

СЖИЖЕНИЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Схемы и циклы сжижения газа

Комплексы сжижения природного газа, включающие установки сжижения газа, изо-термические хранилища и регазификаторы, изначально рассматривались как эффективное средство регулирования пиковых нагрузок газопотребления. Впервые такие комплексы появились в США и Канаде.

Для сжижения газа в конце 70-ых годов прошлого столетия применялись три основных термодинамических цикла:

- стандартный каскадный с использованием нескольких ступеней внешнего охлаждения;
- модифицированный каскадный, предусматривающий комбинированное охлаждение во внешнем контуре и самоохлаждение;
- расширительный, при котором охлаждение производится в процессе расширения газа, находившегося под высоким давлением, при прохождении его через турбодетандер с совершением работы.

Классический каскадный цикл на чистых холодильных агентах применен на первом заводе сжижения газа, построенном в Алжире в 1964-65 гг. (рисунок 1). Выбор цикла был обусловлен сравнительной простотой и хорошей его изученностью, позволяющей рассчитать все элементы криогенной установки с высокой степенью точности. Установка представляет собой совокупность трех индивидуальных циркуляционных контуров, вырабатывающих холод на различных ступенчато понижающихся температурных уровнях. В каждом контуре используется чистый однокомпонентный холодильный агент. Указанная схема была реализована также на заводе сжижения в Кенае. Применение классического каскадного цикла ограничилось первыми двумя заводами сжижения газа в г. Арзеве (Алжир), г. Кенае (Аляска) и несколькими СПГ установками для покрытия пиковых нагрузок газопотребления.

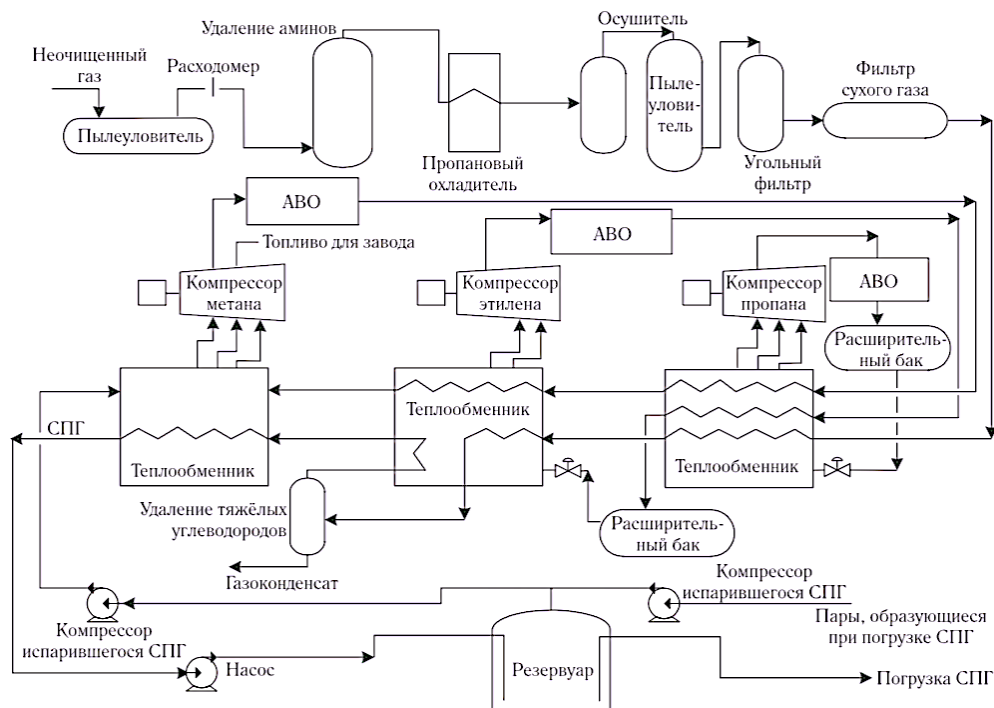


Рисунок 1 – СПГ-установка, использующая каскадный процесс фирмы «Phillips» (АВО – агрегат воздушного охлаждения)

Существенными недостатками технологии сжижения газа, реализованной на первых двух заводах и на нескольких мелких установках, построенных в 60-ых гг. прошлого века, является наличие разнотипных по характеристикам и мощности компрессорных агрегатов, большое число теплообменников и, как следствие, разветвленная система коммуникаций. По данным французской фирмы «Air Liquide», капиталовложения в систему коммуникаций (трубопроводов обвязки) завода сжижения в г. Арзеве составили более 25 % от общей стоимости завода. В связи с этим усилия исследователей и проектантов были направлены на разработку технологий, позволяющих уменьшить количество единиц компрессорного оборудования, сократить число теплообменных аппаратов, а также протяженность и металлоемкость технологических трубопроводов.

