



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 88187

(13) C2

(51) МПК (2009)

F25J 3/02

F25B 9/02

B01D 45/16 (2009.01)

B01D 53/24

B01D 53/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) ПРОЦЕС І ПРИСТРІЙ ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОТОКУ ПРИРОДНОГО ГАЗУ І РОЗДІЛЕННЯ ЦЬОГО ОХОЛОДЖЕНОГО ПОТОКУ НА ФРАКЦІЇ

1

2

(21) а200710076

(22) 24.02.2006

(24) 25.09.2009

(86) РСТ/ЕР2006/060260, 24.02.2006

(31) 05101420.7

(32) 24.02.2005

(33) ЕР

(46) 25.09.2009, Бюл.№ 18, 2009 р.

(72) БЕТТІНГ МАРКО, NL, БРОУВЕР ЯКОБ МІХІ-
ЕЛЬ, NL, ВАН ЕК ПАСКАЛЬ, NL, ТЬСЕНК ВІЛЛІНК
КОРНЕЛІС АНТОНІ, NL

(73) ТВІСТЕР Б.В., NL

(56) US 4140504 A, 20.02.1979

WO 03/029739 A, 10.04.2003

US 3296807 A, 10.01.1967

WO 2004/001260 A, 31.12.2003

(57) 1. Процес охолодження потоку природного газу і розділення охолодженого потоку газу на фракції з різними температурами кипіння і, зокрема, на метан, етан, пропан, бутан і конденсати, де зазначений процес включає у себе:

охолодження потоку газу принаймні в одному теплообмінному пристрої;

розділення охолодженого потоку газу у вхідному роздільному баці на багату на метан фракцію плинної речовини і бідну на метан фракцію плинної речовини;

постачання плинної речовини, бідної на метан, від входу роздільного бака у фракціонувальну колону, в котрій багата на метан фракція плинної речовини відокремлюється від бідної на метан фракції плинної речовини;

постачання принаймні частини багатой на метан фракції плинної речовини від входу роздільного бака у циклонний пристрій розширювання і розділення, в котрому зазначена фракція плинної речовини розширюється і тим самим далі охолоджується і розділяється на багату на метан, практично газоподібну фракцію плинної речовини і бідну на метан, практично рідку фракцію плинної речовини;

і

постачання бідної на метан фракції плинної речовини із циклонного пристрою розширювання і розділення у фракціонувальну колону для подальшого розділення;

де зазначений циклонний пристрій розширювання і розділення містить:

а) вузол лопатей вихрування для надання вихрового руху багатой на метан фракції плинної речовини, розташованих вище за потоком від сопла, в якому багата на метан фракція плинної речовини прискорюється і розширюється, і тим самим охолоджується далі, внаслідок чого відцентрові сили розділяють вихровий потік плинної речовини на багату на метан фракцію плинної речовини і бідну на метан фракцію плинної речовини, та циклонний пристрій розширювання і розділення, що містить вузол лопатей вихрування, які виступають у принаймні частково радіальному напрямку із центрального тіла торпедоподібної форми вверху за потоком від сопла, зовнішній діаметр якого є більшим, ніж внутрішній діаметр сопла, або

б) дросельний вентиль, який має вихідну секцію, обладнану засобами вихрування, котрі надають вихровий рух потоку плинної речовини, що тече через канал виходу плинної речовини, спонукаючи цим краплі плинної речовини у вихровому русі зміщуватися у бік зовнішньої периферії каналу виходу плинної речовини і зливатися одна з одною.

2. Процес за п. 1, де потік природного газу охолоджується в теплообмінному вузлі, що містить перший теплообмінник і холодильник, у результаті чого багата на метан фракція плинної речовини, подана на вхід циклонного пристрою розширювання і розділення, має температуру в межах від -20 до -60°С, і охолоджена ця багата на метан фракція з виходу циклонного пристрою розширювання і розділення перепускається через перший теплообмінник для охолодження потоку газу.

3. Процес за п. 1 або 2, де зазначений теплообмінний вузол містить також другий теплообмінник, у котрому потік охолодженого природного газу з

(13) C2

(11) 88187

(19) UA

виходу першого теплообмінника охолоджується далі перед тим, як бути спрямованим до холодильного агрегату, а холодна плинна речовина із донної секції фракціонувальної колони подається на згаданий другий теплообмінник для охолодження в ньому потоку природного газу.

4. Пристрій для охолодження потоку природного газу і розділення охолодженого потоку газу на фракції з різними температурами кипіння і, зокрема, на метан, етан, пропан, бутан і конденсати, де зазначений пристрій містить:

принаймні один теплообмінний вузол для охолодження потоку природного газу;

вхідний роздільний бак для розділення охолодженого потоку природного газу, який має верхній вихід для виведення багатой на метан фракції плинної речовини і нижній вихід для виведення бідної на метан фракції плинної речовини;

фракціонувальну колону, котра є з'єднаною з нижнім виходом вищезазначеного вхідного роздільного бака і в котрій принаймні певна частина вищезазначеної бідної на метан фракції, виведеної із нижнього виходу вхідного роздільного бака, розділяється далі на багату на метан, практично газоподібну фракцію плинної речовини і бідну на метан, практично рідку фракцію плинної речовини;

