



(19) **RU** <sup>(11)</sup> **2 170 894** <sup>(13)</sup> **C2**  
(51) МПК<sup>7</sup> **F 25 J 1/02**

РОССИЙСКОЕ АГЕНТСТВО  
ПО ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

(21), (22) Заявка: 96123760/06, 19.12.1996

(24) Дата начала действия патента: 19.12.1996

(30) Приоритет: 20.12.1995 US 08/575,436

(43) Дата публикации заявки: 20.02.1999

(46) Дата публикации: 20.07.2001

(56) Ссылки: US 4504296 A, 12.03.1985. SU 476766 A, 10.12.1975. SU 1355138 A3, 23.11.1987. SU 423990 A, 11.09.1974. GB 1487466 A, 28.09.1977. FR 2545589 A, 09.11.1984.

(98) Адрес для переписки:  
129010, Москва, ул. Большая Спасская 25,  
стр.3, ООО "Городисский и Партнеры", Томской  
Е.В.

(71) Заявитель:  
ФИЛЛИПС ПЕТРОЛЕУМ КОМПАНИ (US)

(72) Изобретатель: ЛОУ Уильям Раймонд (US),  
АНДРЕСС Дональд Ли (US), ХАУСЕР Кларенс  
Гленн (US)

(73) Патентообладатель:  
ФИЛЛИПС ПЕТРОЛЕУМ КОМПАНИ (US)

(74) Патентный поверенный:  
Томская Елена Владимировна

(54) СПОСОБ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ В ПРОЦЕССЕ КАСКАДНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

(57)

Передача нагрузки на привод в каждом холодильном цикле осуществляется путем охлаждения жидкого холодильного агента с более высокой температурой кипения перед мгновенным испарением посредством теплопередачи непрямого действия к парообразному холодильному агенту с более

низкой температурой кипения в примыкающем цикле перед сжатием этого парообразного хладагента. Регулирование распределения нагрузок между приводами в примыкающих холодильных циклах в процессе каскадного охлаждения обеспечивает более эффективную эксплуатацию привода. 3 с. и 19 з.п. ф-лы, 2 ил., 1 табл.

RU 2 170 894 C2

RU 2 170 894 C2



(19) **RU** <sup>(11)</sup> **2 170 894** <sup>(13)</sup> **C2**  
(51) Int. Cl.<sup>7</sup> **F 25 J 1/02**

RUSSIAN AGENCY  
FOR PATENTS AND TRADEMARKS

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21), (22) Application: 96123760/06, 19.12.1996  
(24) Effective date for property rights: 19.12.1996  
(30) Priority: 20.12.1995 US 08/575,436  
(43) Application published: 20.02.1999  
(46) Date of publication: 20.07.2001  
(98) Mail address:  
129010, Moskva, ul. Bol'shaja Spasskaja 25,  
str.3, OOO "Gorodisskij i Partnery", Tomskoj E.V.

(71) Applicant:  
FILLIPS PETROLEUM KOMPANI (US)  
(72) Inventor: LOU Uil'jam Rajmond (US),  
ADDRESS Donal'd Li (US), KhaUSER Klarens  
Glenn (US)  
(73) Proprietor:  
FILLIPS PETROLEUM KOMPANI (US)  
(74) Representative:  
Tomskaja Elena Vladimirovna

(54) **METHOD OF SEPARATION OF LOAD IN THE COURSE OF STAGE-TYPE COOLING**

(57) Abstract:  
FIELD: refrigerating engineering.  
SUBSTANCE: transfer of load of drive in each  
refrigerating cycle is effected by cooling  
the liquid refrigerating agent possessing  
higher boiling point before flash

vaporization by indirect heat transfer to  
vaporous refrigerating agent possessing  
lower boiling point in adjacent cycle before  
compression of this vaporous agent. EFFECT:  
enhanced efficiency. 22 cl, 2 dwg, 1 ex

RU 2 170 894 C2

RU 2 170 894 C2

Изобретение относится к способу и устройству для распределения общей нагрузки на компрессор между приводами многоступенчатых газовых турбокомпрессоров в процессе каскадного охлаждения, обеспечивая таким образом более эффективное действие привода.

Криогенное охлаждение газообразных в обычном состоянии материалов используется в целях разделения компонентов, очищения, хранения и для транспортировки указанных компонентов наиболее экономичным и удобным способом. Большинство таких систем охлаждения включают много общих операций независимо от входящих в состав газов и, соответственно, имеют много аналогичных проблем. Одна из обычных операций и сопровождающие ее проблемы связаны со сжатием холодильных агентов и распределением мощности, требуемой для сжатия, между приводами многоступенчатых газовых турбин, когда используется много циклов, каждый с отдельным холодильным агентом. Соответственно, настоящее изобретение будет описано с конкретными ссылками на переработку природного газа, однако оно может быть применено и к другим газовым установкам.

В обычной практике в области обработки природного газа для того, чтобы подвергнуть газ криогенной обработке, нужно отделить углеводороды, имеющие больший молекулярный вес, чем метан ( $C_{2+}$ ), от природного газа, тем самым в трубопроводе создается поток газа, состоящий преимущественно из метана, и поток  $C_{2+}$ , используемый для других целей. Зачастую поток  $C_{2+}$  разделяется на потоки отдельных компонентов, например  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ , и  $C_5$ .

Обычной практикой также является криогенная обработка природного газа с целью охлаждения его для транспортировки и хранения. Первостепенным поводом для охлаждения природного газа является то, что в результате охлаждения его объем уменьшается примерно 1/600, тем самым становится возможным хранить и транспортировать сжиженный газ в контейнерах, это решение более экономично и практично. Например, если газ транспортируется от источника поставки по трубопроводу до отдаленного места продажи, желательно эксплуатировать трубопровод при по существу постоянном и высоком коэффициенте нагрузки. Часто пропускная способность или производительность трубопровода превышает требуемую, тогда как в другое время требования могут превысить пропускную способность трубопровода. Для того чтобы снять пики в тех случаях, когда потребность превышает подачу, желательно сохранять излишек газа таким образом, чтобы он мог быть направлен на хранение, если поставка превысит требуемую, тем самым обеспечивая удовлетворение будущих пиков потребности материалом из хранилища. Одним из практических устройств для осуществления этого является перевод газа в жидкое состояние для хранения и последующее испарение жидкости, если спрос потребует этого.

Охлаждение природного газа имеет еще большее значение для создания возможности транспортировки газа от источника подачи газа до места его продажи, если источник и

рынок разделены на большое расстояние, а трубопровод недостижим или непрактичен. Особенно это важно, если транспортировка производится морскими судами. Транспортировка морем в газообразном состоянии обычно является непрактичной, поскольку для заметного уменьшения удельного объема газа требуется значительное сжатие, которое в свою очередь связано с необходимостью использования более дорогих контейнеров для его хранения.

Для того чтобы хранить и транспортировать природный газ в жидком состоянии, природный газ предпочтительно охлаждается от  $-151,1^{\circ}C$  до  $-162,2^{\circ}C$ , при этом давление его паров становится близким к давлению паров в атмосфере. Известно, что существует множество систем для охлаждения природного газа или подобных ему, в которых газ охлаждается путем последовательных проходов газа под увеличивающимся давлением через множество стадий охлаждения, вследствие чего газ охлаждается последовательно до все более низких температур до тех пор, пока не будет достигнута температура охлаждения.

Охлаждение обычно заканчивается путем теплообмена с одним или несколькими холодильными агентами, такими как пропан, пропилен, этан, этилен и метан. Как известно, холодильные агенты часто располагаются каскадным способом и каждый холодильный агент используется в замкнутом цикле охлаждения. Дальнейшее охлаждение жидкости возможно путем расширения сжиженного природного газа до атмосферного давления в одной или более стадиях. На каждой стадии сжиженный газ мгновенно испаряется до более низкого давления, в результате чего образуется двухфазная смесь жидкость - газ при значительно меньшей температуре. Жидкость регенерируется и может снова быть подвергнута мгновенному испарению. Таким образом, сжиженный газ продолжает охлаждаться до температуры хранения или транспортирования, подходящей для хранения сжиженного газа при давлении, близком к атмосферному. При этом расширении до давления, близкого к атмосферному, значительные объемы сжиженного газа мгновенно испаряются. Пары мгновенного испарения со стадий расширения обычно собираются и рециркулируют для сжижения или использования в качестве топливного газа для выработки энергии.

Очевидно, компрессор или компрессоры, используемые для сжатия холодильного агента для данного цикла, имеют режимы эксплуатации, которые предпочтительно определяются эффективностью турбокомпрессора и надежностью/ожидаемым сроком службы оборудования. Например, перегрузка данного компрессора приведет к чрезмерному износу или повреждению этого компрессора. К несчастью, существует множество условий эксплуатации, которые могут создавать отклонения и воздействовать на нагрузку отдельных компрессоров. Такие отклонения включают изменения в составе исходного газа, изменения в эффективности турбины компрессора, связанные с данным холодильным агентом, изменения климата, которые влияют на мощность, которой располагает турбина, изменения в величине возврата выкипевшего пара, которые

являются результатом условий загрузки/разгрузки корабля, изменения, которые связаны с остановкой или запуском турбины (по графику или не по графику), если более, чем одна турбина используется параллельным способом, изменения температуры, давления, скорости потока, либо состава пара, который подлежит сжижению, в результате различных процессов переработки (агрегат фракционирования, теплообменник и т.п.), но не ограничиваются ими. Несмотря на то, что отдельные турбины, которые приводят в действие компрессоры, обрабатывающие различные холодильные агенты, могут быть защищены такими устройствами, как механизмы регулирования скорости и т.п., эти механизмы не обеспечивают полной защиты, поскольку изменения в эксплуатации одной турбины изменят работу всей криогенной системы и могут привести к перегрузке или несбалансированной нагрузке других компрессоров.

Целью изобретения является повышение эффективности процесса сжижения путем распределения нагрузки на компрессор между приводами газовых турбокомпрессоров в процессе каскадного охлаждения, тем самым обеспечивая более эффективную работу привода.

Следующей целью изобретения является увеличение общей хладопроизводительности каскадного процесса путем использования хладопроизводительности, получаемой от одного или нескольких недостаточно нагруженных приводов газовых турбин для хладагента.

Следующей целью настоящего изобретения является поддержание нагрузки на каждый компрессор на уровне оптимальных или близких к оптимальным нагрузок путем распределения нагрузки между наличными компрессорами хладагента.

Еще одной целью изобретения является способ распределения нагрузки и связанное с ним устройство - простое, компактное и экономически эффективное.

Еще одной целью изобретения является способ распределения нагрузки и устройство, в котором применяются имеющиеся в наличии компоненты.

В одном воплощении изобретения раскрыт усовершенствованный способ передачи нагрузок компрессора между приводами газовых турбин, связанных с различными холодильными циклами в процессе каскадного охлаждения, причем указанный способ номинально включает контактирование жидкого холодильного агента с более высокой точкой кипения посредством устройств для теплопередачи непрямого действия с парообразным холодильным агентом с более низкой точкой кипения перед мгновенным испарением указанного жидкого холодильного агента с более высокой точкой кипения и перед возвратом указанного парообразного холодильного агента в компрессор для холодильного агента с более низкой точкой кипения.

В другом воплощении этого изобретения раскрыта сущность устройства для передачи нагрузки компрессора между приводами газовых турбин, связанных с различными холодильными циклами в каскадном цикле охлаждения, которое включает компрессор, устройства теплопередачи непрямого

действия, трубопровод для потока жидкого холодильного агента с более высокой точкой кипения в указанные устройства для теплопередачи непрямого действия, устройства теплопередачи непрямого действия, трубопровод для потока парообразного холодильного агента с более низкой точкой кипения из устройств для теплопередачи непрямого действия в компрессор, устройства для теплопередачи непрямого действия, трубопровод для потока жидкого холодильного агента с более высокой точкой кипения в устройства для понижения давления и устройства для понижения давления.