Решение, удовлетворяющее всем перечисленным требованиям, было впервые найдено д.т.н., профессором А.П. Клименко, который, задолго до строительства завода сжижения газа в Алжире, разработал (1956 г.) новую эффективную **технологии сжижения газа на основе однопоточного холодильного цикла**. Эти схемы нашли широкое применение за рубежом. Сущность предложенной технологии заключается в использовании многокомпонентной смеси углеводородов (от бутанов до метана) с азотом в качестве рабочего тела холодильной установки, обеспечивающей требуемый для ожижения природного газа характер выработки холода. Сжатие многокомпонентного холодильного агента производится в одном компрессоре. В модифицированном однопоточном цикле смешанный хладагент представляет собой смесь циркулирующих в контуре азота, метана, этана, пропана и бутанов. Преимущества этой технологии, основанной на использовании однопоточных холодильных циклов, оказались столь значительными, что все последующие заводы сжижения природного газа были реализованы с применением различных модификаций этого цикла.

Очередной ступенью совершенствования технологии сжижения явился предложенный французскими фирмами «Air Liquide» и «Technip» так называемый **процесс «Теаларк с двумя степенями давления»**. Отличительная особенность процесса — наличие двух групп теплообменных аппаратов, одна из которых используется для извлечения из природного газа хладагентов, а другая — для охлаждения и сжижения природного газа. На базе процесса «Теаларк с двумя степенями давления» был построен технологический цикл завода сжижения газа в г. Скикде (Алжир, 1972-73 гг.).

Опыт эксплуатации завода подтвердил высокую эффективность процесса, его хорошую управляемость и обоснованность выбора принципа регулирования (поддержания оптимального режима работы) блока сжижения газа. Однако совершенствование циклов и схем сжижения СПГ продолжалось. Перспективное решение, обеспечивающее повышение термодинамической эффективности цикла на многокомпонентном хладагенте, было предложено американской фирмой «Air Products». Оно заключалось во введении дополнительного пропанового контура, обеспечивающего предварительное охлаждение многокомпонентного хладагента и природного газа. Дальнейшие усовершенствования не прекращались. Для предварительного охлаждения рекомендовалось использовать пропан-этановую смесь вместо чистого пропана (предложение фирм «Linde» и «Tealark»). Термодинамическая эффективность этих циклов выше, чем у классического каскадного и однопоточного циклов. Начиная с 1971 г., все крупные заводы СПГ стали строиться на основе процессов со смешанными агентами и предложенными их улучшениями.

Объединение двух систем смешанного хладагента и модульных теплообменников с ребристыми пластинами в общую крупную линию охлаждения позволяет сократить капиталовложения и эксплуатационные затраты в сравнении с системами, использующими однокомпонентные хладагенты или имеющими несколько линий охлаждения, подключенных к общему сжижающему теплообменнику. Фирмой «Axens» был разработан **цикл на двух**

смешанных холодильных агентах «Liquefin». Детальные исследования, которые провели международные нефтяные и проектно-строительные фирмы, сравнивая обычные (мощностью 4,5-8 млн.т/год) линии сжижения на смешанном хладагенте с пропаном и высшими углеводородами с системами сжижения природного газа «Liquefin», показали, что последние характеризуются сниженными на 15-20 % удельными капиталовложениями.

Дальнейшим развитием технологий сжижения природного газа является схема процесса «MCR» (**mixed component refrigerant**) фирмы «Air Products and Chemicals, Inc.», которая изображена на рисунке 2.

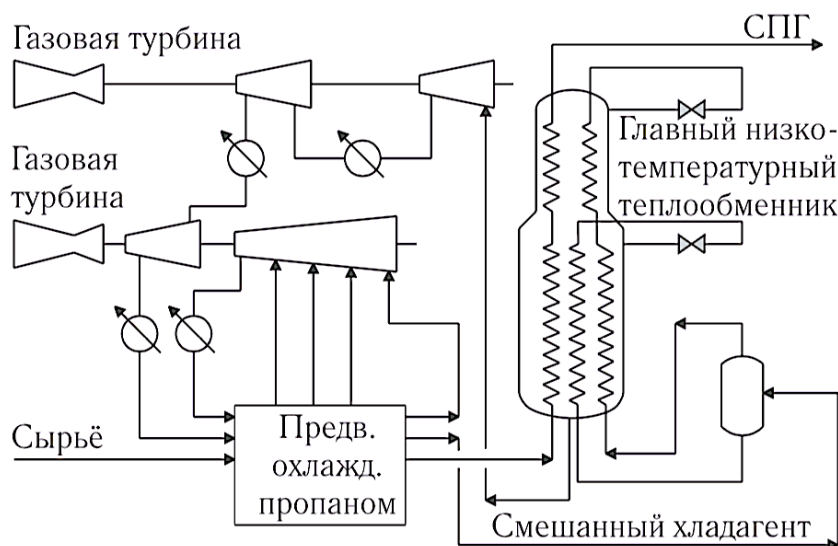


Рисунок 2 – Технологическая схема реализации процесса «MCR»

