

Пропозиція належить до способів зрідження природного газу, в яких холодоагентом є газ з низькою точкою кипіння, зі здійсненням декількох ступіней розширення. Спосіб може бути використаний для одержання зрідженого природного газу для паливної, енергетичної, транспортної, ракетної та космічної галузей.

Відомий спосіб зрідження природного газу з циркуляцією детандерного газу високого тиску (Comparison of expander and cascade cycles for LNG / The oil and gas journal // 1972, №12, page 105; С. Я.Герш / Глубокое охлаждение //41, 2-е изд. Москва, "Советская наука", 1947, стор. 156). Газ стискають компресором низького тиску до проміжного тиску, змішують з детандерним потоком газу з високотемпературного теплообмінника і подають до компресора високого тиску, де його стискають до кінцевого тиску і розділяють на дві частини. Одну частину газу високого тиску (основний потік газу) направляють на охолодження до високотемпературного теплообмінника, а іншу частину (детандерний потік газу) на розширення до детандера. Після розширення детандерний потік газу подають до високотемпературного теплообмінника на нагрівання, після чого подають до входу компресора високого тиску. Після високотемпературного теплообмінника основний потік газу подають до низькотемпературного теплообмінника на охолодження і потім подають до дроселя на розширення до кінцевого тиску, в результаті чого газ частково зріджується. Після дроселя основний потік газу подають до сепаратора, де відокремлюють рідку фазу, що виводиться з циклу як кінцевий продукт. Газ із сепаратора подають до низькотемпературного теплообмінника на нагрівання, після чого подають до високотемпературного теплообмінника для подальшого нагрівання і потім подають на вхід компресора низького тиску.

Відомий також спосіб зрідження природного газу при комбінуванні дросельного циклу з детандерними циклами високого і низького тиску (прототип) (Техника низких температур / Архаров А. М., Буткевич К. С., Головинцов А. Г. и др., под ред. Микулина Е. И. // изд 2-е, М.: Энергия, 1975., стор.128). Газ стискають компресором низького тиску до проміжного тиску і розділяють на дві частини. Одну частину газу проміжного тиску (основний потік газу) змішують з детандерним потоком газу високого тиску і направляють до компресора високого тиску на стиск, а іншу частину (детандерний потік газу низького тиску) до високотемпературного теплообмінника низького тиску на охолодження, після чого його подають до детандера низького тиску на розширення і потім змішують з потоком газу із сепаратора. Після компресора високого тиску основний потік газу розділяють на дві частини. Одну частину газу високого тиску подають до високотемпературного теплообмінника високого тиску (потік газу, що зріджується) на охолодження, а іншу частину (детандерний потік газу високого тиску) до детандера високого тиску на розширення до проміжного тиску. Після детандера високого тиску газ подають до високотемпературного теплообмінника високого тиску на нагрівання і потім підмішують в основний потік газу. Після охолодження потік газу, що зріджується, подають до низькотемпературного теплообмінника для подальшого охолодження, а потім газ подають до дроселя на розширення до кінцевого тиску, в результаті чого частина потоку переходить у рідкий стан. Після дроселя суміш подають до сепаратора, де виділяють рідину, що виводиться з циклу як кінцевий продукт. Газ із сепаратора змішують з детандерним потоком газу низького тиску і подають до низькотемпературного теплообмінника на нагрівання, після чого подають до високотемпературного теплообмінника низького тиску на подальше нагрівання, і потім подають на стиск до компресора низького тиску.

Відомі способи відрізняються великою необоротністю процесів в теплообмінниках, а також наявністю процесу дроселювання газу, внаслідок чого сильно збільшуються витрати на зрідження, а також невисоким коефіцієнтом корисної дії (ККД) (Comparison of expander and cascade cycles for LNG / The oil and gas journal // 1972, №12, page 105). ККД - комплексний показник, що враховує втрати від необоротності.

В основу винаходу поставлена задача удосконалення способу зрідження природного газу, в якому в результаті введення операції проміжної сепарації газу, що сконденсувався, забезпечується розширення газу від максимального тиску до мінімального, що дозволяє досягти більшої холодопродуктивності, і за рахунок цього збільшити коефіцієнт корисної дії, а також зменшити питому витрату енергії на одиницю маси отриманого продукту.