В еще одном воплощении изобретения раскрыт способ усовершенствованного регулирования для уравнивания нагрузок между приводами газовых турбин в примыкающих циклах охлаждения в процессе каскадного охлаждения, в котором жидкий холодильный агент с более высокой точкой кипения в одном цикле охлаждается перед мгновенным испарением в результате контакта посредством устройств для теплопередачи непрямого действия с парообразным холодильным агентом с более низкой точкой кипения в примыкающем цикле перед сжатием указанного пара, причем этот способ включает:

(1) определение нагрузок на приводы газовых турбин для циклов холодильных агентов с более высокой точкой кипения и более низкой точкой кипения; (2) сопоставление соответствующих нагрузок от каждого привода и в результате определение направления передачи нагрузки на привод для более эффективного действия привода; (3) течение, по меньшей мере, части потока парообразного холодильного агента с более низкой точкой кипения в устройстве для теплопередачи непрямого действия, в результате чего образуется поток нагретого водяного пара; (4) течение указанного потока нагретого пара в компрессора холодильного агента с низкой точкой кипения; (5) разделение потока жидкого холодильного агента с высокой точкой кипения на первый поток жидкости и второй поток жидкости; (6) течение указанного второго потока жидкости в указанные устройства для теплопередачи непрямого действия, в результате чего образуется второй охлажденный поток; (7) регулирование относительной скорости указанного первого потока и указанного второго потока в соответствии со ступенью (2) посредством регулировочного клапана, в котором скорость потока указанного второго потока жидкости возрастает по мере передачи нагрузки на привод холодильного агента с более низкой точкой кипения, и (8) рекомбинация указанного обработанного второго потока с указанным первым потоком для образования комбинированного потока и течение указанного комбинированного потока в устройства для понижения давления или течение указанного первого потока и указанного обработанного второго потока в отдельные устройства для понижения давления.

Изобретение будет более понятным из следующего описания и приложенных чертежей, на которых:

фиг. 1 - упрощенная схема потоков криогенного процесса производства

сжиженного природного газа, на которой показан способ распределения нагрузок и устройство по настоящему изобретению.

Фиг. 2 - упрощенная схема потоков, на которой более подробно показаны способ распределения нагрузок и устройство, изображенное на фиг. 1.

Поскольку настоящее изобретение относится к распределению нагрузки между несколькими приводами газовых турбин, которые в свою очередь приводят в действие компрессоры для сжатия холодильных агентов, которые затем применяются в процессе криогенной обработки газа, ниже следующее описание в целях обеспечения простоты и ясности будет ограничено криогенным охлаждением потока природного газа для производства сжиженного природного газа. Проблемы, связанные с распределением нагрузки, являются общими для всех криогенных процессов охлаждения газа, в которых используются несколько циклов сжатия и несколько приводов газовых турбин.

Как было отмечено ранее, если скорость подачи в процессе криогенного охлаждения газа поддерживается ниже заранее определенного максимума, причем этот максимум определяется, исходя из эффективной работы процесса и ограничений оборудования, включая производительность компрессоров, а не из свойств газа или изменений условий процесса эксплуатации, процесс будет эксплуатироваться эффективно в пределах возможностей оборудования, в особенности турбокомпрессорных агрегатов. Однако такая нормальная и постоянная эксплуатация не может поддерживаться все время. Например, имеется ряд условий, ограничивающих работу компрессора, которые имеют отклонения в процессе эксплуатации. К таким отклонениям могут быть отнесены изменения в течение суток или сезона, либо они могут быть отнесены за счет износа или задиров и уменьшения эффективности работы различного связанного с процессом оборудования. Эти отклонения включают изменения в составе исходного газа, изменения окружающей среды, которые влияют на потребляемую турбиной мощность, изменения КПД турбины/компрессора в данном холодильном цикле, изменения, связанные с изменениями выпаривания сжиженного природного газа, которые определяются такими факторами, как загрузка и разгрузка судов, изменения, связанные с остановкой и запуском турбины (как по графику, так и вне графика), если используется несколько турбин при параллельной работе в данном холодильном цикле, и изменения, связанные с проведением различных стадий процесса, которые могут на своем месте воздействовать на составы пара и скорости потоков, такие как агрегаты для фракционирования, сосуды для мгновенного испарения, сепараторы и т.п., но не ограничиваются ими. Влияния таких изменений или отклонений на работу турбокомпрессорных агрегатов и в результате на производительность процесса значительно понижаются в соответствии с настоящим изобретением.

Сжижение потока природного газа  
Криогенные установки имеют  
разнообразные схемы; наиболее эффективной

и с большим КПД является работа в схеме каскадного типа и этот тип в сочетании с охлаждением путем расширения. Кроме того, поскольку способы производства сжиженного природного газа (LNG) включают отделение углеводородов с более высокими молекулярным весом, чем метан, в качестве своего первого этапа, в описании установки для криогенного производства сжиженного природного газа действительно описывается аналогичная установка для удаления углеводородов  $C_{2+}$  из потока природного газа.

В предпочтительном воплощении, в котором используется система каскадного охлаждения, изобретение относится к последовательному охлаждению потока природного газа при повышенном давлении, например около 4,482 МПа (абс), путем последовательного охлаждения потока газа путем прохода через многостадийный пропановый цикл, многостадийный этановый или этиленовый цикл и либо (а) замкнутый метановый цикл, за которым следует цикл расширения для дальнейшего охлаждения его и снижения давления до величин, близких к атмосферному, либо (b) открытый конечный метановый цикл, в котором используется часть подаваемого газа как источник метана и который включает многостадийный цикл расширения для его дальнейшего охлаждения и снижения давления до величин, близких к атмосферному. Последовательность циклов охлаждения такова, что холодильный агент, имеющий самую высокую точку кипения, используется первым, за ним следует холодильный агент, имеющий промежуточную точку кипения, и, наконец, холодильный агент, имеющий самую низкую точку кипения.

Стадии предварительной обработки снабжены устройствами для удаления нежелательных компонентов, таких как газы кислот, меркаптаны, ртуть и влага из потока природного газа в потоке, поданном на установку.

Состав этого потока газа может значительно изменяться. Используемый в данном случае поток природного газа представляет собой любой поток газа, в принципе состоящий из метана, который создает большую часть потока подаваемого природного газа, причем этот поток подаваемого газа, например, содержит его, по меньшей мере, 85% по объему, причем остальную часть составляют этан, высшие углеводороды, азот, двуокись углерода и второстепенные количества других примесей, таких как ртуть, сероводород, меркаптаны. Стадии предварительной обработки могут быть стадиями разделения и расположены либо выше по потоку, чем циклы охлаждения, либо расположены ниже по потоку, чем одна из ранних стадий охлаждения в начальном цикле.

Далее приведен далеко не ограниченный перечень разработанных средств, которые могут быть получены специалистами. Газы кислот и в меньшей степени меркаптаны удаляются путем процесса сорбции с использованием водного раствора носителя амина. Стадия обработки обычно проводится выше по потоку, чем стадии охлаждения в начальном цикле. Большая часть воды обычно удаляется в виде жидкости посредством двухфазной газожидкостной сепарации, которая следует за сжатием газа и

охлаждением выше по потоку, чем начальный холодильный цикл, а также ниже по потоку после первой стадии охлаждения в начальном холодильном цикле. Ртуть обычно удаляется при помощи фильтров из сорбентов ртути. Оставшиеся количества воды и газов кислот обычно удаляются посредством использования фильтров из соответствующим образом подобранных сорбентов, например регенерируемых молекулярных сит. Процессы, в которых используются фильтры из сорбентов, обычно расположены ниже по потоку, чем первая стадия охлаждения в начальном холодильном цикле.

Природный газ обычно поставляется в процесс сжижения при повышенном давлении либо производится его сжатие для повышения давления, причем сжатие должно производиться до величин, больших чем 3,447 МПа (абс) предпочтительно от приблизительно 3,447 МПа (абс) до 6,205 МПа (абс), еще более предпочтительно от около 4,137 МПа (абс) до около 4,654 МПа (абс), а наиболее предпочтительно около 4,482 МПа (абс). Температура потока обычно ниже окружающей либо несколько выше окружающей. Представительный диапазон температур составляет от 15,6°C до 48,9°C.

Как было отмечено ранее, поток природного газа охлаждается в нескольких многостадийных (например, трех) циклах или ступенях путем теплопередачи непрямого действия с несколькими холодильными агентами, предпочтительно тремя. Общая эффективность охлаждения в данном цикле повышается с увеличением числа стадий, однако это повышение эффективности сопровождается соответствующим ростом "чистых" капитальных затрат и сложности процесса. Подаваемый газ предпочтительно проходит через эффективное число стадий охлаждения, номинально равное 2, предпочтительно от двух до четырех, а более предпочтительно три стадии, в первый замкнутый цикл охлаждения, где используется холодильный агент с относительно высокой точкой кипения. Такой холодильный агент предпочтительно состоит по большей части из пропана, пропилена или их смеси, более предпочтительным является пропан, а наиболее предпочтительный холодильный агент состоит по существу из пропана. После этого поданный обработанный газ течет через эффективное число стадий, номинально две, предпочтительно от двух до четырех, а более предпочтительно три стадии, во второй замкнутый холодильный цикл путем теплообмена с холодильным агентом, имеющим более низкую температуру кипения. Такой холодильный агент предпочтительно состоит по большей части из этана, этилена или их смеси, более предпочтительными является этилен, а наиболее предпочтительный холодильный агент состоит по существу из этилена. Каждая стадия охлаждения включает отдельную зону охлаждения.

Обычно подаваемый природный газ содержит такие количества компонентов  $C_{2+}$ , чтобы образовать в результате жидкость, насыщенную  $C_{2+}$  в одной или нескольких стадиях охлаждения. Эта жидкость удаляется посредством устройств для газожидкостной сепарации, предпочтительно одного или нескольких обычных газожидкостных

сепараторов. Обычно последовательное охлаждение природного газа на каждой стадии регулируется таким образом, чтобы удалить из газа так много, как только возможно,  $C_2$  и углеводородов с более высоким молекулярным весом для того, чтобы образовать первый поток газа, состоящий преимущественно из метана, и второй поток газа, содержащий значительные количества этана и более тяжелых компонентов. Эффективное число устройств для газожидкостной сепарации расположено в оперативных пунктах ниже по потоку после зон охлаждения для удаления потоков жидкостей, насыщенных компонентами  $C_{2+}$ . Точное расположение и число газожидкостных сепараторов зависит от ряда технологических параметров, таких как состав  $C_{2+}$  в потоке подаваемого природного газа, желаемое теплосодержание готового сжиженного природного газа, количества компонентов  $C_{2+}$  для применения в других целях и других факторов, обычно учитываемых специалистами по эксплуатации установок для производства сжиженного природного газа и установок для производства газа. Из потока или потоков углеводородов  $C_{2+}$  метан может быть удален посредством одной стадии мгновенного испарения или разделения на фракции в колонне. В последнем из этих случаев, обогащенный метаном поток может быть непосредственно возвращен под давлением в процессе сжижения. В предыдущем случае обогащенный метаном поток может быть подвергнут повторному сжатию и рециркулированию либо использоваться как топливный газ. Поток или потоки углеводородов  $C_{2+}$  либо поток дегетанизированных углеводородов  $C_{2+}$  могут быть использованы как топливо либо могут быть подвергнуты дальнейшей обработке, такой как фракционирование, в одной или нескольких зонах фракционирования для производства отдельных потоков, обогащенных конкретными химическими компонентами (например,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  и  $C_{5+}$ ). На последней стадии второго холодильного цикла, поток газа, состоящего в основном из метана, конденсируется (т.е. сжижается) в большей своей части, предпочтительно полностью. Давление в процессе на этом участке только немного ниже, чем давление газа, поступающего на первую стадию первого цикла.