Процесс «MCR» включает стадию подготовки газа, за которой следует сжижение с использованием охлаждения хладагентом, содержащим смесь компонентов. Чаще всего применяется процесс «MCR» с предварительным охлаждением смесью пропана с другими углеводородами (C₃-MR). Многоступенчатая система охлаждения пропаном обеспечивает предварительное охлаждение смешанного хладагента и исходного природного газа. Систему можно проектировать с паровыми турбинами, промышленными газовыми турбинами и/или электроприводом. Процессы «MCR» фирмы «Air Products» относятся к самым широко используемым в мире циклам получения СПГ. В разных странах действуют или находятся в стадии строительства более 60 линий получения СПГ на основе процесса «MCR».

Позже был разработан способ «Dual MR» (цикл на двух смешанных хладагентах). Предварительное охлаждение природного газа и частичная конденсация второго смешанного хладагента осуществляются так же, как и в технологии «Liquefin». Разделение в сепараторе второго хладагента на два потока и их дальнейшее дросселирование выполняются подобно тому, как это делается в технологии «MCR».

Дальнейшее совершенствование схем со смешанным хладагентом — технологическая схема сжижения природного газа с использованием холодильного цикла «Prisco» фирмы «Black and Veatch Corp.» на многокомпонентном хладагенте при транспортировании и/или хранении СПГ. Область применения данной технологии — от крупных установок до небольших для снятия пиковых нагрузок. В настоящее время работают 12 установок и ещё 4 установки разрабатываются. Мощности установок в пределах 113 тыс. м³/сут — 5,1 млн. м³/сут.

Процесс «LNG PRO» фирм «Randail Gas Technologies» и «ABB Lummus Global, Inc.» позволяет осуществлять получение сжиженного газа для его последующего транспортирования или хранения. В процессе используется гибридная схема сжижения природного газа с пропановым турбодетандерным циклом предварительного охлаждения природного газа. Конструктивно установка состоит из отдельных модулей, которые облегчают монтаж оборудования в отдаленных местах или на морских платформах.

Процесс фирмы «Costain Oil, Gas and Process, Ltd» обеспечивает сжижение природного газа на установках разной мощности до 1,4 млн. т/год с использованием цикла со смешанным хладагентом. Он является достаточно экономичным при получении СПГ, так как сочетает в себе разумные капиталовложения с малым потреблением энергии.

Применяемые в схемах теплообменники с ребристыми пластинами позволяют спроектировать высокоэффективную установку. Для установки мощностью 1,4 млн. т/год достижимые суммарные капиталовложения (включая стоимость монтажа) составляют 300 долл. США на 1 т/год. Для небольших установок экономичными могут быть детандерные циклы с азотом или метаном в качестве хладагентов. Детандерные циклы целесообразно использовать в СПГ установках, создаваемых для морских платформ.

Процесс «AP-X» фирмы «Air Products and Chemicals, Inc.» (рисунок 3) представляет собой гибрид пропанового холодильного цикла для предварительного охлаждения и сжижения природного газа и внешнего азотного холодильного цикла для переохлаждения СПГ.