Поставлена задача вирішена тим, що в способі зрідження природного газу шляхом стиску його, охолодження і наступного розширення і виділення рідкої фази з подачею зворотного потоку газу на охолодження вихідного, згідно з пропозицією, в процесі розширення газу рідку фазу, що утворилася при проміжному тиску, охолоджують і подають на розширення, після якого із суміші, що утворилася, відокремлюють рідину, а газ подають на попереднє охолодження вихідної рідини.

В результаті глибокого розширення газу виділяється надто багато рідини в проточній частині детандера, що призводить до різкого падіння ККД детандера, а також швидкого руйнування проточної частини внаслідок ерозії. Це не дозволяє використовувати безпосереднє отримання рідкого газу і призводить до використання холоду, виробленого детандером, на попереднє охолодження газу високого тиску, який направляють на зрідження. Щоб запобігти цим явищам у запропонованому способі використано видалення рідини із потоку при проміжному тиску. Виділену рідину розширюють до кінцевого тиску, при цьому частина рідини переходить у газоподібний стан. Для зменшення втрат отриманої рідини її охолоджують зворотним потоком газу, одночасно забезпечуючи цим утилізацію холоду низьких ізотерм на відповідному температурному рівні. В результаті охолодження при розширенні рідини на випаровування витрачається значно менше, внаслідок чого зростає загальна кількість рідини при кінцевому тиску, що збільшує вихід корисного продукту.

Пропонований спосіб зрідження природного газу показаний на схемі (Фіг.). Газ стискають компресором 1 і подають до теплообмінника 2 на охолодження, а потім подають до детандера 3 на розширення до проміжного тиску, в результаті чого газ частково конденсується. Суміш, що утворилася, подають до сепаратора 4 на розділення. Рідину із сепаратора 4 подають до теплообмінника 5 на охолодження, а потім подають до дроселя 6 на розширення до кінцевого тиску, в результаті розширення частина рідини випаровується. Суміш, що утворилася, подають до сепаратора 7, в якому розділяють газову і рідку фази. Рідину із сепаратора 7 виводять як кінцевий продукт, а газ змішують зі зворотним потоком. Газ із сепаратора 4 подають до детандера 8 на розширення до кінцевого тиску, в результаті чого газ частково конденсується. Після детандера 8 суміш подають до сепаратора 9 на поділ газової і рідкої фази. Рідину із сепаратора 9 виводять як кінцевий продукт, а газ (зворотний потік) змішують з газом із сепаратора 7 і подають до теплообмінника 5 на нагрівання. Потім зворотний потік подають до теплообмінника 2 на подальше нагрівання і на стиск до компресора 1.

Приклад 1 (на прототип). Природний газ стискали компресором низького тиску до проміжного тиску  $P=20\text{атм}$ ,  $i=226.54\text{ккал/кг}$  (де  $P$  - тиск,  $i$  - ентальпія) і розділяли на дві частини. Одну частину газу проміжного тиску (основний потік газу) змішували з детандерним потоком газу високого тиску і направляли до компресора високого тиску на стиск, а іншу частину (детандерний потік газу низького тиску) до високотемпературного теплообмінника низького тиску на охолодження  $i=189.1748\text{ккал/кг}$ , після чого його подавали до детандера низького тиску на розширення до  $P=1\text{атм}$ ,  $i=131.8\text{ккал/кг}$  і потім змішували з потоком газу із сепаратора. Після компресора високого тиску основний потік газу  $P=200\text{атм}$ ,  $i=188.24\text{ккал/кг}$  розділяли на дві частини. Одну частину газу високого тиску подавали до високотемпературного теплообмінника високого тиску (потік газу, що зріджується) на охолодження, а іншу частину (детандерний потік газу високого тиску) до детандера високого тиску на розширення  $P=20\text{атм}$ ,  $i=141.1436\text{ккал/кг}$ , після чого газ подавали до високотемпературного теплообмінника високого тиску на нагрівання і потім підмішували до основного потоку газу. Після охолодження потік газу, що зріджується,  $P=200\text{атм}$ ,  $i=47.9986\text{ккал/кг}$  подавали до низькотемпературного теплообмінника для подальшого охолодження  $P=200\text{атм}$ ,  $i=42.1921\text{ккал/кг}$ , а потім газ подавали до дроселя на розширення до кінцевого тиску  $P=1\text{атм}$ , в результаті чого частина потоку переходить у рідкий стан. Після дроселя суміш подавали до сепаратора, де виділяли рідину  $P=1\text{атм}$ ,  $i=9.3\text{ккал/кг}$ , яку виводили з циклу як кінцевий продукт. Газ із сепаратора  $i=131.8\text{ккал/кг}$  змішували з детандерним потоком газу низького тиску і подавали до низькотемпературного теплообмінника на нагрівання  $i=140.175\text{ккал/кг}$ , після чого подавали до високотемпературного теплообмінника низького тиску на подальше нагрівання, і потім подавали до входу компресора низького тиску.

