовки газу встановити надзвуковий сепаратор, і у разі відсутності споживання газу вивітрювання направляти його не на факел, а на T-junction сепаратор. Проведено розрахунки матеріального балансу установки підготовки газу за існуючим та модернізованим варіантом підготовки вуглеводнів.

Результати розрахунків на модернізовану схемою показують, що отримано додатковий конденсат в 1070 т/рік, це порівняно не багато, але також в надзвуковий сепаратор можна подавати газ, який відправляється на ПХУ ближнього УКПГ. Після надзвукової сепарації газу цей газ відповідає вимогам Кодексу газотранспортної системи, зокрема, по температурам точки роси по волозі та вуглеводням та компонентному складу, і може направлятися в магістральний газопровід.

Список використаних літературних джерел

1. . Кондрат О.Р., Гутак А.Д. Энергоэффективна модифікація установки низькотемпературної сепарації газу. Нафтогазова галузь України. 2015. №5. С.26 – 30.
2. Білецький В., Сергєєв П., Фик М., Козирець С. Моделювання в нафтогазовій промисловості. GEOTECHNOLOGIES, 2018. – Volume 1, pp. 86-98.
3. Wen, C., Cao, X., & Yang, Y. (2011). Swirling flow of natural gas in supersonic separators. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 50(7), 644-649. doi:10.1016/j.cep.2011.03.008 [2] <http://twisterbv.com/products-services/twister-supersonic-separator/>
4. Gandhidasan, P., Al-Farayedhi, A.A., Al-Mubarak, A.A., 2001. Dehydration of natural gas using solid desiccants. *Energy* 26, 855e868.
5. V.I. Alferov, L.A. Baguirov, V. Feygin, A. Arbatov, S. Imaev, L. Dmitriev, V.I. Rezenenko, US Patent, 6372019, April 16, 2003.
6. M. Betting, T. Van Holten, J. Van Veen. US Patent, 6524368, February 25, 2003.
7. Brouwer, J., & Epsom, H. (2003). SUPERSONIC GAS CONDITIONING FIRST COMMERCIAL OFFSHORE EXPERIENCE.
8. H. Liu, Z. Liu, Y. Feng, K. Gu, T. Yan, Characteristic of a supersonic swirling dehydration system of natural gas, *Chinese journal of chemical engineering* 1 (2005)
9. Betting, M., Epsom, H.D., 2007. Supersonic separator gains market acceptance. *World Oil* 254, 197e200.
10. Baker, R.W., Lokhandwala, K., 2008. Natural gas processing with membranes: an overview. *Ind. Eng. Chem. Res.* 47, 2109e2121.
11. E. Jassim, M.A. Abdi, Y. Muzychka, Computational fluid dynamics study for flow of natural gas through high-pressure supersonic nozzles: Part 2. Nozzle geometry and vorticity, *Pet. Sci. Technol.* 26 (2008) 1773– 1785.

12. Wen Ming, J., Zhong Liang, L., HengWei, L., Hui Zhong, P., Ling Ling, B., 2009. *Science China Series E- Technological Sciences* 52 (9), 2653e2659.
13. A. Karimi, M.A. Abdi, Selective dehydration of high-pressure natural gas using supersonic nozzles, *Chem. Eng. Process.* 48 (2009) 560–568.
14. Carrol, J., 2009. *Natural Gas Hydrates: A Guide for Engineers*, second ed. Elsevier Inc., UK.
15. V.I. Alferov, L.A. Baguirov, L. Dmitriev, V. Feygin, S. Imaev, J.R. Lace, Supersonic nozzle efficiently separates natural gas components, *Oil & Gas Journal* 103 (2005) 53–58.
16. Mahmoodzadeh Vaziri, B., Shahsavand, A., Rashidi, H.R., Ghanbari Mazidi, M., 2010. *Proceedings of 13th Iranian National Chemical Engineering Congress and 1st International Regional Chemical and Petroleum Engineering Congress*, Razi University, Kermanshah, Iran, October, 2010.
17. Rashidi, H.R., Shahsavand, A., Sheibani, V., Mahmoodzadeh Vaziri, B., 2010. *Proceeding of second conference on science and engineering of separation*, Kerman University, Iran.
18. Malyshkina MM (2010) The procedure for investigation of the efficiency of purification of natural gasses in a supersonic separator. *High Temperature* 48: 244–250
19. Ruzaikin, V., Lukashov, I., Breus, A., Fedorenko, T., 2023. Phase separation of two-phase ammonia in horizontal T-junction at low mass velocity. *Int. J. Refrig.* 149, 62–72.
20. Saieed, A., Sam, B., Pao, W., Hashim, F.M., Norpiah, R.B., 2016. A review of T-junction geometrical effect on two-phase separation. *ARPN J. Eng. Appl. Sci.* 11 (24), 14233–14238.
21. Saieed, A., Pao, W., Ali, H.M., 2018. Prediction of phase separation in a T-Junction. *Exp. Therm. Fluid. Sci.* 97, 160–179.