Поток сжиженного природного газа после этого охлаждается дальше в третьей ступени или цикле в одном из двух воплощений. В одном воплощении поток сжиженного природного газа охлаждается глубже путем непрямого теплообмена с третьим замкнутым циклом охлаждения, где поток сконденсированного газа переохлаждается в результате прохода через эффективный ряд стадий, номинально 2, предпочтительно от двух до 4, наиболее предпочтительно 3, где охлаждение обеспечивается посредством третьего холодильного агента, точка кипения которого ниже, чем холодильного агента, используемого во втором цикле. Этот холодильный агент предпочтительно состоит по большей части из метана, а более предпочтительно в основном из метана. Во втором и предпочтительном воплощении

поток сжиженного природного газа переохлаждается посредством контакта с газами после мгновенного испарения в главном экономайзере метана способом, который будет описан ниже.

В четвертом цикле или ступени сжиженный газ охлаждается далее в результате расширения и сепарации газа мгновенного испарения от охлаждающей жидкости. Способом, который будет описан ниже, азот удаляется из системы и сконденсированный продукт доводится до кондиции либо на участке этой ступени, либо в отдельной окончатальной ступени. Ключевым фактором, на основании которого различаются замкнутый цикл и открытый цикл, является начальная температура сжижаемого потока перед мгновенным испарением при давлении, близком к атмосферному, относительные количества пара мгновенного испарения, полученного в результате указанного мгновенного испарения и свойства паров мгновенного испарения. В то время, как большая часть пара мгновенного испарения рециркулирует в компрессоры метана в системе открытого цикла, пар мгновенного испарения в системе замкнутого цикла обычно используется в качестве топлива.

В четвертом цикле или ступени в системах обработки метана либо открытого, либо замкнутого цикла сжиженный продукт охлаждается посредством по крайней мере одной, предпочтительно от двух до четырех, а наиболее предпочтительно трех стадий расширения, причем в каждом расширении используются либо дроссельные вентили Джоуля-Томсона, либо гидравлические детандеры с последующим разделением газожидкостного продукта в сепараторе. При использовании гидравлического детандера и надлежащей его эксплуатации, очень большая эффективность, связанная с регенерацией мощности, очень большое снижение температуры потока и производство меньшего количества пара в продолжении ступени мгновенного испарения смогут зачастую возместить более дорогие капитальные затраты и эксплуатационные расходы, связанные с детандером. В одном воплощении, используемом в системе открытого цикла, дополнительное охлаждение сжиженного при высоком давлении продукта перед его мгновенным испарением становится возможным в результате первого мгновенного испарения части этого потока посредством одного или нескольких гидравлических детандеров и затем посредством устройств для теплопередачи непрямого действия, в которых используется указанный пар мгновенного испарения для охлаждения потока, сжиженного под высоким давлением перед мгновенным испарением. Мгновенно испаренный продукт затем рециркулирует посредством возврата в соответствующий участок, исходя из температуры и давления в открытом метановом цикле.

Если низкий продукт, поступающий в четвертый цикл, находится под давлением около 4,137 МПа (абс), представительные давления в процессе мгновенного испарения для трехстадийного процесса мгновенного испарения составляют около 1,314 МПа (абс) и 0,17 МПа (абс). В системе открытого цикла пар, мгновенно испаренный или фракционированный на стадии отделения

азота, которая будет описана далее, и тот пар, который был мгновенно испарен на ступенях расширения путем мгновенного испарения, используются на третьей ступени или цикле, который был упомянут ранее. В системе замкнутого цикла пар из стадий мгновенного испарения может также быть использован в качестве охлаждающего агента перед любым рециклом или использован как топливо. В системе либо открытого либо замкнутого цикла мгновенное испарение сжиженного потока при давлении, близком к атмосферному, произведет сжиженный природный газ в качестве продукта с температурой около от  $-151,1^{\circ}\text{C}$  до  $-162^{\circ}\text{C}$ .

Для поддержания приемлемой величины теплосодержания сжиженного продукта, когда в подаваемом природном газе имеется значительное количество азота, азот необходимо концентрировать и удалять на каком-либо участке процесса. Специалисты располагают для этой цели различной технологией. Далее следуют примеры. Когда используется открытый метановый цикл и концентрация азота в подаваемом газе мала, обычно меньше, чем приблизительно 1,0% по объему, удаление азота обычно достигается путем вывода маленького потока из входного или выходного патрубков компрессора метана, которые находятся под высоким давлением. При замкнутом цикле и при аналогичных концентрациях азота в подаваемом газе сжиженный поток обычно мгновенно испаряется при следующих условиях: давление в процессе, близкое к атмосферному давлению, одна ступень, обычно барабан для мгновенного испарения. В таком случае содержащие азот пары мгновенного испарения обычно используются как топливный газ для газовых турбин, которые приводят в действие компрессоры. Готовый сжиженный природный газ, который теперь находится под давлением, близком к атмосферному давлению, направляется в хранилище. Когда концентрация азота во входящем подаваемом газе составляет от около 1,0 до около 1,5 объемных % и используется открытый или замкнутый цикл, для удаления азота можно подвергнуть поток сжиженного газа из третьего цикла охлаждения мгновенному испарению перед четвертой стадией испарения. Пар мгновенного испарения будет содержать соответствующую концентрацию азота и может быть впоследствии использован как топливный газ. Типичное давление при мгновенном испарении для удаления азота, при этих концентрациях составляет около 2,758 МПа (абс). Если подаваемый поток содержит концентрацию азота больше чем 1,5 объемных % и используется открытый или замкнутый цикл, ступень мгновенного испарения, следующая за третьей ступенью охлаждения, может не обеспечить достаточное удаление азота и потребуются колонна отвода азота, в которой образуются поток пара, обогащенного азотом, и поток жидкости. В предпочтительном воплощении с использованием колонны отвода азота поток сжиженного метана высокого давления в экономайзере метана разделяется на первую и вторую части. Первая часть мгновенно испаряется приблизительно при 2,758 МПа (абс) и двухфазная смесь подается как исходный поток в колонну отвода азота. Вторая часть потока метана, сжиженного при

высоком давлении, подвергается дальнейшему охлаждению, протекая через экономайзер метана, после чего мгновенно испаряется до 2,758 МПа (абс), и полученная в результате двухфазная смесь подается в колонну, где обеспечивается ее дефлегмация. Поток обогащенного азотом газа, полученный с верха колонны отвода азота, обычно используется как топливо. С низа колонны получается поток жидкости, который подается на первую стадию расширения метана.

Охлаждение холодильными агентами для сжижения природного газа

При сжижении природного газа в процессе каскадного охлаждения определяющим является использование одного или нескольких холодильных агентов для передачи тепловой энергии от потока природного газа холодильному агенту и в конце концов передачи этой энергии в окружающую среду. По существу, система охлаждения работает как тепловой насос для отвода тепловой энергии от потока природного газа по мере того, как поток постепенно охлаждается до все более низких температур.

В заявляемом процессе используется ряд типов охлаждения, которые включают (а) теплопередачу непрямого действия, (б) испарение и (с) расширение или уменьшение давления, но не ограничиваются ими. Выражение "теплопередача непрямого действия" используется здесь для обозначения процесса, в котором холодильный агент охлаждает среду, которая подлещит охлаждению, без действительного физического контакта между холодильным агентом и средой, которая подлещит охлаждению. К конкретным примерам относятся теплопередача, которая осуществляется в кожухотрубном теплообменнике, в котле с теплообменными трубками и в ребристом пластинчатом теплообменнике, ребра которого изготовлены из алюминия с твердым припоем. Физическое состояние холодильного агента и среды, которая подлещит охлаждению, могут изменяться в зависимости от требований к системе и к типу выбранного теплообменника. Так, в процессе по изобретению кожухотрубный теплообменник обычно используется там, где холодильный агент находится в жидком состоянии, а среда, которая подлещит охлаждению, находится в жидком или газообразном состоянии, в то время как ребристый пластинчатый теплообменник может обычно использоваться в тех случаях, когда холодильный агент находится в газообразном состоянии, а среда, которая подлещит охлаждению, находится в жидком состоянии. В заключение, теплообменник типа котла с теплообменными трубками обычно используется там, где среда, подлежащая охлаждению, представляет собой жидкость или газ, а холодильный агент подвергается фазовому переходу из жидкого состояния в газообразное состояние в продолжение теплообмена.

Испарительное охлаждение относится к охлаждению среды путем парообразования или испарения части среды, причем система поддерживается под постоянным давлением. Так, в продолжение испарения часть среды, которая испаряется, поглощает тепло из той части среды, которая остается в жидком состоянии, и, следовательно, охлаждает

жидкую часть.

В конце концов, расширение или охлаждение путем уменьшения давления относится к охлаждению, которое происходит, когда давление в газо-, жидко- или двухфазной системе уменьшается при проходе через устройства для понижения давления. В одном воплощении это устройство для расширения обозначает дросселирующий вентиль Джоуля-Томсона. В другом воплощении устройства для расширения представляют собой либо жидкостный, либо газовый детандер. В связи с тем что детандеры регенерируют мощность из процесса расширения, при расширении возможны более низкие температуры обработки потока. В следующих далее описании и чертежах текст или чертежи изображают расширение холодильного агента при протекании его через дроссельный клапан, после которого имеет место последующая сепарация газообразной и жидкой частей в охладителях холодильного агента, в которых также происходит процесс теплопередачи непрямого действия. Поскольку эта упрощенная схема является работоспособной и в ряде случаев предпочтительной по своей стоимости и простоте, она может быть более эффективной для осуществления расширения и сепарации с последующим частичным испарением как ступеней сепарации, например сочетание дросселирующих клапанов и барабанов мгновенного испарения перед процессом теплопередачи непрямого действия в охладителях. В другом работоспособном воплощении дроссельный или регулирующий вентиль могут быть не отдельными узлами, но представляют собой выполненную как одно целое часть охладителя холодильного агента (т.е. мгновенное испарение происходит при входе сжиженного холодильного агента в охладитель).

