

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

Відомий спосіб зрідження газу при низькому тиску (з парорідним турбодетандером) (Е.И. Микулин, К.Е. Тчанникова /Анализ циклов низкого давления с парожидкостным турбодетандером //Криогенная техника и кондиционирование, под ред. А.М. Архарова, - М.: 1991, стр.94.). Газ стискають компресором і направляють на охолодження до високотемпературного теплообмінника, після якого увесь газ направляють на розширення до детандера високого тиску. Після розширення в детандері високого тиску газ направляють до проміжного теплообмінника на охолодження, після якого газ розділяють на дві частини. Більшу частину газу направляють на розширення до детандера низького тиску, а меншу на розширення до дроселя. Після детандера низького тиску газ направляють до низькотемпературного теплообмінника на нагрівання, після якого газ направляють до проміжного теплообмінника на нагрівання і далі до високотемпературного теплообмінника на нагрівання, після чого газ направляють до компресора на стиск. Потік газу після дроселя подають до низькотемпературного теплообмінника на охолодження, в результаті чого газ зріджується і отриману рідину виводять як кінцевий продукт.

Відомий також спосіб зрідження газу при низькому тиску - спосіб П.Л. Капіца (С.Я. Герш /Глубокое охлаждение //Ч1, 2-е изд, М.: Советская наука, 1947, стр.153; М.П. Малков, И.Б. Данилов, А.Г. Зельдович и др. /Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения //М: Госэнергоиздат, 1963, стр.58). Газ стискають компресором і направляють на охолодження до високотемпературного теплообмінника, після якого газ розділяють на дві частини. Більшу частину газу направляють до детандера на розширення до кінцевого тиску, а меншу до низькотемпературного теплообмінника на охолодження, де газ зріджується. Отриману рідину направляють до дроселя на розширення до кінцевого тиску, в результаті чого частина рідини випаровується. Суміш, що утворилася, направляють до сепаратора, де рідину відокремлюють і виводять з циклу як кінцевий продукт. Газ із сепаратора змішують з газом після розширення в детандері і направляють до низькотемпературного теплообмінника на нагрівання. Після цього газ подають до високотемпературного теплообмінника на нагрівання і далі до компресора на стиск.

Відомі способи відрізняються значною необоротністю процесів в теплообмінниках, а також необхідністю роботи теплообмінників при максимальному тиску газу в циклі. Велика необоротність процесів не дозволяє досягти досить високих енергетичних показників циклу.

В основу винаходу поставлено задачу вдосконалення способу зрідження природного газу, в якому в результаті введення операції охолодження частини зворотного потоку газу двічі з наступним виділенням кінцевого продукту забезпечується збільшення відводу тепла від газу на самому низькому температурному рівні, що дозволяє досягти більшої холодопродуктивності в циклі і за рахунок цього збільшити коефіцієнт корисної дії, а також зменшити питому витрату енергії на одиницю маси отриманого продукту, що призведе до збільшення виходу корисного продукту.

Поставлена задача вирішена тим, що в способі зрідження природного газу шляхом стиску його, охолодження, відділення рідкої фази з подачею зворотного потоку на охолодження газу і далі в прямий потік, відповідно до пропозиції, зворотний потік газу після нагрівання розділяють на дві нерівні частини, більшу частину після стиску охолоджують і знову ділять на дві нерівні частини, з яких більшу частину подають в прямий потік газу, а меншу частину охолоджують з наступним виділенням кінцевого продукту, а газ змішують зі зворотним потоком.

Зі зниженням температурного рівня охолодження збільшуються енергетичні витрати на охолодження, внаслідок чого при зрідженні природного газу існує проблема відводу тепла конденсації на низькому температурному рівні. Зменшення енергетичних втрат в цьому процесі призводить до підвищення ефективності зрідження природного газу. Щоб зменшити втрати від нерівномірності температурного напору по довжині теплообмінника в запропонованому способі частину зворотного потоку охолоджують з наступним виділенням кінцевого продукту, внаслідок чого в високотемпературному теплообміннику забезпечується рівномірність теплообміну. В результаті досягається більш глибока регенерація холоду і зменшення ступеня необоротності теплообміну, що призводить до збільшення холодопродуктивності циклу, і, як наслідок, до збільшення виходу корисного продукту.

Пропонований спосіб зрідження природного газу представлений на схемі. Спосіб здійснюють таким чином.