циклонний пристрій розширювання і розділення, котрий є з'єднаним з верхнім виходом вищезазначеного вхідного роздільного бака і в котрому вищезгадана багата на метан фракція плинної речовини розширюється і тим самим далі охолоджується і розділяється на багату на метан фракцію плинної речовини і бідну на метан фракцію плинної речовини;

трубопровід живлення для постачання бідної на метан фракції плинної речовини із циклонного пристрою розширювання і розділення у фракціонувальну колону для подальшого розділення, де зазначений циклонний пристрій розширювання і розділення містить:

а) вузол лопатей вихрування для надання вихороподібного руху багатой на метан фракції плинної речовини, розташованих вище за потоком від сопла, в якому багата на метан фракція плинної речовини прискорюється і розширюється, і тим самим охолоджується далі, внаслідок чого відцентрові сили розділяють вихороподібний потік плинної речовини на багату на метан фракцію плинної речовини і бідну на метан фракцію плинної речовини, та циклонний пристрій розширювання і розділення, що містить вузол лопатей вихрування, які виступають у принаймні частково радіальному напрямку із центрального тіла торпедоподібної форми вверху за потоком від сопла, зовнішній діаметр якого є більшим, ніж внутрішній діаметр сопла, або

б) дросельний клапан, який має вихідну секцію, обладнану засобами вихрування, котрі надають вихороподібний рух потоку плинної речовини, що тече через канал виходу плинної речовини, спонукаючи цим краплі плинної речовини у вихровому русі зміщуватися у бік зовнішньої периферії каналу виходу плинної речовини і зливатися одна з одною.

5. Пристрій за п. 4, де циклонним пристроєм розширювання і розділення є дросельний клапан, який має корпус, тіло клапана, влаштоване в тілі корпусу з можливістю рухатися таким чином, що дане тіло клапана регулює потік плинної речовини із вхідного каналу плинної речовини у вихідний канал плинної речовини клапана, і містить, крім того, перфоровану гільзу, через котру потік плинної речовини тече із вхідного каналу плинної речовини у вихідний канал плинної речовини, якщо під час роботи тіло клапана дає можливість плинній речовині текти із вхідного каналу плинної речовини у вихідний канал плинної речовини,

де принаймні деякі отвори перфорованої гільзи мають принаймні частково тангенціальну орієнтацію відносно поздовжньої осі цієї гільзи, внаслідок чого потоку багатофазної плинної речовини надається вихровий рух всередині вихідного каналу плинної речовини, в якому краплі рідини у вихровому русі зміщуються у бік зовнішньої периферії вихідного каналу плинної речовини і зливаються в більш крупні краплі рідини.

6. Пристрій за п. 5, де вузол розділення газу і рідини з'єднаний з вихідним каналом дросельного клапана, і в цьому вузлі рідка і газоподібна фази плинної речовини, що виводяться клапаном, принаймні частково розділяються.

7. Пристрій за п. 4, де зазначений пристрій містить, крім того, вхідний компресор і повітряний холодильник, розташовані вверху за потоком від першого теплообмінника.

8. Пристрій за п. 4, де зазначений пристрій обладнаний засобами контролю і регулювання температури, сконфігурованими таким чином, щоб підтримувати температуру на вході циклонного пристрою розширювання і розділення в інтервалі від -20 до -60 градусів Цельсія.

9. Процес за п. 1, де циклонний пристрій розширювання містить сопло, а ізентропічна ефективність розширювання в цьому соплі циклонного пристрою розширювання становить принаймні 80%.

10. Пристрій за п. 4, де тіло торпедоподібної форми, вузол лопатей вихрування і сопло сконфігуровані таким чином, що ізентропічна ефективність розширювання в зазначеному соплі становить принаймні 80%.

Даний винахід стосується процесу і пристрою для охолодження потоку природного газу і розділення цього охолодженого потоку газу на різнома-

нітні фракції, включаючи метан, етан, пропан, бутан та конденсати.

Природний газ виробляється, обробляється і транспортується його кінцевому споживачу нафтогазовою промисловістю.

В обробку газу входить зріджування принаймні частини потоку природного газу. При зрідженні потоку природного газу отримують низку так званих газових конденсатів (NGL: natural gas liquids), включаючи зріджений природний газ (скорочено LNG: Liquefied Natural Gas, який містить переважно метан або (C_1 або CH_4), етан (C_2), зріджений нафтовий газ (скорочено LPG: liquefied petrol gas, який містить переважно пропан і бутан або C_3 і C_4) і конденсат (який містить переважно фракції C_5+).

Якщо газ виробляється і транспортується регіональним споживачам по трубопроводах газорозподільної мережі, то ступінь його нагріву не повинен виходити за межі, встановлені технічними умовами. У випадку висококалорійного газу це потребує проміжну обробку його потоку для видобування рідин C_2+ , проданих як залишкові продукти.

Якщо вироблення регіонального газу перевищує його споживання, то витратність таких газорозподільних мереж стає невиправдано високою, у зв'язку з чим газ у них може піддаватися зріджуванню з переробкою на LNG і транспортуватися в рідкій формі. При виробництві рідин C_1 одночасно утворюються рідини C_2+ , які продаються як побічні продукти.