В первом холодильном цикле охлаждение обеспечивается путем сжатия газообразного холодильного агента с более высокой точкой кипения, предпочтительно пропана, до такой величины давления, при которой он может сжиматься за счет теплопередачи непрямого действия к такой передающей тепло среде, которая в конце концов использует окружающую среду в качестве приемника отводимого тепла, причем этот приемник тепла обычно представляет собой атмосферу, источник свежей воды, источник соленой воды, землю или сразу два или более из упомянутых ранее. Сконденсированный холодильный агент в таком случае проходит одну или несколько ступеней охлаждения путем расширения посредством соответствующих устройств для расширения, в результате чего производятся двухфазные смеси, обладающие значительно более низкими температурами. В одном воплощении главный поток разделяется по крайней мере на два отдельных потока, предпочтительно от двух до четырех потоков, а наиболее предпочтительно на три потока, причем каждый поток расширяется отдельно до заданной величины давления. Каждому потоку затем обеспечивается испарительное охлаждение при помощи теплопередачи непрямого действия с одним или несколькими выбранными потоками, причем одним из этих потоков является поток природного газа,



подлежащего сжижению. Число отдельных потоков холодильных агентов должно соответствовать числу стадий компрессора холодильного агента. Испаренный холодильный агент из каждого соответствующего потока в таком случае возвращается на соответствующую стадию в компрессор холодильного агента (например, два отдельных потока соответствуют двухстадийному компрессору). В наиболее предпочтительном воплощении, весь сжиженный холодильный агент расширяется до заданного заранее давления и этот поток в таком случае используется для обеспечения испарительного охлаждения посредством теплопередачи непрямого действия с одним или несколькими выбранными потоками, причем один такой поток представляет собой природный газ, подлежащий сжижению. Часть сжиженного холодильного агента затем удаляется из устройств для теплопередачи непрямого действия, охлаждается путем расширения до более низкого давления и соответственно низкой температуры, при этом он обеспечивает испарительное охлаждение при помощи устройства для теплопередачи непрямого действия с одним или несколькими определенными потоками, причем один такой поток представляет собой поток природного газа, который подлежит сжижению. Номинально, в этом воплощении должны использоваться две такие ступени охлаждения путем охлаждения/испарения в результате расширения, предпочтительно от двух до четырех, а наиболее предпочтительно три. Как и в первом воплощении, пар холодильного агента с каждой ступени возвращается в соответствующие приемное отверстие многостадийного компрессора.

В предпочтительном каскадном воплощении большая часть охлаждения для ожижения путем охлаждения холодильных агентов с более низкой точкой кипения (т.е. холодильных агентов, используемых во втором и третьем циклах) становится возможной путем охлаждения этих потоков посредством агентов с более высокой точкой кипения. Этот способ охлаждения называется "каскадное охлаждение". Фактически холодильные агенты с более высокой точкой кипения выполняют функцию приемников отводимого тепла для холодильных агентов с более низкой точкой кипения или, по-другому, тепловая энергия откачивается от потока природного газа, подлежащего сжижению, к холодильному агенту с более низкой точкой кипения и в таком случае откачивается (т.е. передается) к одному или нескольким холодильным агентам с более высокой точкой кипения перед передачей в окружающую среду посредством приемников отводимого тепла в окружающей среде (например, свежая вода, соленая вода, атмосфера). Как и в первом цикле, холодильный агент, используемый во втором и третьем циклах, сжимается посредством многоступенчатых компрессоров до заранее определенного давления. Если возможно и экономически целесообразно, сжатый парообразный холодильный агент сначала охлаждается путем теплообмена непрямого действия с одним или несколькими охлаждающими агентами (например, воздух, соленая вода, свежая вода), непосредственно соединенными с приемниками отводимого тепла в

окружающей среде. Это охлаждение может производиться посредством межступенчатого охлаждения между стадиями компрессора либо охлаждением сжатого продукта. Сжатый поток затем охлаждается глубже посредством теплообмена непрямого действия с одним или несколькими описанными ранее стадиями охлаждения для холодильного агента с более высокой точкой кипения.

Холодильный агент второго цикла, предпочтительно этилен, в начале предпочтительно охлаждается посредством непрямого теплообмена с одним или несколькими охлаждающими агентами, непосредственно соединенными с приемниками отводимого тепла в окружающей среде (то есть между стадиями и/или после охлаждения, следующего за сжатием), и затем охлаждается более глубоко, и в конце концов сжимается посредством последующего контакта с первой и второй, либо первой, второй и третьей стадиями охлаждения для холодильного агента с наиболее высокой точкой кипения, который используется в первом цикле. Предпочтительно, чтобы холодильные агенты второго и первого циклов представляли собой соответственно этилен и пропан.

При использовании каскадной системы замкнутого цикла с тремя холодильными агентами холодильный агент в третьем цикле сжимается ступенчатым способом, предпочтительно, хотя необязательно, охлаждается посредством теплопередачи непрямого действия в приемники отводимого тепла окружающей среды (то есть между стадиями и/или после охлаждения, следующего за сжатием) и затем охлаждается путем теплообмена непрямого действия со всеми, либо с выбранными стадиями охлаждения, в которых предпочтительно используются пропан и этилен, как соответствующие холодильные агенты. Предпочтительно, чтобы этот поток контактировал последовательно с каждой более холодной стадией процесса охлаждения в первом и втором циклах охлаждения соответственно.

В каскадной системе охлаждения открытого типа, такой как показана фиг. 1, первый и второй цикл эксплуатируются способом, аналогичным тому, который изложен для замкнутого цикла. Однако, систему открытого метанового цикла можно быстро отличить от традиционных замкнутых циклов охлаждения. Как было отмечено ранее при обсуждении четвертого цикла или ступени, заметная часть потока сжиженного природного газа, которая первоначально находится под повышенным давлением, охлаждается приблизительно  $-162,2^{\circ}\text{C}$  путем охлаждения за счет расширения ступенчатым способом до величины давления, близкого к атмосферному. На каждой ступени производятся значительные количества пара, обогащенного метаном при заданном давлении. Каждый поток пара предпочтительно подвергается эффективной теплопередаче в экономайзерах метана и предпочтительно возвращается ко входному отверстию стадии компрессора при температуре, близкой к окружающей. В течение протекания через метановые экономайзеры пары мгновенного испарения контактируют с более теплыми потоками

способом противотока в последовательности, которая спланирована таким образом, чтобы максимально увеличить охлаждение более теплых потоков. Давление, выбранное для каждой стадии охлаждения путем расширения таково, что для каждой стадии объем выработанного газа плюс сжатый объем пара с примыкающей нижней стадии обеспечивают в результате эффективное полное использование многостадийного компрессора. Охлаждение между стадиями и охлаждение окончательно сжатого газа являются предпочтительными и предпочтительно завершаются посредством теплообмена непрямого действия с одним или несколькими охлаждающими агентами, непосредственно соединенными с приемниками отводимого тепла в окружающей среде. Сжатый обогащаемый метаном поток затем охлаждается еще глубже посредством теплообмена непрямого действия с холодильным агентом первого цикла на всех стадиях, более предпочтительно только на одной стадии. Охлажденный обогащенный метаном поток охлаждается еще глубже путем теплообмена непрямого действия с парами мгновенного испарения в главном экономайзере метана и затем комбинируется с подаваемым потоком природного газа на таком участке процесса сжижения, где поток подаваемого природного газа и охлажденный поток, обогащенный метаном, находятся в одинаковых условиях по температуре и давлению, предпочтительно перед входом в одну из стадий охлаждения этилена, более предпочтительно непосредственно перед первой стадией охлаждения этилена.

Оптимизация посредством теплопередачи между стадиями и между циклами.

В наиболее предпочтительных воплощениях принимаются меры для дальнейшей оптимизации эффективности процесса путем возврата потоков газообразного холодильного агента ко входному отверстию соответствующих компрессоров при температуре, близкой к температуре окружающей среды. Эти меры не только повышают общую производительность, но значительно уменьшают трудности, связанные с тем, что узлы компрессора подвергаются воздействию криогенных условий. Это достигается посредством использования экономайзеров, в которых потоки, содержащие по большей части жидкость, перед мгновенным испарением сначала охлаждаются при помощи теплообмена непрямого действия с одним или несколькими потоками пара, которые были выработаны ниже по потоку на ступени (т.е. стадии) расширения, либо на ступенях того же или расположенного ниже по потоку цикла. В замкнутой системе экономайзеры предпочтительно используются для получения дополнительного охлаждения от паров мгновенного испарения во втором и третьем циклах. Когда используется система с открытым метановым циклом, пары мгновенного испарения с четвертой стадии предпочтительно возвращаются в один или несколько экономайзеров, где (1) эти пары охлаждаются посредством теплообмена непрямого действия потоков сжиженного продукта перед каждой стадией понижения давления и (2) эти пары охлаждаются посредством теплообмена непрямого

действия сжатых паров из открытого метанового цикла перед комбинацией этого потока или потоков с основным потоком подаваемого природного газа. Эти ступени охлаждения включают рассмотренную ранее третью стадию охлаждения и будут более подробно проанализированы при рассмотрении фиг. 1. В одном воплощении, в котором этилен и метан используются во втором и третьем циклах, контактирование может быть осуществлено при помощи ряда экономайзеров этилена и метана. В предпочтительном воплощении, которое показано на фиг. 1 и которое будет проанализировано более подробно далее, предусмотрен главный экономайзер этилена, главный экономайзер метана и один или несколько дополнительных экономайзеров метана. Эти дополнительные экономайзеры упоминаются здесь как второй экономайзер метана, третий экономайзер метана и т.д. и каждый дополнительный экономайзер метана соответствует отдельной ступени мгновенного испарения ниже по потоку.

Уравновешивание нагрузок между приводами газовых турбокомпрессоров

Усовершенствованный процесс для передачи нагрузок между приводами газовых турбин, связанный с различными циклами охлаждения в каскадном процессе охлаждения, номинально включает контактирование жидкого холодильного агента с более высокой точкой кипения в данном цикле посредством устройств для теплопередачи непрямого действия с парообразным холодильным агентом с более низкой точкой кипения в другом цикле перед мгновенным испарением указанного жидкого холодильного агента с более высокой точкой кипения на ближайшей следующей стадии и перед возвратом пара в компрессор для холодильного агента с более низкой точкой кипения. Предпочтительно, чтобы циклы примыкали один к другому и предпочтительно являлись замкнутыми циклами. При использовании каскадного процесса с тремя циклами наиболее предпочтительными циклами являются те, которые включают уравновешивание нагрузки между замкнутым циклами пропана и этилена и замкнутыми циклами этилена и метана. Уравновешивание между циклом пропана и этилена особенно предпочтительно в связи с его простотой, легкостью внедрения, низкими начальными капитальными затратами и высокой эффективностью. Эти факторы становятся еще более значительными, когда используется открытый метановый цикл.

Устройство для передачи нагрузки на компрессор между приводами газовых турбин, связанное с различными циклами охлаждения в каскадном цикле охлаждения, номинально включает трубопровод для потока жидкого холодильного агента с более высокой точкой кипения к устройствам для теплопередачи непрямого действия, трубопровод для потока парообразного холодильного агента с более низкой точкой кипения к указанным устройствам для теплопередачи непрямого действия, устройства для теплопередачи непрямого действия, трубопровод для потока нагретого парообразного холодильного агента с более низкой точкой кипения от устройства для теплопередачи непрямого действия в компрессор, трубопровод для потока

охлажденного жидкого холодильного агента с более высокой точкой кипения к устройствам для понижения давления и устройства для понижения давления. В предпочтительном воплощении степень охлаждения может быть регулируемой и обычно регулируется путем модификации трубопровода, по которому подводится поток холодильного агента с более высокой точкой кипения к устройствам для передачи тепла непрямого действия. Эта модификация включает добавление разделяющих устройств для разделения потока холодильного агента с более высокой точкой кипения, который подводится по трубопроводу холодильного агента с более высокой точкой кипения, причем первый трубопровод, соединенный с разделяющими устройствами, дает возможность части холодильного агента с более высокой точкой кипения обойти байпасом устройства для теплообмена непрямого действия, второй трубопровод, соединенный с разделяющими устройствами, для потока холодильного агента с более высокой точкой кипения для подачи к устройствам для теплообмена, третий трубопровод, соединенный с устройствами для теплообмена, для возврата потока охлажденного холодильного агента. В указанных первом, втором и/или третьем трубопроводе расположены устройства для регулирования относительных скоростей потоков холодильных агентов в соответствующих трубопроводах. Эти устройства для регулирования могут быстро получить специалисты, они включают регулирующий клапан потока, расположенный в одном из трубопроводов и, если потребуется для надлежащего регулирования потока, устройства для сужения потока, такие как диафрагма или клапан для остального трубопровода, чтобы обеспечить достижение падения давления в этом трубопроводе для эффективной эксплуатации системы регулирования потока. В предпочтительном воплощении клапан контроля потока расположен в первом трубопроводе. Если потребуется в данном воплощении, устройства для уменьшения давления расположены во втором или третьем трубопроводе или в устройствах для теплопередачи непрямого действия. Первый и третий трубопроводы, которые были упомянуты выше, могут быть подсоединены к индивидуальным устройствам для уменьшения давления, либо могут быть сначала скомбинированы посредством комбинирующих устройств, которые также соединены с трубопроводом, который в свою очередь соединен с устройствами для уменьшения давления.