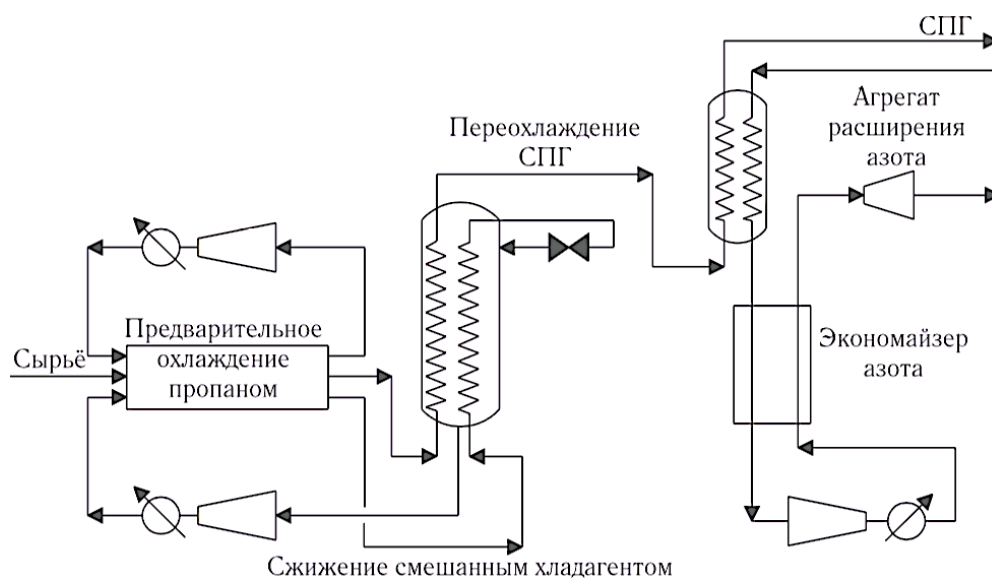


Рисунок 3 – Технология и оборудование для реализации процесса сжижения природного газа «AP-X»

Благодаря сочетанию преимуществ обоих циклов, достигаются высокая эффективность процессов и низкие эксплуатационные затраты. Процесс «AP-X» удовлетворяет потребностям крупномасштабных производств СПГ, так как его можно получать в одной технологической линии. Стоимость выработки СПГ на установке значительно снижается, благодаря ряду достоинств процесса «AP-X».

Детандерные холодильные циклы в настоящее время нашли применение в основном в установках покрытия пиковых нагрузок газопотребления. Особенно эффективны детандерные циклы, работающие по принципу использования перепада между давлением в газопроводе и давлением в газораспределительной сети.

Недостатком указанного варианта является малое значение коэффициента сжижения, составляющее лишь 0,15-0,17 от количества перерабатываемого природного газа. В

таких установках требуются большие поверхности теплообменников. Значительное снижение энергозатрат может быть получено, если в схеме предусмотреть повышение давления перерабатываемого газа до 7-8 МПа и предварительное охлаждение потока, направляемого в детандер, с помощью компрессорной холодильной установки. Ограничивающим фактором здесь служит температура начала конденсации детандерного потока.

За рубежом разработаны и эксплуатируются в промышленных масштабах турбодетандеры на природном газе высокого давления (до 15 МПа), допускающие конденсацию 20 % весового количества потока непосредственно в расширительной машине. Энергозатраты на сжижение природного газа при использовании эффективных детандерных циклов находятся на таком же уровне, что и в современных каскадных установках. Однако для реализации в крупнотоннажных СПГ установках таких детандерных схем необходима разработка отечественных детандерных агрегатов большой мощности, надежно и эффективно работающих в области влажного пара. При использовании **процесса сжижения с двумя турбодетандерами** фирм «Randail Gas Technologies», «ABB Lummus Global, Inc.» можно осуществлять получение СПГ на наземных или морских установках.

Избыточное давление исходного газа должно превышать 5,5 МПа. В зависимости от состава газа потребность в электрической мощности составляет 11-16 кВт на 1 т/сут. СПГ.

В последние годы стали уделять внимание разработкам процессов сжижения природного газа с помощью **азотных циклов**. Процесс фирмы «Air Products and Chemicals, Inc.» обеспечивает сжижение природного газа в установках средней производительности от 5500 до 33000 м³/ч для удовлетворения пиковой потребности в системе распределения газа (рисунок 4).