Традиційні установки з відновлення газових конденсатів ґрунтуються на криогенних процесах охолодження в тім, що стосується конденсації легких фракцій у потоку газу. До числа цих процесів охолодження входять: машинне охолодження (MR: Mechanical Refrigeration), розширювання з використанням ефекту Джоуля-Томсона (JT), турбінні пристрої розширювання (TE: Turbo expanders) та їх комбінації (наприклад, MR-JT). Ці процеси відновлення NGL-газів протягом десятиліть оптимізувалися з погляду питомих енерговитрат на стискання (тобто МВт/тона NGL-год.). Таку оптимізацію часто здійснювали із застосуванням: 1) складних систем теплового обміну між різними потоками процесу; 2) різних живильних лотків у фракціонувальній колоні; і 3) очистки відбензинених масел (тобто зрошення колони).

Найбільш чутливим до питомих енерговитрат на стискання є фактичний робочий тиск фракціонуальної колони. Чим вищим є цей робочий тиск, тим нижчими є питомі енерговитрати на стискання, але при цьому також знижується відносна леткість поміж компонентами фракціонування (наприклад, $C_1 - C_2+$ для дегетанізатора, $C_2 - C_3+$ для дегетанізатора і т.д.), внаслідок чого зростає також кількість лотків, а отже і висота колони, і/або знижується чистота верхнього погону.

У європейському патенті №0182643, а також патентах США №№4,061,481, 4,140,504, 4,157,904, 4,171,964 і 4,278,457, виданих на ім'я власника - фірми „Ortloff Corporation”, описані різноманітні способи обробки потоків природного газу, де потік газу охолоджують і розділяють на такі фракції, як, наприклад, метан, етан, пропан, бутан і конденсати.

Недоліком відомих способів охолодження і розділення є те, що для їх здійснення потребуються великогабаритні та коштовні пристрої охолодження, які є дуже енергоємними. Ці способи поділяються на ті, в котрих використовується ізентальпічне охолодження (тобто ефект Джоуля-Томсона, системи машинного охолодження), і ті, в котрих використовується наближене до ізентропічного охолодження (тобто турборозширювачі, циклонні пристрої розширювання і розділення). Способи на основі наближеного до ізентропічного охолодження є найбільш ефективними з погляду енергоспоживання, але при цьому вони зазвичай є найбільш витратними при застосуванні турборозширювачів. Проте циклонні пристрої розширювання і розділення з погляду економії коштів є більш ефективними і при цьому зберігають високу енергетичну ефективність, хоча і меншого рівня, ніж турборозширювачі. Використовуючи економічно ефективні циклонні пристрої розширювання і розділення в комбінації з циклом ізентальпічного охолодження (наприклад, із зовнішнім холодильним циклом) дозволяє відновити максимальну енергетичну ефективність, яка може бути досягнута.

Таким чином, метою даного винаходу є створення процесу і пристрою для охолодження і розділення потоку природного газу, які є енергетично більш ефективними, менш громіздкими в апаратурному забезпеченні і більш дешевими, ніж відомі процеси та пристрої.

Даним винаходом пропонується процес охолодження потоку природного газу і розділення охолодженого потоку газу на фракції з різними температурами кипіння і, зокрема, на метан, етан, пропан, бутан і конденсати, де запропонований процес включає у себе:

- охолодження потоку газу принаймні в одному теплообмінному пристрої;
- розділення охолодженого потоку газу у вхідному роздільному баці на багату на метан фракцію плинної речовини і бідну на метан фракцію плинної речовини;
- постачання плинної речовини, бідної на метан, від входу роздільного бака у фракціонувальну колону, в котрій багата на метан фракція плинної речовини відокремлюється від бідної на метан фракції плинної речовини;
- постачання принаймні частини багатой на метан фракції плинної речовини від входу роздільного бака у циклонний пристрій розширювання і розділення, в котрому зазначена фракція плинної речовини розширюється і тим самим далі охолоджується і

розділяється на багату на метан, практично газоподібну фракцію плинної речовини і бідну на метан, практично рідку фракцію плинної речовини;

- постачання бідної на метан фракції плинної речовини із циклонного пристрою розширювання і розділення у фракціонувальну колону для подальшого розділення;
- де зазначений циклонний пристрій розширювання і розділення містить:

а) вузол лопатей вихрування для надання вихрового руху багатій на метан фракції плинної речовини;

човини, розташованих вище за потоком від сопла, в якому багата на метан фракція плинної речовини прискорюється і розширюється, і тим самим охолоджується далі, внаслідок чого відцентрові сили розділяють вихровий потік плинної речовини на багату на метан фракцію плинної речовини і бідну на метан фракцію плинної речовини, або

б) дросельний вентиль, який має вихідну секцію, обладнану засобами вихрування, котрі надають вихровий рух потоку плинної речовини, що тече через канал виходу плинної речовини, спонукуючи цим краплі плинної речовини у вихровому русі зміщуватися у бік зовнішньої периферії каналу виходу плинної речовини і зливатися одна з одною.