С описанным ранее процессом и устройствами связаны уникальный метод и оборудование для уравнивания или распределения нагрузок между приводами газовых турбин, которые обеспечивают мощность сжатия для примыкающих циклов охлаждения в каскадном процессе охлаждения. Процесс включает ступени (1) для определения нагрузки от приводов для холодильного цикла с более высокой точкой кипения и для холодильного цикла с более низкой точкой кипения, (2) сопоставление соответствующих нагрузок от каждого цикла, тем самым определяется направление передачи нагрузки на привод для улучшенной

эксплуатации, (3) течение по крайней мере части потока парообразного холодильного агента с более низкой точкой кипения в устройства для теплопередачи непрямого действия, в результате чего образуется поток обработанного пара, (4) течение указанного потока обработанного пара в компрессор холодильного агента с низкой точкой кипения, (5) разделение потока жидкого холодильного агента с высокой точкой кипения на первый поток жидкости и второй поток жидкости, (6) течение указанного второго потока к устройствам для теплопередачи непрямого действия, в результате чего образуется охлажденный второй поток жидкости, (7) регулирование относительного расхода указанного первого потока жидкости и охлажденного второго потока жидкости в соответствии со ступенью (2) посредством устройств для регулирования потока, в которых скорость указанного второго потока жидкости увеличивается по мере передачи нагрузки на привод холодильного агента с более низкой точкой кипения, и (8) либо рекомбинация указанного охлажденного второго потока жидкости с указанным первым потоком жидкости для производства комбинированного потока жидкости и течение указанного комбинированного потока к устройствам для понижения давления, или течение указанного первого потока и охлажденного второго потока к отдельным устройствам для понижения давления. Нагрузка на привод газовой турбины может быть определена с использованием любых средств, которые могут быстро получить специалисты. Для данной турбины могут быть использованы эксплуатационные характеристики, такие как расход топлива, температура выходящего потока, скорость турбины, окружающие условия, степень предварительного охлаждения воздуха и продолжительность времени до того момента, когда должен проводиться ремонт. Кроме того, потребуется конкретная информация об эксплуатационных характеристиках привода газовой турбины. Когда этот анализ будет завершен, предпочтительно для всех приводов газовых турбин в соответствующих циклах охлаждения, может быть проведен анализ информации, относящийся к тому, может ли эксплуатация быть усовершенствована путем передачи нагрузок от привода или приводов одного цикла к приводу или приводам примыкающего цикла. Эта передача может быть завершена путем оперативного регулирования контрольных устройств в соответствии с упомянутой выше ступенью (7). В предпочтительном воплощении охлажденный второй поток жидкости и первый поток жидкости комбинируются перед тем, как будут измерены уменьшение давления и температура комбинированного потока. В этом воплощении одним из средств регулирования контрольных устройств является измерение температуры комбинированного потока. Если оператор хочет повысить передачу нагрузки на цикл охлаждения хладагента с более низкой точкой кипения, он должен понизить заданное значение на регуляторе температуры, связанном с регулирующими устройствами, тем самым увеличивая поток в устройства для теплопередачи непрямого действия.

Аналогичным способом оператор может уменьшить передачу нагрузки на цикл охлаждения холодильного агента с низкой точкой кипения путем повышения заданной величины температуры.

Предпочтительное воплощение открытого цикла каскадного процесса сжижения

Схема потоков и устройств, показанная на фиг.1, представляет собой предпочтительное воплощение открытого цикла каскадного процесса сжижения и описывается в целях иллюстрации. Из предпочтительного воплощения преднамеренно опущена система удаления азота, поскольку такая система зависит от содержания азота в подаваемом газе. Однако, как было отмечено в предварительном обсуждении технологий удаления азота, методы, применимые к этому предпочтительному воплощению, легко доступны специалистам. Эти специалисты также узнают, что фиг. 1 и 2 являются только схемами и, следовательно, множество единиц оборудования, которые потребуются в промышленной установке для успешной ее эксплуатации, для ясности были опущены. К такому оборудованию относятся, например, регуляторы компрессоров, измерители потока и уровня и соответствующие регуляторы, дополнительные регуляторы температуры и давления, насосы, электродвигатели, фильтры, дополнительные теплообменники и клапаны и т. п. Это оборудование должно быть поставлено в соответствии со стандартной инженерной практикой.

Для того, чтобы облегчить понимание фигур, оборудование, обозначенное номерами от 1 до 99, представляет собой используемые в процессе сосуда и оборудование, непосредственно связанное с процессом сжижения. Оборудование, обозначенное номерами от 100 до 199, соответствует линиям потоков или трубопроводам, которые содержат по большей части метан. Оборудование, обозначенное номерами от 200 до 299, соответствует линиям потоков или трубопроводам, которые содержат холодильный агент этилен. Оборудование, обозначенное номерами 300-399, соответствует линиям потоков или трубопроводам, которые содержат холодильный агент пропан. Оборудование, обозначенное номерами 400-499, соответствует приборам регулирования процесса, связанным с уравниванием нагрузки.

Подаваемый газ, как было описано ранее, поступает в систему по трубопроводу 100. Газообразный пропан сжимается в многоступенчатом компрессоре 18, который приводится в действие приводом газовой турбины, который не показан. Три ступени предпочтительно образуют единый агрегат, хотя они могут представлять собой отдельные агрегаты, механически соединенные вместе для того, чтобы они приводились в действие от одного привода. После сжатия сжатый пропан проходит по трубопроводу 300 в охладитель 20, где он сжимается. Типичные величины давления и температуры сжиженного пропана - холодильного агента перед мгновенным испарением составляют около 37,8°C и около 1,31 МПа (абс.). Хотя на фиг.1 и не показано, предпочтительно, чтобы сосуд для сепарации был расположен ниже по потоку, чем охладитель 20, и выше по

потоку, чем дроссельный клапан 12, для удаления остаточных легких компонентов из сжиженного пропана. Такие сосуды могут состоять из одностадийного газожидкостного сепаратора либо могут быть более сложными и состоять из секции аккумулятора, секции конденсатора и секции абсорбера, причем две последние могут эксплуатироваться непрерывно или периодически включаться в режим работы для удаления остаточных легких компонентов из пропана. Поток из этого сосуда или поток из охладителя 20, в зависимости от обстоятельств, проходит через трубопровод 302 к устройствам для понижения давления, таким, как дроссельный клапан 12, в котором давление сжиженного пропана понижается в результате парообразования или мгновенного испарения его части. Полученный двухфазный продукт затем поступает по трубопроводу 304 в высокую стадию охладителя пропана 2, где в результате теплообмена непрямого действия газообразный холодильный агент - метан, который подводится по трубопроводу 152, подаваемый природный газ, который подводится по трубопроводу 100, и газообразный холодильный агент - этилен, подводимый по трубопроводу 202, соответственно охлаждаются в устройствах для теплообмена непрямого действия 4, 6 и 8, в результате чего производятся потоки охлажденных газов, которые соответственно транспортируются по трубопроводам 154, 102 и 204.

Мгновенно испаренный пропан из охладителя 2 возвращается в компрессор 18 в компрессор 18 по трубопроводу 306. Газ подается во входное отверстие стадии высокого давления компрессора 18. Оставшийся жидкий пропан проходит по трубопроводу 308, дальнейшее уменьшение давления достигается путем прохода через устройства для уменьшения давления, иллюстрируемые, например, дроссельным клапаном 14, вследствие чего дополнительная часть сжиженного пропана мгновенно испаряется. Полученный в результате двухфазный поток затем подается в охладитель 22 по трубопроводу 310, тем самым обеспечивая охлаждающим агентом охладитель 22.

Поток охлажденного газа, подаваемого из охладителя 2, проходит по трубопроводу 102 в сосуд - конденсатор 10, в котором газовая и жидкая фазы разделяются. Жидкая фаза, обогащенная компонентами C<sub>3+</sub>, удаляется по трубопроводу 103. Газообразная фаза удаляется по трубопроводу 104 и подается в охладитель пропана 22. Холодильный агент этилен подводится к охладителю 22 по трубопроводу 204. В охладителе потоки холодильных агентов - обогащенного метаном и этилена, соответственно охлаждаются при помощи устройств для теплопередачи 24 и 26, в результате чего производятся потоки охлажденных холодильных агентов - обогащенного метаном и этилена по трубопроводам 110 и 206. Испаренная таким образом часть холодильного агента пропана отделяется и проходит по трубопроводу 311 ко входу между стадиями компрессора 18.

На фиг. 2 показаны более подробно новые особенности передачи мощности охлаждения, в результате чего мощность от цикла охлаждения этилена фактически делается

доступной для цикла охлаждения пропана. Жидкий холодильный агент пропан отводится из промежуточной стадии охладителя пропана 22 по трубопроводу 312, который затем разделяется на трубопроводы 313 и 315. Жидкий холодильный агент пропан в трубопроводе 313 поступает в вентиль 15, предпочтительно типа поворотной заслонки, который действует как устройство для сужения потока, обеспечивая тем самым достаточное падение давления, связанное с потоками по трубопроводам 314, 36 и 316 для эксплуатации системы регулирования потоков. Жидкий пропан течет в экономайзер этилена 34 по трубопроводу 314, в котором жидкость переохлаждается путем теплопередачи непрямого действия от потоков, показанных на фиг.1, при помощи устройств для теплопередачи 36 и затем выходит из экономайзера этилена 34 по трубопроводу 316. Скорость потока холодильного агента пропана через экономайзер этилена регулируется путем манипулирования скоростью потока жидкости в трубопроводе 315 в соответствии с температурой комбинированного потока в трубопроводе 318, как более полно будет изложено в дальнейшем. Как показано, скорость жидкости в трубопроводе 315 регулируется при помощи регулирующего клапана 16. Жидкость выходит из регулирующего клапана 16 в трубопровод 317, который последовательно соединен с трубопроводом 316, по которому в трубопровод поступает переохлажденный холодильный агент пропан. Комбинированный поток затем течет по трубопроводу 318 к устройствам для расширения 17, в которых производится двухфазная смесь при пониженных давлении и температуре, после чего смесь течет к охладителю низкого давления 28 по трубопроводу 319, где он выполняет роль охлаждающего агента в устройствах для теплопередачи непрямого действия 30 и 32.

Как показано на фиг.1, обогащенный метаном поток протекает от промежуточной стадии охладителя пропана 22 к нижней стадии охладителя/конденсатора пропана 28 по трубопроводу 110. В этом охладителе поток охлаждается при помощи устройств для теплопередачи непрямого действия 30. Аналогичным образом поток холодильного агента этилена протекает от промежуточной стадии охладителя пропана 22 к нижней стадии охладителя/конденсатора 28 по трубопроводу 206. В последнем холодильный агент - этилен конденсируется при помощи устройств для теплопередачи непрямого действия 32 почти полностью. Испаренный пропан удаляется с нижней стадии охладителя/конденсатора пропана 28 и возвращается на вход нижней стадии компрессора 18 по трубопроводу 320. Хотя на фиг. 1 показано, что охлаждение потоков, подаваемых по трубопроводу 110 и 206, происходит в одном и том же сосуде, остывание потока 110 и охлаждение и конденсация потока 206 могут соответственно иметь место в отдельных сосудах процесса (например, соответственно, в отдельном охладителе и отдельном конденсаторе).