Приклад 2 (по запропонованому способу). Природний газ стискали компресором 1  $P=200\text{атм}$ ,  $i=188.24\text{ккал/кг}$  і подавали до теплообмінника 2 на охолодження  $i=146.1214\text{ккал/кг}$ , а потім подавали до детандера 3 на розширення до проміжного тиску  $P=34.8089\text{атм}$ ,  $i=123.6555\text{ккал/кг}$ , в результаті чого газ частково конденсувався. Суміш, що утворилася, подавали до сепаратора 4 на поділ. Рідину із сепаратора 4  $i=70.1194\text{ккал/кг}$  подавали до теплообмінника 5 на охолодження  $i=13.75\text{ккал/кг}$ , а потім подавали до дроселя 6 на розширення до кінцевого тиску  $P=1\text{атм}$ ,  $i=13.75\text{ккал/кг}$ , в результаті розширення частина рідини випаровувалася. Суміш, що утворилася, подавали до сепаратора 7, в якому розділяли газову і рідку фази. Рідину із сепаратора 7 виводили як кінцевий продукт  $i=9.3\text{ккал/кг}$ , а газ  $i=131.8\text{ккал/кг}$  змішували зі зворотним потоком. Газ із сепаратора 4  $P=34.8089\text{атм}$ ,  $i=137.9309\text{ккал/кг}$  подавали до детандера 8 на розширення до кінцевого тиску  $P=1\text{атм}$ ,  $i=96.0539\text{ккал/кг}$ , в результаті чого газ частково конденсувався. Після детандера 8 суміш подавали до сепаратора 9 на поділ газової і рідкої фази.

Рідину із сепаратора 9 виводили як кінцевий продукт, а газ (зворотний потік) змішували з газом із сепаратора 7 і подавали до теплообмінника 5 на нагрівання  $i=153.2491\text{ккал/кг}$ . Потім зворотний потік подавали до теплообмінника 2 на подальше нагрівання, після чого подавали на вхід компресора 1.

Газ, що зріджується - чистий метан. Гідравлічні втрати відсутні, теплопритоки з навколишнього середовища віднесені до теплообмінників - для високотемпературного теплообмінника  $0.6\text{ккал/кг}$ , контуру глибокого охолодження  $0.3\text{ккал/кг}$ . Енергію, яку повертає детандер, використовують для приводу компресорів. ККД оцінювався щодо мінімальної роботи оборотного процесу зрідження газу. ККД: детандера 0.75, компресора 0.8, механічний 0.97. Недогрів: на теплому кінці теплообмінника 5K, в апараті повітряного охолодження (АПО) 12K. Температура навколишнього середовища 297K.

Таблиця

Основні параметри порівнюваних способів

	ККД, %	витрата енергії, кВт·г/кг ЗПГ
прототип	39.12	0.738
запропонований спосіб	43.96	0.657

У запропонованому способі одержують більш високий коефіцієнт корисної дії, а також витрачалось менше енергії на виробництво одиниці маси корисного продукту.

Таким чином, із даних таблиці видно, що запропонований спосіб має перевагу перед прототипом.