У кращому варіанті здійснення винаходу потік природного газу охолоджується в теплообмінному вузлі, що містить перший теплообмінник і холодильник, у результаті чого багата на метан фракція плинної речовини, подана на вхід циклонного пристрою розширювання і розділення, має температуру в межах від -20 до -60°C , і охолоджена ця багата на метан фракція з виходу циклонного пристрою розширювання і розділення перепускається через перший теплообмінник для охолодження потоку газу.

Крім того, у кращому варіанті теплообмінний вузол містить також другий теплообмінник, у котрому потік охолодженого природного газу з виходу першого теплообмінника охолоджується далі перед тим, як бути спрямованим до холодильного агрегату, а холодна плинна речовина із донної секції фракціонуальної колони подається на згаданий другий теплообмінник для охолодження в ньому потоку природного газу.

У кращому варіанті бажано також використовувати циклонний пристрій розширювання і розділення виробництва компанії Twister B.V., який надходить у продаж під торговою маркою „Twister”. Різноманітні варіанти здійснення цього циклонного пристрою розширювання і розділення описані в міжнародній патентній заявці WO 03029739, європейському патенті №1017465 і патентах США №№6524368 і 6776825. Охолодження всередині циклонного пристрою розширювання і розділення може здійснюватися шляхом прискорення потоку сировини в соплі до надколовукової або надзвукової швидкості. При надколовуковій або надзвуковій швидкості рух потоку його тиск падає, як правило, в 3 рази відносно вхідного тиску, в той час як температура на виході складає приблизно $3/4$ від вхідної температури. Величина падіння температури на одиницю падіння тиску для даного складу сировини визначається ізентропічною ефективністю розширювання, яка повинна складати принаймні 80%. Ізентропічна ефективність виражає втрати на тертя і теплові втрати, що виникають всередині циклонного пристрою розширювання і розділення.

Ці та інші варіанти здійснення, особливості та переваги процесу і пристрою згідно з даним винаходом розглядаються більш докладно нижче, в детальному описі кращих варіантів здійснення запропонованих процесу і пристрою з посилання-

ми на супровідні креслення, а також в доданих Формулі винаходу та Рефераті.

Фіг.1: структурна схема процесу і пристрою згідно з винаходом для охолодження і фракціонування потоку природного газу.

Фіг.2A: вигляд у поздовжньому розрізі циклонного пристрою розширювання і розділення з дросельним вентилям типу JP, обладнаним засобами приведення плинної речовини у вихороподібний рух.

Фіг.2B: вигляд у збільшеному масштабі поперечного розрізу вихідного каналу дросельного вентиля, зображеного на Фіг.2A.

Фіг.2C: ілюстрація вихороподібного руху потоку плинної речовини у вихідному каналі дросельного вентиля, зображеного на Фіг.2A і 2B.

Фіг.2D: картина концентрування крапель рідини по зовнішній периферії вихідного каналу дросельного вентиля, зображеного на Фіг.2A і 2B.

На Фіг.1 показана структурна схема процесу і пристрою згідно з винаходом для охолодження і фракціонування потоку природного газу.

Потік природного газу C_xH_y піддається стисканню під тиском в інтервалі приблизно від 60 бар до 100 бар у вхідному компресорі 20 і спочатку охолоджується у повітряному холодильнику 21 таким чином, що на вході в перший, газовий, теплообмінник 1 цей потік має тиск приблизно 100 бар. Після цього потік природного газу охолоджується в другому теплообміннику 2, а потім - у холодильному агрегаті 3. З виходу другого теплообмінника 2 потік природного газу потрапляє у вхідний сепаратор 4, де він розділяється на фракцію 5 багату на метан і фракцію 6 бідну на метан.

Бідна на метан фракція 6 подається у фракціонувальну колону 7, а багата на метан фракція 5-у циклонний пристрій 8 розширювання і розділення.

Циклонний пристрій 8 розширювання і розділення має такі компоненти: лопаті 9 вихрування; сопло 10, в котрому вихороподібна суміш плинної речовини прискорюється до надколовукової або надзвукової швидкості; центральний вихід 11 первинної плинної речовини для виведення багатой на метан фракції CH_4 плинної речовини із сепаратора; і зовнішній вихід вторинної плинної речовини для виведення збагаченої на пари, що конденсуються, і бідної на метан фракції вторинної плинної речовини у трубопровід 13.

Зазначена фракція вторинної плинної речовини по трубопроводу 13 подається у фракціонувальну колону 7.

Першим теплообмінником 1 є газовий теплообмінний пристрій, в якому потік природного газу CH_4 охолоджується потоком бідного первинного газу CH_4 із центрального первинного виходу 11 циклонного пристрою 8 розширювання і розділення. Потік попередньо охолодженої сировини з виходу першого теплообмінника 1 охолоджується далі у другому теплообміннику 2, яким може бути газово-рідинний теплообмінний пристрій, який охолоджується рідинами із донних лотків фракціонуальної колони 7, як показано стрілками 14 і 15. Після цього сировинний потік попередньо охолодженого природного газу переохолоджується в холодильному агрегаті 3, що працює від холоди-

льної машини (холодильний агрегат з машинним охолодженням або холодильний агрегат з абсорбційною холодильною машиною).