Как показано на фиг. 1, обогащенный метаном поток, выходящий с низкой стадии охладителя пропана, подводится к высокой стадии охладителя этилена 42 по

трубопроводу 112. Холодильный агент этилен выходит с низкой стадии охладителя пропана 28 по трубопроводу 208 и подается в сосуд-сепаратор 37, из которого легкие компоненты удаляются по трубопроводу 209, а сконденсированный этилен удаляется по трубопроводу 210. Этот сосуд-сепаратор аналогичен описанному ранее для удаления легких компонентов из сжиженного холодильного агента - пропана, он может быть одностадийным газо/жидкостным сепаратором или может представлять собой многостадийный цикл обработки, который в результате дает очень большую избирательность легких компонентов, удаляемых из системы. Холодильный агент этилен на этом участке процесса имеет обычно температуру  $-31,1^{\circ}\text{C}$  и давление около 1,97 МПа (абс.). Затем холодильный агент этилен по трубопроводу 210 течет в экономайзер этилена 34, где охлаждается в устройствах для теплообмена непрямого действия 38, затем отводится по трубопроводу 211 и проходит к устройствам для понижения давления, таким, как дроссельный вентиль 40, где холодильный агент мгновенно испаряется до заданных заранее величин температуры и давления и подается на высокую стадию охладителя этилена 42 по трубопроводу 212. Пар удаляется из охладителя по трубопроводу 214 и направляется в экономайзер этана 34, в котором пар выполняет функцию холодильного агента в устройствах для теплообмена непрямого действия 46. Парообразный этилен затем отводится из экономайзера этилена по трубопроводу 216 и подается ко входному отверстию высокой стадии компрессора этилена 48. Холодильный агент этилен, который не был испарен на высокой стадии охладителя этилена 42, удаляется по трубопроводу 218 и возвращается в экономайзер этилена 34 для дальнейшего охлаждения посредством устройств для теплообмена непрямого действия 50, удаляется из экономайзера этилена по трубопроводу 220 и мгновенно испаряется в устройства для понижения давления, показанные как дроссельный вентиль 52, после которого полученный двухфазный продукт подводится в низкую стадию охладителя этилена 54 по трубопроводу 222. Обогащенный метаном поток удаляется с высокой стадии охладителя этилена 42 по трубопроводу 116 и непосредственно подается на низкую стадию охладителя этилена 54, где он подвергается дополнительному охлаждению и частичной конденсации посредством теплообменных устройств непрямого действия 56. Образующийся двухфазный поток затем течет по трубопроводу 118 в двухфазный сепаратор 60, в котором производится поток обогащенного метаном пара по трубопроводу 120 и по трубопроводу 117, поток жидкости, обогащенной компонентами  $\text{C}_2+$ , который впоследствии мгновенно испаряется или разделяется на фракции в сосуде 67, в результате чего образуются более тяжелый поток в трубопроводе 123 и второй обогащенный метаном поток, который передается по трубопроводу 121 и после комбинации со вторым потоком по трубопроводу 128 подается ко входному отверстию в стадии высокого давления компрессора метана 83. Поток в трубопроводе

120 и поток в трубопроводе 158, который содержится охлажденный сжатый поток рециркулирующего метана, комбинируются и подаются на низкую стадию конденсатора этилена 68, где этот поток нагревается в результате теплообмена в устройствах для теплообмена непрямого действия 70 с жидкостью, вытекающей с низкой стадии охладителя этилена 54, которая направляется на низкую стадию конденсатора этилена 68 по трубопроводу 226. В конденсаторе 68 комбинированные потоки, подаваемые соответственно по трубопроводам 120 и 158, конденсируются и выходят из конденсатора 68 по трубопроводу 122. Пары с низкой стадии охладителя этилена 54 по трубопроводу 224 и с низкой стадии конденсатора этилена 68 по трубопроводу 228 комбинируются и направляются по трубопроводу 230 в экономайзер этилена 34, в котором пары выполняют роль охладительного агента в устройствах для теплообмена непрямого действия 58. Затем поток направляется по трубопроводу 232 из экономайзера этилена 34 со стороны низкой стадии в компрессор этилена 48, как отмечено на фиг.1, поток жидкости из компрессора, образующийся из пара, подаваемого со стороны низкой стадии, удаляется по трубопроводу 234, охлаждается на промежуточной стадии охладителя 71 и возвращается в компрессор 48 по трубопроводу 236 для нагнетания совместно с паром с высокой стадии, который находится в трубопроводе 216. Предпочтительно, чтобы две стадии представляли собой единый модуль, хотя каждая из них может быть отдельным модулем, и эти модули могут быть механически объединены общим приводом. Сжатый этилен, произведенный в компрессоре, направляется в расположенный ниже по потоку охладитель 72 по трубопроводу 200. Продукт из охладителя течет по трубопроводу 202 и подается, как обсуждалось ранее, на высокую стадию охладителя пропана 2.

Сжиженный поток в трубопроводе 122 обычно имеет температуру около  $-87,2^{\circ}\text{C}$  и около 4,14 МПа. Этот поток проходит по трубопроводу 122 в главный экономайзер метана 74, в котором поток охлаждается глубже при помощи устройств для теплообмена непрямого действия 76, как изложено ранее. Сжиженный газ из главного экономайзера метана 74 проходит по трубопроводу 124, и его давление понижается при помощи устройств для понижения давления, которые изображены как дроссельный вентиль 78, в котором, конечно, испаряется или мгновенно испаряется часть потока газа. Пар мгновенного испарения затем проходит на высокую стадию барабана мгновенного испарения метана 80, где он разделяется на газовую фазу, выходящую по трубопроводу 126, и жидкую фазу, выходящую по трубопроводу 130. Газовая фаза затем передается в главный экономайзер метана по трубопроводу 126, где пар выполняет функцию охладителя в устройствах для теплопередачи непрямого действия 82. Пар выходит из главного экономайзера метана через трубопровод 128, где он комбинируется с потоком газа, поступающего по трубопроводу 121. Эти потоки затем подаются на сторону высокого давления компрессора 83. Жидкая фаза в трубопроводе 130 проходит

через второй экономайзер метана 87, в котором жидкость охлаждается глубже паром мгновенного испарения ниже по потоку посредством устройств для теплопередачи непрямого действия 88. Охлажденная жидкость выходит из второго экономайзера метана 87 по трубопроводу 132 и расширяется или мгновенно испаряется при помощи устройств для уменьшения давления, показанных как дроссельный вентиль 91 для дальнейшего уменьшения давления и в то же время для испарения второй его части. Этот поток пара мгновенного испарения затем проходит на промежуточную стадию барабана мгновенного испарения метана 92, где пар разделяется на газовую фазу, проходящую по трубопроводу 136, и жидкую фазу, проходящую по трубопроводу 134. Газовая фаза проходит по трубопроводу 136 во второй экономайзер метана 87, в котором пар охлаждает жидкость, поступающую в 87 по трубопроводу 130 через устройства для теплопередачи непрямого действия 89. Трубопровод 138 служит трубопроводом для потока между устройствами для теплопередачи непрямого действия 89 во втором экономайзере метана 87 и устройствами для теплопередачи непрямого действия 95 в главном экономайзере метана 74. Этот пар покидает главный экономайзер метана 74 по трубопроводу 140, который соединен со входом в промежуточную стадию компрессора метана 83. Жидкая фаза, выходящая с промежуточной стадии барабана мгновенного испарения 92 по трубопроводу 134, поступает для дальнейшего уменьшения давления, предпочтительно до 0,172 МПа (абс) путем прохода через устройства для понижения давления, показанные как дроссельный вентиль 93. Третья часть сжиженного газа снова превращается в пар или мгновенно испаряется. Жидкости из дроссельного вентиля 93 проходят в конечную или низкую стадию барабана для мгновенного испарения 94. В барабане мгновенного испарения 94 парообразная фаза отделяется и проходит по трубопроводу 144 во второй экономайзер метана 87, в котором пар выполняет функцию охладителя в устройствах для теплообмена непрямого действия 90, выходит из второго экономайзера для метана по трубопроводу 146, который соединен с первым экономайзером метана 74, в котором пар выполняет функцию охладителя в устройствах для теплообмена непрямого действия 96, и в конце концов выходит из первого экономайзера метана по трубопроводу 148, который соединен со входным отверстием низкого давления в компрессоре 83. Готовый продукт - сжиженный природный газ из барабана мгновенного испарения 94, который находится под давлением, приблизительно равным атмосферному давлению, проходит по трубопроводу 142 в хранилище. Поток пара сжиженного газа низкого давления с низкой температурой, который выпаривается в хранилище, предпочтительно регенерируется путем комбинирования этого потока с парами низкого давления мгновенного испарения, которые находятся в любом из трубопроводов 144, 146 или 148; выбор трубопровода основывается на целесообразности подбора потока пара с возможно более близкой температурой.

Как показано на фиг.1, высокая, промежуточная и низкая стадии компрессора 83 предпочтительно комбинируются в одном агрегате. Однако каждая стадия может существовать как отдельный агрегат, если агрегаты механически соединены вместе для того, чтобы приводиться в действие одним приводом. Сжатый газ с секции низкой стадии проходит через межстадийный охладитель 85 и комбинируется с газом с промежуточным давлением в трубопроводе 140 перед второй стадией сжатия. Сжатый газ с промежуточной стадии компрессора 83 подается через межстадийный охладитель 84 и комбинируется с газом высокого давления в трубопроводе 128 перед третьей стадией сжатия. Сжатый газ выходит со стадии высокого давления компрессора метана по трубопроводу 150, охлаждается в охладителе 86 и направляется в стадию высокого давления охладителя пропана по трубопроводу 152, как излагалось ранее.

На фиг.1 изображено расширение жидкой фазы с использованием дроссельных клапанов с последующим разделением газовой и жидкой части в охладителе или конденсаторе. Несмотря на то, что эта упрощенная схема является работоспособной и используется в ряде случаев, зачастую можно осуществить с большим КПД и более эффективно частичные ступени испарения и разделения в различном оборудовании, например, дроссельный клапан и отдельный барабан мгновенного испарения могут быть использованы до того, как направить поток либо отделенного пара, либо жидкости в охладитель пропана. Аналогично определенным образом обработанные потоки, подвергающиеся расширению, могут быть идеально использованы в гидравлическом детандере как части устройств для понижения давления, тем самым обеспечивается отвод мощности, а также снижается температура обеих фаз.

Что касается агрегатов компрессор/привод, используемых в процессе, на фиг. 1 изображены отдельные агрегаты компрессор/привод (т.е. одна система компрессора) для стадий сжатия пропана, этилена и открытого цикла метана. Однако в предпочтительном воплощении любого каскадного процесса надежность процесса может быть значительно повышена путем использования системы многоступенчатого сжатия, включающей две или больше параллельных комбинаций компрессор/привод вместо показанных единичных агрегатов компрессор/привод. В случае, если агрегат компрессор/привод становится недоступным, можно продолжать эксплуатировать процесс с уменьшенной производительностью. Кроме того, в результате перераспределения нагрузок между агрегатами компрессор/привод способом, раскрытым в описании, производительность по сжиженному природному газу может быть дополнительно увеличена, когда один агрегат компрессор/привод выходит из строя или должен эксплуатироваться при уменьшенной производительности.