Газ стискають компресором 1 до кінцевого тиску і подають до ступені високого тиску детандера 2 на розширення. В результаті розширення в детандері газ частково зріджується і суміш, що утворилася, подають до сепаратора 3 на поділ. Зріджений природний газ (ЗПГ) із сепаратора 3 виводять як кінцевий продукт, а газ (зворотний потік) подають до теплообмінника 4, де зворотний потік нагрівають і подають до теплообмінника 5, де його також нагрівають і розділяють на дві частини. Меншу частину зворотного потоку додають до вихідного, а більшу частину подають на стиск до компресора 6. В компресорі 6 газ стискають до проміжного тиску і подають на охолодження до теплообмінника 5, після чого розділяють на дві частини. Більшу частину подають до проміжної ступені детандера 2 на розширення, а меншу частину подають на охолодження до теплообмінника 4, в якому газ зріджується. Рідину після теплообмінника 4 подають до дроселя 7 на розширення до кінцевого тиску, в результаті чого частина рідини випаровується, і суміш, що утворилася, подають до сепаратора 8 на поділ. Рідину із сепаратора 8 виводять як кінцевий продукт, а газ змішують зі зворотним потоком після сепаратора 3.

Приклад 1 (за прототипом). Природний газ стискали компресором до тиску  $P=10\text{атм}$ ,  $i=228,8\text{ккал/кг}$  (де  $P$  - тиск,  $i$  - ентальпія) і направляли на охолодження до високотемпературного теплообмінника  $i=160,0\text{ккал/кг}$ , після чого газ розділяли на дві частини. Більшу частину газу направляли до детандера на розширення до кінцевого тиску  $P=1\text{атм}$ ,  $i=131,8\text{ккал/кг}$ , а меншу - до низькотемпературного теплообмінника на охолодження  $i=37,2\text{ккал/кг}$ , де газ зріджували. Отриману рідину направляли до дроселя на розширення до кінцевого тиску, в результаті чого частину рідини випаровували  $P=1\text{атм}$ ,  $i=37,2\text{ккал/кг}$ . Суміш, що утворилася, направляли до сепаратора, де рідину відокремлювали і виводили з циклу як кінцевий продукт  $i=9,3\text{ккал/кг}$ . Газ із сепаратора  $i=131,8\text{ккал/кг}$  змішували з газом після детандера і направляли до низькотемпературного теплообмінника на нагрівання  $i=151,5\text{ккал/кг}$ . Після

цього газ подавали до високотемпературного теплообмінника на нагрівання  $i=228,6\text{ккал/кг}$  і далі на вхід компресора.

Приклад 2 (за запропонованим способом). Газ стискали компресором 1 до кінцевого тиску  $P=200\text{атм}$ ,  $i=224,9\text{ккал/кг}$  і подавали до ступені високого тиску детандера 2 на розширення. В результаті розширення в детандері  $P=1\text{атм}$ ,  $i=122,0\text{ккал/кг}$  газ частково зріджувався і суміш, що утворилася, подавали до сепаратора 3 на поділ. Рідину  $i=9,3\text{ккал/кг}$  із сепаратора 3 виводили як кінцевий продукт, а газ (зворотний потік)  $i=131,8\text{ккал/кг}$  подавали до теплообмінника 4, де зворотний потік нагрівали  $i=154,0\text{ккал/кг}$  і подавали до теплообмінника 5, де його також нагрівали  $i=228,6\text{ккал/кг}$  і розділяли на дві частини. Меншу частину зворотного потоку подавали на стиск до компресора 1, а більшу частину подавали на стиск до компресора 6. В компресорі 6 газ стискали до проміжного тиску  $P=10\text{атм}$ ,  $i=228,8\text{ккал/кг}$  і подавали на охолодження до теплообмінника 5 ( $i=142,0\text{ккал/кг}$ ), після чого розділяли на дві частини. Більшу частину подавали до проміжної ступені детандера 2 на розширення, а меншу частину подавали на охолодження до теплообмінника 4, в якому газ зріджувався  $i=37,2\text{ккал/кг}$ . Рідину після теплообмінника 4 подавали до дроселя 7 на розширення до кінцевого тиску, в результаті чого частина рідини випаровувалася  $P=1\text{атм}$ ,  $i=37,2\text{ккал/кг}$ , і суміш, що утворилася, подавали до сепаратора 8 на поділ. Рідину  $i=9,3\text{ккал/кг}$  із сепаратора 8 виводили як кінцевий продукт, а газ змішували зі зворотним потоком після сепаратора 3  $i=131,8\text{ккал/кг}$ .

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, що повертається детандером, використовують в приводі 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  $5^\circ\text{K}$ , в апараті повітряного охолодження компресора  $12^\circ\text{K}$ . Температуру навколишнього середовища прийнято  $297^\circ\text{K}$ . Нуль ентропії та ентальпії відраховували від точки на лінії насиченої рідини з температурою  $100^\circ\text{K}$  ( $P=0,356\text{атм}$ ).

Таблиця

Основні параметри порівнюваних способів

	ККД, %	витрата енергії, кВт·г/кг ЗПГ
прототип	26,23	1,101
запропонований спосіб	30,33	0,952

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

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