Рідини, утворені під час цього тристадійного процесу попереднього охолодження, відділяються від все ще газоподібної, збагаченої на метан фракції у вхідному сепараторі 4 і подаються на один із нижніх лотків фракціонуальної колони 7, оскільки вона містить всі важкі фракції, наявні в сировині (тобто C_4+).

Газ, що надходить із верхньої частини цього вхідного сепаратора, є бідним на більш важкі вуглеводні (наприклад, містить переважно C_4-). Глибока екстракція зрідженого природного газу (наприклад, C_2-C_4) здійснюється в циклонному пристрої 8 розширювання і розділення, де газ розширюється майже ізентропічно. Всередині циклонного пристрою 8 температура падає далі до криогенного рівня, на якому майже всі компоненти C_2+ зріджуються і відокремлюються. При криогенному розділенні всередині циклонного пристрою 8 газ C_1 вислизає разом із рідинами C_2+ . Певна мольна фракція C_1 розчиняється в рідинах C_2+ . Цей багатий на C_2+ потік надходить у фракціонуальну колону 7, де створені умови крутого відрізнання легких фракцій від важких фракцій, наприклад, $C_1 - C_2+$ (деметанізатор), $C_2 - C_3+$ (деетанізатор) і т.д.

Для одержання чистого верхнього продукту із фракціонуальної колони 7 створюють зворотний стік збіднілої рідини для поглинання найбільш легкого компоненту, який повинен покидати дно колони (наприклад, C_2 у випадку деметанізатора). Зазначений зворотний стік створюють шляхом відбирання бічного потоку 16 від вхідного потоку циклонного пристрою 8 розширювання і розділення з подальшим охолодженням цього бічного потоку у попередньому газовому охолоджувачу 17 газовим потоком 18 верхнього погону (тобто верхнім продуктом $CН_4$) фракціонуальної колони 7 та ізентальпічним розширюванням цього попередньо охолодженого бічного потоку 16 до тиску в колоні. Під час цього ізентальпічного розширювання майже всі вуглеводні зріджуються і у формі зворотного стоку подаються у верхній лоток фракціонуальної колони 7. Потоки газу C_1 , вироблені із 1) виходу 11 циклонного пристрою 8 розширювання і розділення (зазвичай 80% первинного потоку) і 2) верхнього вихідного трубопроводу 18 фракціонуальної колони 7 (зазвичай 20% вторинного потоку), подаються стисканню окремо один від одного у вихідних компресорах 19 і 20 до вихідного тиску приблизно 60 бар. У розглянутому прикладі вихідний тиск приблизно дорівнює тиску сировинного потоку природного газу $CН_4$ на вході першого теплообмінника 1. Отже обидва вихідні компресори 19 і 20 компенсують фрикційні та теплові втрати, що виникають у циклонному пристрої 8 розширювання і розділення. Ці втрати є вищими, якщо розширювання в циклонному пристрої 8 є більш глибоким, у зв'язку з чим пропорційно зростає потрібна потужність вихідного компресора. Механічна потужність холодильного агрегату 3 є в більшій частині пропорційною різниці між високою температурою конденсатора ($T_{cond.}$) і низькою температурою випарника ($T_{evap.}$). Між цими температурами і

навоколишньою температурою T_0 має місце таке співвідношення: $T_{cond.} > T_0 > T_{evap.}$. Звідси випливає загальне рівняння для к. к. д. циклу Карно або для теоретичної максимальної холодоїльної потужності на одиницю механічної потужності холодильного агрегату 3:

$$C.O.P._{Carnot} = \frac{\dot{Q}_{cooling}}{\dot{W}_{refrig}} = \frac{T_{evap}}{T_{cond} - T_{evap}}$$

де: $C.O.P._{Carnot}$ - холодоїльний коефіцієнт циклу Карно.

Для циклу пропанової холодоїльної машини з температурою $T_{evap.} = -30^\circ\text{C}$ і $T_{cond.} = 40^\circ\text{C}$ коефіцієнт $C.O.P._{Carnot} = 3,5$. У реальній холодоїльній машині втрати зменшують цю величину $C.O.P.$, у результаті чого фактична величина $C.O.P. = 2,5$. Таким чином, на кожний мегават потужності компресора може отримуватися холодоїльна потужність 2,5МВт.

При вхідному потоку сировини 10кг/с і його теплоємності 2,5кДж/кг·К охолодження на один градус потребує холодоїльної потужності 25кВт/К. Таким чином, для охолодження від температури -20°C до -30°C потрібна холодоїльна потужність 250кВт. У випадку температури випарника -30°C це відповідає механічній потужності холодоїльної машини 100кВт. Якщо це додаткове охолодження на 10°C отримувати шляхом додаткового розширювання у циклонному пристрої розширювання і розділення, то коефіцієнт розширювання (P/P_{feed} , де P_{feed} - вхідний тиск) необхідно знижувати від стандартного 0,3 до 0,25 (більш глибоке розширювання). Це призводить до більших втрат тиску на циклонному пристрої 8 розширювання і розділення, а отже і до збільшення потрібної потужності вихідного компресора ще приблизно на 200кВт.