Как было отмечено, степень "чистого" охлаждения жидкого холодильного агента пропана между промежуточной стадией охладителя 22 и низкой стадией устройств для понижения давления 17 регулируется

количеством холодильного агента, который может протекать через регулирующий клапан 16, тем самым обходя байпасом устройства для теплопередачи непрямого действия 34.

5 Положение регулирующего клапана 16 (т.е. степень открытия отверстия, сквозь которое жидкость может протекать через клапан), регулируется в соответствии с действительной температурой потока, протекающего по трубопроводу 318. Преобразователь температуры 400 в сочетании с термочувствительным устройством типа термопары, расположенным с возможностью управления в трубопроводе 318, создает выходящий сигнал 402, который показывает действительную температуру жидкости в 10 трубопроводе 318. Сигнал 402 снабжает процесс вводом переменных данных в регулятор температуры 404. Регулятор температуры 404 также снабжен сигналом заданного значения 406, который может быть введен вручную оператором либо 15 альтернативно под контролем компьютера посредством алгоритма контроля. В любом случае заданное значение основано на соотношении нагрузок на турбины, приводящие в действие компрессоры пропана и этилена.

20 В соответствии с сигналами 402 и 406 регулятор температуры 404 обеспечивает выходной сигнал 408, соответствующий разнице между сигналами 402 и 408. Сигнал 408 выполнен в таком масштабе, чтобы представлять положение регулирующего клапана 16, требуемое для поддержания температуры жидкости в трубопроводе 318, которую представляет сигнал 402 и которая 30 существенно равна требуемой температуре, представляемой сигналом заданного значения 406. Сигнал 408 дается регулятором температуры 404 на регулирующий клапан 16, а регулирующий клапан 16 управляется в соответствии с сигналом 408.

35 Регулятор температуры 404 может использовать различные хорошо известные способы регулирования, такие, как пропорциональный, пропорционально-интегральный или пропорционально-интегральный-производный (ПИД). В этом предпочтительном воплощении 40 использован пропорционально-интегральный регулятор, но в пределах диапазона изобретения может быть использован любой регулятор, который может принимать два входных сигнала и производить сопоставленный выходной сигнал, представляющий собой сравнение двух 45 входных сигналов. Работа регуляторов ПИД хорошо известна специалистам. Существенно, что выходной сигнал регулятора может быть сопоставлен таким образом, чтобы представить любой требуемый фактор или переменную величину. В одном из примеров сопоставление заданной температуры и действительной температуры производится при помощи регулятора. Выходом регулятора может быть сигнал, представляющий 50 изменение скорости потока какой-либо жидкости, необходимой для того, чтобы сделать желаемую и действительную температуру равными. С другой стороны, то же выходной сигнал может иметь такой масштаб, чтобы представить результат в процентах, либо может быть в таком масштабе, чтобы показать, какое изменение 55

давления требуется для того, чтобы сделать заданную и действительную температуру равными.

Несмотря на то, что здесь упоминались конкретные криогенные способы, материалы, оборудование и регулирующие приборы, необходимо понимать, что такое конкретное изложение не должно считаться ограничительными, но включено с целью иллюстрации и для того, чтобы показать наилучший способ в соответствии с настоящим изобретением.

#### Пример 1

Этот пример показывает посредством компьютерного моделирования процесса каскадного охлаждения, что передача нагрузки привода компрессора от пропанового к этиленовому циклу в каскадном процессе производства сжиженного природного газа (LNG) может быть преобразована экономически эффективным способом при использовании способа и устройства по заявленному здесь изобретению.

Результаты моделирования были получены при использовании Процесса Моделирования "Хайпротех XY SIM", версия 386/C2, 10, Prop. PK. PR/LK. Моделирование было основано на открытом цикле охлаждения метана, каскадной схеме процесса производства сжиженного природного газа, и были приняты следующие условия:

Объем подаваемого газа, м<sup>3</sup>/день (средн.) - 6028,65

Объем произведенного сжиженного природного газа в хранилище, м<sup>3</sup>/день (средн.) - 5388,69

Давление подаваемого газа, МПа (абс) - 4,55

Температура подаваемого газа, °C - 37,8

Общая мощность оборудования холодильного процесса, кВт - 56121

Моделируемыми холодильными агентами, используемыми в первом и втором цикле, были соответственно пропан и этилен. В пропановом цикле использовались три стадии охлаждения, в то время как в этиленовом цикле использовались две стадии охлаждения. Схема открытого метанового цикла включала использование трех отдельных стадий мгновенного испарения, и потому требовалось три стадии компрессии.

Представленные здесь результаты моделирования сосредотачиваются исключительно на сравнительном анализе величины мощности, потребляемой в пропановом и этиленовом циклах, с уравниванием нагрузок и без него. В связи с сопоставительным характером результатов, подробное объяснение схемы линии сжижения, внешней для этих двух циклов, не будет представлено. Целью этих исследований способом моделирования было достижение максимальной эффективности процесса. Ключ проблемы заключается в том, может ли базовый процесс быть модифицирован экономически эффективным способом, в результате чего будет осуществлен более экономически эффективный процесс сжижения.

При моделировании потоков холодильные агенты подавались в охладители последовательно способом, показанным на фиг.1 (например, жидкий холодильный агент из высокого давления или первой стадии охладителя подвергался мгновенному

испарению и затем подавался в виде двухфазной смеси в более низкое давление или охладитель второй стадии). Ключевым фактором, различающим два моделируемых способа, является использование в последнем случае способа уравнивания нагрузок, подробно показанного на фиг.2, на которой жидкий холодильный агент пропан с промежуточной стадии охладителя пропана сначала поступает в экономайзер этилена для переохлаждения перед мгновенным испарением.

При исследовании способом моделирования мощность, потребляемая компрессором метана, оставалась постоянной. Величины мощности, потребляемой компрессорами пропана и этилена для моделей базовой и с уравниванием нагрузок, и полученное в результате изменение потребляемой мощности представлено в табл.1.

Капитальные затраты на осуществление изменений для уравнивания нагрузок составляют приблизительно 30000 долларов. Ключевыми факторами в относительно небольшом увеличении затрат является схема и характеристики потоков, участвующих в передаче тепла. Охлаждаемый поток - это поток жидкости с относительно низким объемным расходом, а поток, обеспечивающий возможность охлаждения, может быть быстро получен в виде пара в результате мгновенного испарения в экономайзере этилена.

Принимая, что экономия энергии в результате разделения нагрузок, показанная в табл. 1, составляет 392 кВт, производительность турбины 7000 ВТУ/HP-hr (10034 кДж/кВт·ч), КПД турбины 93%, стоимость природного газа 81,00/ММВТУ, чистая экономия в расчете на год от уравнивания нагрузок составляет приблизительно 30300 долларов. Отсюда, срок окупаемости капитальных затрат на модификацию путем уравнивания нагрузок составляет около 1 года. Если принять за основу срок службы установки по меньшей мере 20 лет, не менее 19 лет работы установки после первоначальных затрат будут оплачены заранее.

#### Формула изобретения:

1. Способ каскадного охлаждения с усовершенствованием, включающим процесс передачи нагрузок компрессора от привода первого холодильного цикла, содержащего холодильный агент с более высокой точкой кипения, к приводу второго холодильного цикла, содержащего холодильный агент с более низкой точкой кипения, включающий: (а) контактирование регулируемого количества жидкого холодильного агента с более высокой точкой кипения в первом холодильном цикле посредством устройств для теплопередачи непрямого действия с парообразным холодильным агентом во втором холодильном цикле, в результате чего производятся охлажденный жидкий холодильный агент и нагретый парообразный холодильный агент; (б) мгновенное испарение указанного переохлажденного жидкого холодильного агента, которое дает возможность осуществлять дополнительное охлаждение холодильным агентом первого холодильного цикла, и (в) возврат указанного нагретого парообразного холодильного агента в



компрессор во втором холодильном цикле.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что большая часть указанной жидкости с более высокой точкой кипения состоит из пропана или пропилена или их смеси и большая часть указанной жидкости с более низкой точкой кипения состоит из этана, или этилена, или их смеси.

3. Способ по п.2, отличающийся тем, что большая часть указанной жидкости с более высокой точкой кипения состоит из пропана, а большая часть указанной жидкости с более низкой точкой кипения состоит из этилена.

4. Способ по п.3, отличающийся тем, что большая часть указанной жидкости с более высокой точкой кипения состоит в основном из пропана, а большая часть указанной жидкости с более низкой точкой кипения состоит в основном из этилена.

5. Способ по п.1, отличающийся тем, что большая часть указанной жидкости с более высокой точкой кипения состоит из этана, или этилена, или их смеси, а большая часть указанной жидкости с более низкой точкой кипения состоит из метана.

6. Способ по п.5, отличающийся тем, что большая часть указанной жидкости с более высокой точкой кипения состоит из этилена.

7. Способ по п.6, отличающийся тем, что указанная жидкость с более высокой точкой кипения состоит в основном из этилена, а указанная жидкость с более низкой точкой кипения состоит в основном из метана и азота.

8. Способ по п.7, отличающийся тем, что указанная жидкость с более высокой точкой кипения состоит в основном из этилена, а указанная жидкость с более низкой точкой кипения состоит в основном из метана.

9. Устройство для передачи нагрузки компрессора от привода первого холодильного цикла, который содержит холодильный агент с более высокой точкой кипения, к приводу второго холодильного цикла, который содержит холодильный агент с более низкой точкой кипения, причем указанное устройство включает: (а) первый трубопровод для потока жидкого холодильного агента с более высокой точкой кипения в устройства для теплопередачи непрямого действия; (б) второй трубопровод для потока парообразного холодильного агента с более низкой точкой кипения в указанные устройства для теплопередачи непрямого действия; (в) третий трубопровод для потока жидкого холодильного агента из указанных устройств для теплопередачи непрямого действия в устройства для понижения давления в указанном первом холодильном цикле; (г) четвертый трубопровод, соединяющий указанный первый трубопровод с указанным третьим трубопроводом для того, чтобы обеспечить путь для байпасного потока, минуя указанные устройства для теплопередачи непрямого действия; (д) пятый трубопровод для потока указанного парообразного холодильного агента с более низкой точкой кипения от указанных устройств для теплопередачи непрямого действия к компрессору в указанном втором холодильном цикле; (е) устройство для теплопередачи непрямого действия; (ж) компрессор; (з) устройство для понижения давления и (к) (i) устройство для управления относительными скоростями потоков указанного жидкого холодильного агента с более высокой точкой

кипения через четвертый трубопровод и устройство для теплопередачи непрямого действия.

10. Устройство по п.9, отличающееся тем, что оно дополнительно включает устройство для дросселирования потока, расположенное в указанном первом трубопроводе, устройстве для теплопередачи непрямого действия или в третьем трубопроводе между соединением первого трубопровода и четвертого трубопровода и соединением третьего трубопровода и четвертого трубопровода, и регулирующей клапан, соединенный с четвертым трубопроводом с возможностью управления.

11. Устройство по п.10, отличающееся тем, что устройство для управления относительными скоростями потоков жидкого холодильного агента с более высокой точкой кипения через четвертый трубопровод и устройство для теплопередачи непрямого действия включают: устройство для создания первого сигнала, представляющего действительную температуру потока жидкости в третьем трубопроводе, расположенное ниже по потоку, чем соединение с четвертым трубопроводом; устройство для создания второго сигнала, представляющего заданную температуру потока, протекающего по третьему трубопроводу, расположенное ниже по потоку, чем соединение с четвертым трубопроводом; устройство регулятора температуры для создания третьего сигнала, соответствующего разнице между первым сигналом и вторым сигналом, и в котором третий сигнал выполнен в таком масштабе, чтобы представлять положение регулирующего клапана, требуемое для поддержания действительной температуры указанного потока, протекающего в третьем трубопроводе, по существу равной заданной температуре, которую представляет второй сигнал, и устройство для управления регулирующим клапаном в соответствии с третьим сигналом для того, чтобы регулировать относительную скорость потока жидкости, протекающего по четвертому трубопроводу, и жидкости, которая течет в устройство для теплопередачи непрямого действия.