Якщо температуру випарника вибирають у криогенному діапазоні порівняно з температурами зворотного потоку зрідженого природного газу, тобто $T_{evap.} = -70^\circ\text{C}$, то фактична величина $C.O.P.$ холодоїльної машини падає приблизно до 1,3. У зв'язку з цим охолодження від -60 до -70°C потребує ще 250кВт холодоїльної потужності, хоча це відповідає механічній потужності холодоїльної машини 192кВт. Якщо цього додаткового охолодження досягати в циклонному пристрої 8 розширювання і розділення, то коефіцієнт розширювання зменшується додатково від 0,3 до 0,25, хоча потрібна для цього додаткова потужність компресора зменшується від 200кВт до 170кВт. Це є головним поясненням того, що потужність, а отже і додаткова потужність, будь-якого компресора є меншою при нижчій температурі всмоктування.

Із вищевикладеного можна зробити такий висновок. На ділянці зниження температури від -20°C до -30°C більш ефективним є отримання додаткового охолодження від холодоїльного агрегату 3, ніж від більш глибокого розширювання у циклонному пристрої 8 розширювання і розділення. На противагу цьому, на ділянці зниження температури від -60°C до -70°C , де холодоїльний коефіцієнт холодоїльної машини агрегату 3 зі

зниженням температури поступово падає, потребується більш висока потужність холодильного агрегату. У зв'язку з цим, у випадку комбінованого циклу 3, 8 циклонного пристрою розширювання і розділення з холодильним агрегатом оптимальна холодильна потужність на одиницю механічної потужності може бути знайдена шляхом чіткого розділення механічних потужностей між 1) вхідним компресором 20 і 2) компресором холодильної машини холодильного агрегату 3.

Охолодження всередині циклонного пристрою 8 розширювання і розділення може досягатися шляхом прискорення потоку сировини в соплі 10 до навіколозвуквої або надзвуквої швидкості. У навіколозвуквих або надзвуквих умовах тиск падає, як правило, в 3 рази відносно вхідного тиску, а температура знижується, як правило, в % разу від вхідної температури. Відношення падіння температури на одиницю зниженого тиску для даного складу сировини визначається ізентропічною ефективністю розширювання, яка повинна складати $\geq 80\%$. Ізентропічна ефективність виражає втрати на тертя і теплові втрати, що виникають всередині циклонного пристрою розширювання і розділення.

У розширеному стані всередині циклонного пристрою 8 розширювання і розділення більшість компонентів C_2+ зріджується, приймаючи форму тонкої крапельної дисперсії і відокремлюється у зовнішній вихід 12 вторинної плинної речовини. Коефіцієнт розширювання (P/P_{feed} , де P_{feed} - вхідний тиск) вибирають таким чином, щоб всередині сопла 10 у рідину конденсувалося принаймні зазначена регенерація C_xH_y . Після сопла 10, в якому потік плинної речовини прискорюється і в результаті цього розширюється та охолоджується, потік всередині циклонного пристрою 8 розширювання і розділення розщеплюється на збагачений на рідину потік C_2+ (приблизно $20\%(\text{мас.})$) і бідний на рідину потік C_1 (приблизно $80\%(\text{мас.})$).

У дифузори всередині центрального виходу 11 плинної речовини головний потік C_1 уповільнюється, в результаті чого його тиск і температура зростають. Зростання тиску і відповідне зростання температури у дифузори визначаються як ізентропічним к. к. д. розширювання, так і ізентропічним к. к. д. повторного стискання. Ізентропічний к. к. д. розширювання визначає залишкову кінетичну енергію на вході дифузора, в той час як ізентропічний к. к. д. повторного стискання визначається втратами у внутрішній конструкції дифузора. Ізентропічний к. к. д. повторного стискання для циклонного пристрою розширювання і розділення складає приблизно 85% . Таким чином, отримуваний у результаті вихідний тиск головного потоку C_1 є меншим за вхідний тиск, хоча і більшим, ніж вихідний тиск мокрого потоку C_2+ , який дорівнює робочому тиску фракціонування колоні.

У результаті повторного стискання температура головного потоку C_1 стає вищою температури у верхівці фракціонування колоні. Внаслідок цього обмежується потенційна потужність цього головного потоку C_1 у попередньому охолодженні сировини. Це обмеження зумовлене самою природою циклонного пристрою навіколозвуквої або над-

звуквої розширювання та розділення. Власний к. к. д. циклонного пристрою розширювання і розділення є таким, що цей пристрій виробляє концентрований переохолоджений мокрий потік C_2+ живлення фракціонування колоні. Обидва ці фактори, тобто знижена витрата потоку живлення фракціонування колоні і відносно низька температура, дозволяють здійснювати процес розділення в цій колоні. У випадку схеми зрідження нафтового газу, в котрій використовується циклонний пристрій розширювання і розділення, оптимізація відновлення C_2+ полягає у створенні більш глибокого розширювання у циклонному пристрої розширювання і розділення (тобто у зменшенні відношення P/P_{feed} , де P_{feed} - вхідний тиск) і/або в зниженні потоку газу ковзання, що надходить разом з мокрим потоком C_2+ . Обидва ці заходи мають наслідком збільшення втрат тиску, що у свою чергу потребує стискання до вихідного тиску.