12. Устройство по п.9, отличающееся тем, что оно дополнительно включает трубопровод, соединяющий устройство для понижения давления с охладителем, и охладитель.

13. Способ регулирования передачи нагрузок между приводами в примыкающих циклах в процессе каскадного охлаждения, в котором жидкий холодильный агент с более высокой точкой кипения в одном цикле охлаждают перед мгновенным испарением путем контакта посредством устройства для передачи тепла непрямого действия с парообразным холодильным агентом с более низкой точкой кипения в примыкающем цикле перед сжатием пара, включающий: (а) определение нагрузок на приводы холодильных циклов с более высокой точкой кипения и более низкой точкой кипения; (б) сопоставление соответствующих нагрузок на каждый привод и определение направления передачи нагрузки на привод для более эффективной эксплуатации привода; (в) течение по меньше мере, части потока парообразного холодильного агента с более низкой точкой кипения в устройство для

теплопередачи непрямого действия, в результате чего образуется поток нагретого пара; (г) течение потока обработанного пара в компрессор холодильного агента с низкой точкой кипения; (д) разделение потока жидкого холодильного агента с высокой точкой кипения на первый поток жидкости и второй поток жидкости; (е) течение указанного второго потока жидкости в устройство для передачи тепла непрямого действия и образование в результате охлажденного второго потока, и (ж) регулирование относительной скорости первого потока и второго потока в соответствии с приведенной выше ступенью (б) посредством регулирующего клапана, в котором скорость второго потока жидкости увеличивается по мере передачи нагрузки на привод холодильного агента с более низкой точкой кипения.

14. Способ по п. 13, отличающийся тем, что он дополнительно включает ступени: рекомбинации охлажденного второго потока с первым потоком для образования комбинированного потока и течения комбинированного потока в устройство для понижения давления.

15. Способ по п. 14, отличающийся тем, что он дополнительно включает ступени: течение первого потока в устройство для понижения давления и течение охлажденного второго потока в устройство для понижения давления.

16. Способ по п. 13, отличающийся тем, что большая часть указанной жидкости с более

высокой точкой кипения состоит из пропана, или пропилена, или из их смеси и большая часть указанной жидкости с более низкой точкой кипения состоит из этана, или этилена, или из их смеси.

5 17. Способ по п. 16, отличающийся тем, что большая часть жидкости с более высокой точкой кипения состоит из пропана, а большая часть жидкости с более низкой точкой кипения состоит из этилена.

10 18. Способ по п. 17, отличающийся тем, что жидкость с более высокой точкой кипения состоит в основном из пропана, а жидкость с более низкой точкой кипения состоит в основном из этилена.

15 19. Способ по п. 18, отличающийся тем, что большая часть жидкости с более высокой точкой кипения состоит из этана, или этилена, или их смеси, а большая часть жидкости с более низкой точкой кипения состоит из метана.

20 20. Способ по п. 19, отличающийся тем, что большая часть жидкости с более высокой точкой кипения состоит из этилена.

25 21. Способ по п. 20, отличающийся тем, что жидкость с более высокой точкой кипения состоит в основном из этилена, а указанная жидкость с более низкой точкой кипения состоит в основном из метана и азота.

30 22. Способ по п. 21, отличающийся тем, что жидкость с более высокой точкой кипения состоит в основном из этилена, а жидкость с более низкой точкой кипения состоит в основном из метана.

35

40

45

50

55

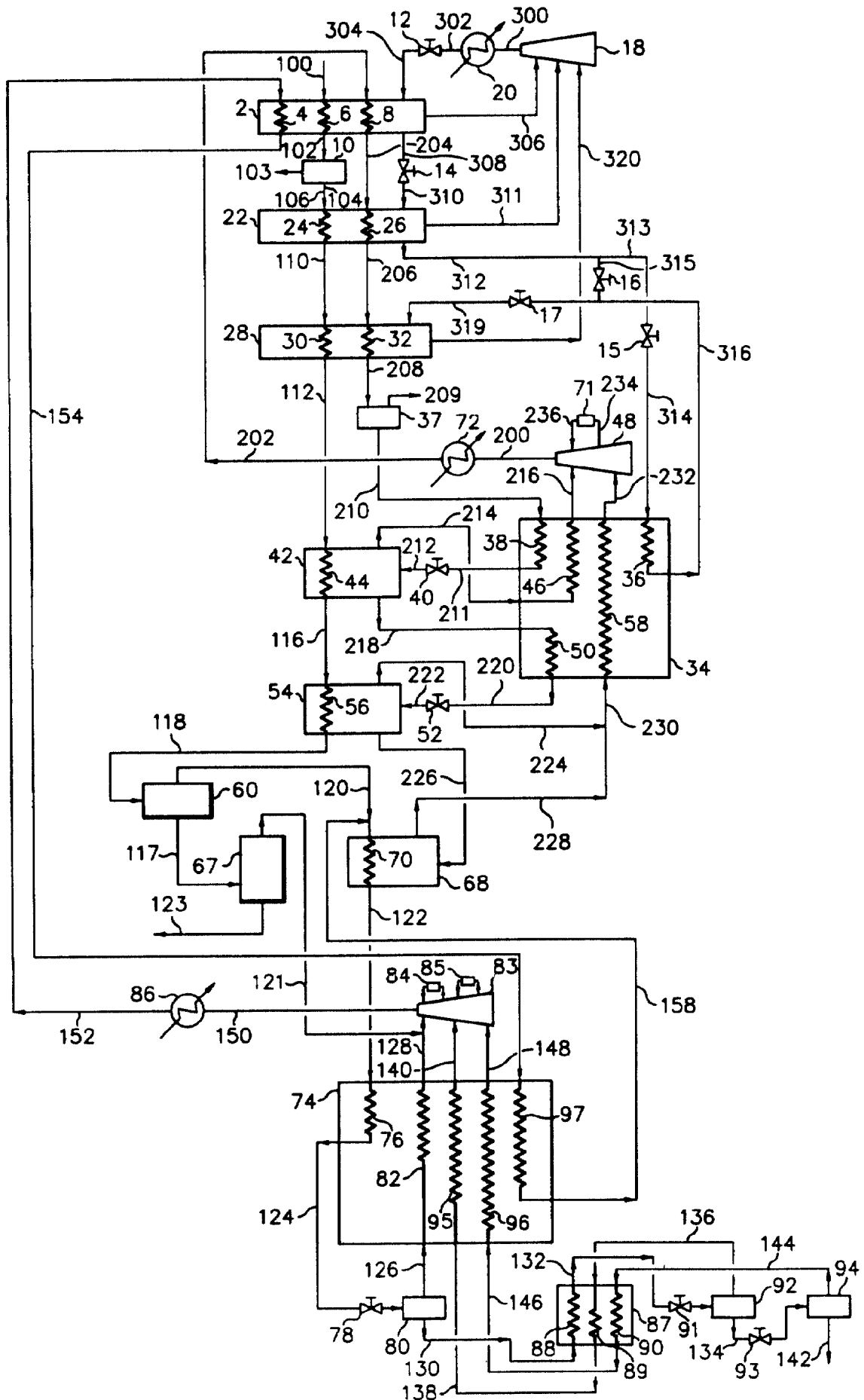
60

Величины потребляемой мощности

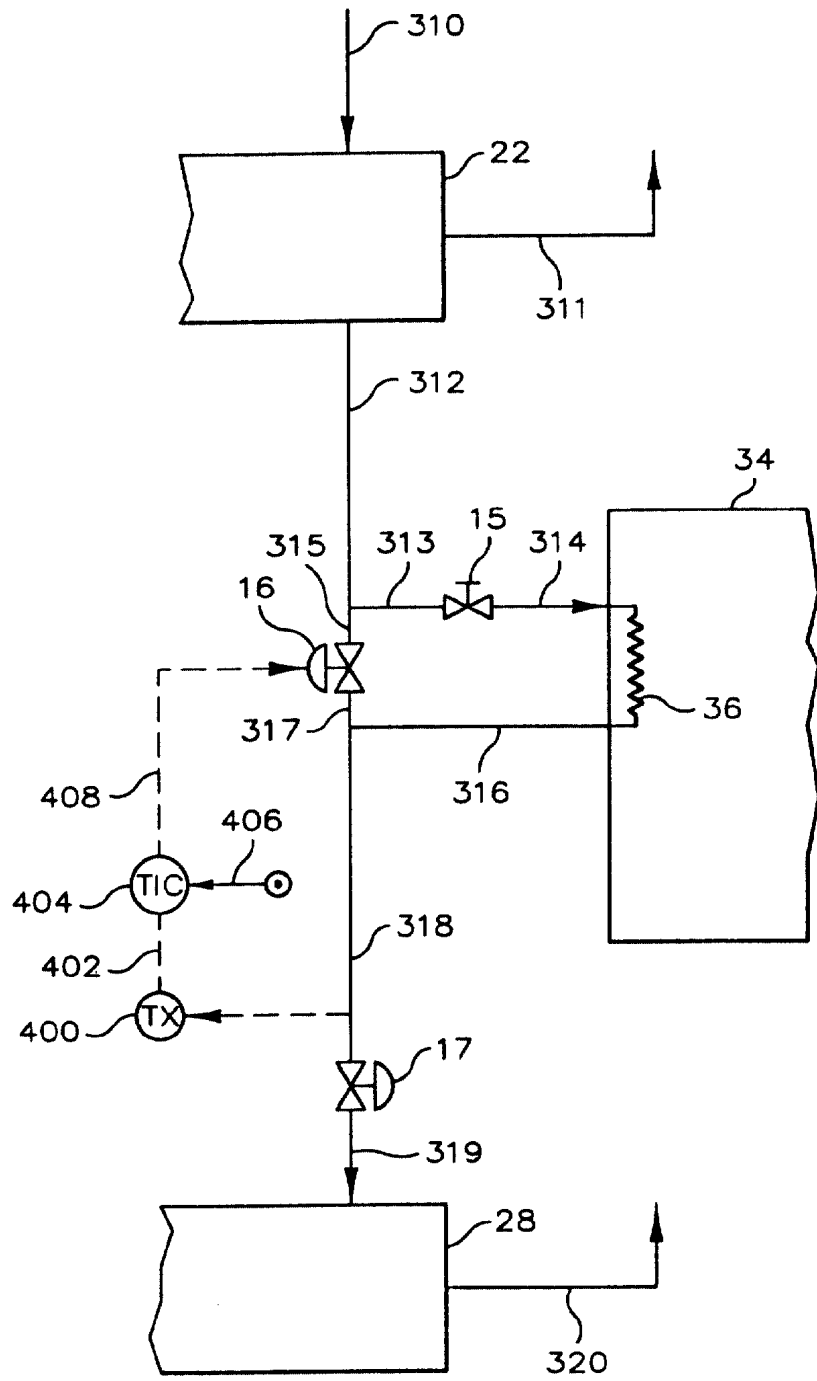
	Мощность, потребляемая компрессором пропана кВт	Мощность, потребляемая компрессором этилена, кВт	Суммарная потребляемая мощность, кВт
Базовая модель	20928	17847	38775
Модель с уравниванием нагрузок	19751	18632	38383
Изменение потребляемой мощности	-1177	785	392 (532 HP)

RU 2170894 C2

RU 2170894 C2



Фиг.1



Фиг.2