З метою компенсації втрат тиску в циклонному пристрої розширювання і розділення оцінку оптимального відношення вихід $C_2+/\text{МВт}$ потужності компресора за результатами термодинамічного моделювання бажано проводити для певної потужності холодильного компресора по відношенню до потужності вихідного компресора. Вищезгаданий комбінований цикл компенсує недостатність обмеженого попереднього охолодження. Що стосується переохолодження потоку сировини, то випарник холодильного циклу може бути приєднаний до входу циклонного пристрою розширювання і розділення.

На Фіг.2А - 2D показаний дросельний вентиль, що працює на ефекті Джоуля-Томсона (JT) або іншого типу вентиль, який має засоби вихрування в потоці плинної речовини і може використовуватися як альтернатива показаному на Фіг.1 циклонному пристрою розширювання і розділення.

Зображений на Фіг.2А - 2D дросельний JT-вентиль має геометрію, що сприяє процесу коалесценції крапель, утворених під час розширювання по шляху проходження потоку в дросельному вентилі Джоуля-Томсона або вентилі іншого типу. Ці більшого розміру краплі краще розпадаються, ніж у звичайних дросельних вентилях Джоуля-Томсона або дросельних вентилях іншого типу. У лоткових колонах це знижує захоплення на верхньому лотку і, отже, поліпшує к. к. д. лотків.

Вентиль, показаний на Фіг.2А, має корпус 21, в котрому з можливістю ковзного руху розташовані тіло 22 вентиля поршневого типу і зв'язана з ним перфорована гільза 23 таким чином, що шляхом обертання зубчастої передачі 24 на валу 25 вентиля зубчастий стрижень 26 поршня штовхає тіло вентиля поршневого типу вздовж каналу 27 виходу плинної речовини, як показано стрілкою 28. Вентиль має канал 29 входу плинної речовини, який нижче за потоком має кільцевий переріз 29А, котрий може охоплювати поршень 22 і/або перфоровану муфту 23, внаслідок чого потік плинної речовини, який проходить від вхідного каналу 29 у вихідний канал 27, регулюється осьовим положенням тіла 22 вентиля поршневого типу і з'єднаної з ним перфорованої гільзи 23. Перфорована гільза 23 має скісні, нерадіальні, отвори 30, котрі нада-

ють потоку плинної речовини вихороподібний рух всередині вихідного каналу 37, як показано стрілкою 34. Загострене у формі кулі тіло 25 спрямовування вихору прикріплене до тіла 22 вентиля по-ршневого типу і займає положення, коаксіальне центральній осі 31 у внутрішній порожнині перфорованої гільзи 3 і каналу 27 виходу плинної речовини для підсилення і регулювання вихороподібного руху 34 потоку плинної речовини у вихідному каналі 27.

Канал 27 виходу плинної речовини містить трубчастий роздільник 39 потоку, який відокремлює трубопровід 11 виходу первинної плинної речовини для транспортування збагаченої на метан фракції назад, у перший теплообмінник 1, показаний на Фіг.1, від кільцевого виходу 40 вторинної плинної речовини для транспортування збіднілої на метан фракції по трубопроводу 13 у фракціону-вальну колону 7, показану на Фіг.1.

На Фіг.2В більш детально показано, що скісні або нерадіальні отвори 30 мають циліндричну форму і спеціальним чином добрану, частково тангенціальну орієнтацію відносно центральної осі 31 каналу 27 виходу плинної речовини, при котрій поздовжня вісь 32 кожного з отворів 30 перетинає центральну вісь 31 на відстані D, що складає від 0,2 до 1, а краще - від 0,5 до 0,99 частину внутрішнього радіусу R гільзи 23.

На Фіг.2В номінальна товщина матеріалу перфорованої гільзи 23 позначена буквою t, а ширина циліндричних отворів 30 позначена буквою d. В альтернативному варіанті виконання вентиля згідно з винаходом отвори 30 можуть мати не циліндричну, а, наприклад, квадратну, прямокутну або зіркоподібну форму, а ширина d отворів 30 при цьому буде виражатися середньою величиною відношення чотирикратної площі поперечного перерізу отвору 30 до периметру отвору 30. У кращому варіанті величина відношення d/t лежить в інтервалі від 0,1 до 2, а в ще кращому - в інтервалі від 0,5 до 1.

Скісні отвори 30 створюють вихороподібний потік плинної речовини, що тече через вихідний канал 27, як показано стрілкою 34. Вихороподібний рух може надаватися також за допомогою специфічної геометрії регулятора форми вентиля і/або тіла 35 спрямовування вихору. У вентилі згідно з винаходом для ізентальпічного розширення з метою створення вихороподібного потоку плинної речовини використовується доступний вільний тиск. При цьому кінетична енергія переважно розсіюється через демпфірування вихору вздовж виводженої труби нижче за потоком від вентиля.

На Фіг.2С і 2D показано, що створення вихороподібного потоку у вихідному каналі вентиля дає подвійну вигоду, а саме:

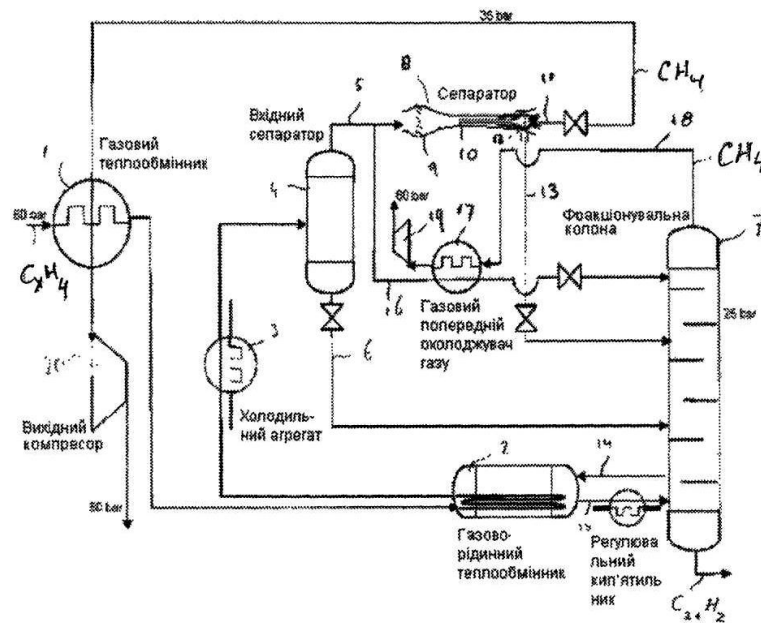
1) геометрично правильну картину розподілу швидкості → менший зсув на межі поділу → менший розпад крапель → більших розмірів краплі;

2) концентрування крапель у зовнішньому кільці 27А площі поперечного перерізу каналу 27 виходу плинної речовини → більша згущуваність кількості крапель → поліпшена коалесценція → більших розмірів краплі 38.

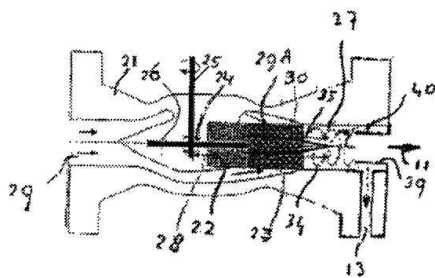
Поряд з тим, що для створення вихороподібного потоку у циклонному пристрої розширювання і розділення у процесі згідно з винаходом може використовуватися будь-який дросельний клапан на ефекті Джоуля-Томсона або іншого типу дросельний клапан, кращими все ж є дросельні клапани, що постачаються фірмою Mokveld Valves B.V., описані в міжнародній патентній заявці WO 2004083691.

Цілком зрозуміло, що кожний процес охолодження і розділення, використовуваний у системах відновлення зрідженого природного газу, має свій, відмінний від інших, оптимум енергетичної ефективності. Слід зауважити також, що методи наближеного до ізентропічного охолодження мають більш високу енергетичну ефективність порівняно з ізентальпічними методами і що побудовані на методах ізентропічного охолодження циклонні пристрої розширювання є менш витратними, ніж турбінні машини розширювання, хоча і менш ефективними в енергетичному відношенні. Авторами винаходу було виявлено, що комбінування ізентальпічного циклу охолодження (із застосуванням машинного охолодження) з наближеним до ізентропічного методом охолодження, у кращому варіанті за допомогою циклонних пристроїв розширювання і розділення, дає синергійний ефект у тому, що стосується енергетичної ефективності, тобто загальної потужності на одиницю об'єму виробленого зрідженого природного газу. Зрозуміло також, що різні циклонні пристрої розширювання і розділення дають різні ізентропічні ефективності.

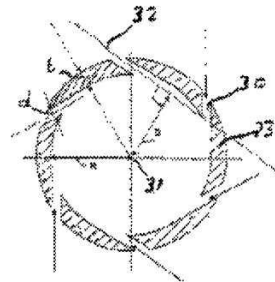
У кращому варіанті сопловий вузол циклонного пристрою розширювання і розділення згідно з винаходом містить низку лопатей вихрування, розташованих вище за потоком від сопла, і дає ізентропічну ефективність розширювання не менше 80%, у той час як інші циклонні пристрої розширювання і розділення, що містять тангенціальну вхідну секцію і використовують вихровий протитік (наприклад, вихрові труби Ренка-Хілша (Ranque-Hilsch)), мають суттєво нижчу ізентропічну ефективність розширювання, що складає менше 60%.



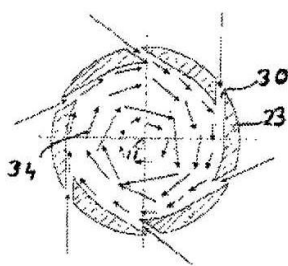
ФІГ. 1



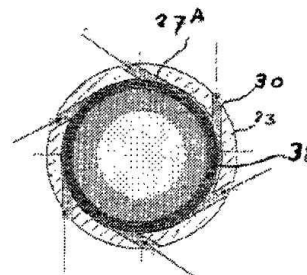
ФІГ. 2A



ФІГ. 2B



ФІГ. 2C



ФІГ. 2D