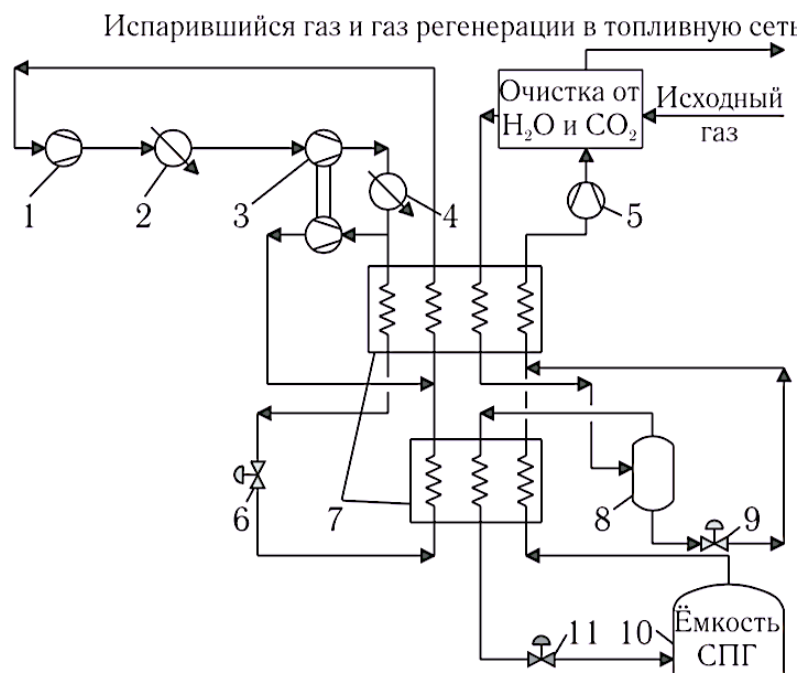


Рисунок 4 – Сжижение природного газа с помощью азотного холодильного цикла:
 1 — компрессор азота; 2, 4 — концевые холодильники; 3 — детандер-компрессорный агрегат; 5 — компрессор испарившегося газа; 6, 9, 11 — дроссельные вентили; 7 — теплообменники сжижения; 8 — сепаратор тяжелых углеводородов; 10 — емкость для СПГ

Критерии выбора

Определяющим критерием при выборе технологии является энергоемкость. Основные же капитальные вложения приходятся на компрессорные агрегаты. Наихудшими показателями характеризуются детандерные процессы и простейшие процессы на смешанных хладагентах. Однако они отличаются простотой, компактностью и малым количеством оборудования. Для выбора той или иной технологии в конкретных случаях необходимо использовать дополнительные критерии, такие как возможность получения из перерабатываемого газа компонентов холодильного агента или доставки их с других предприятий; возможность комплектации установок серийно производимыми компрессорными агрегатами и теплообменными аппаратами для требуемой производительности; простота эксплуатации и др.

Следует отметить, что практически все рассмотренные технологии (за исключением детандерных и «Priso») характеризуются примерно одинаковым энергопотреблением. В случае производства 3-5 млн. т/год СПГ при создании установок следует учитывать:

- для привода компрессоров могут быть применены газовые турбины;
- для мест с холодным климатом больший эффект достигается на смешанном холодильном агенте с предварительным пропановым охлаждением или в технологии с двумя смешанными холодильными агентами;
 - указанные циклы наименее чувствительны к изменению составов смешанных хладагентов;
 - минимальными капитальными вложениями характеризуются процессы «Liquefin» и на смешанном холодильном агенте с предварительным пропановым охлаждением.

Производство СПГ на шельфе

Производство СПГ непосредственно на месторождении природного газа должно обеспечить меньшие затраты, чем в случае транспортирования природного газа на далеко отстоящую, находящуюся на суше установку для его сжижения.

В 1996 г. компания «Shell» провела исследования по размещению установки по сжижению газа на плавучей барже. Концепция разработки газовых месторождений называется «FLNG» (FLoating Liquid Natural Gas). Технология «FLNG» создана на основе накопленного опыта эксплуатации установок СПГ на суше и морских плавучих судах по добыче, хранению и отгрузке продукции («FPSO»), а также транспортирования СПГ. Компания «Shell» включилась в работы по проектированию и эксплуатации СПГ установок на суше более 40 лет назад. Концентрация внимания на альтернативных схемах сжижения природного газа привела к разработке компанией «Shell» процесса «Dual MR» (Dual Mixed Refrigerant — «Двухкомпонентный смешанный хладагент»).

Малотоннажное производство СПГ

Другое направление использования СПГ — удовлетворение пикового спроса в тех случаях, когда создаются запасы СПГ на зиму. Новый сектор рынка СПГ — транспортное топливо. Установки сжижения природного газа для транспортных средств такие же, как и для обеспечения пиковых нагрузок, но емкости СПГ для транспорта гораздо меньше, и газ из них чаще отгружается в сжиженном виде, чем в газообразном компримированном.

СПГ установки для покрытия пиковых нагрузок и получения топлива для транспортных средств сходны по схеме очистки и сжижения, но имеют различия в секциях хранения и отгрузки продукта. Так, СПГ в них хранится в низкотемпературных изотермических резервуарах при атмосферном давлении. В случае необходимости выдается насосом высокого давления через испаритель в газопровод.

Для малотоннажного производства ключевыми целями проекта являются, как правило, упрощение операций и сокращение капитальных затрат. **Цикл Брайтона**, в котором применяется азот, представляет интерес для малотоннажного производства СПГ, поскольку позволяет избавиться от необходимости поставок и хранения углеводородного хладагента. Азот, необходимый для процесса очистки и инертизации, уже доступен. Для малотоннажного производства размеры коммуникаций и оборудования не ограничены, а цикл Брайтона изначально предполагает простую эксплуатацию.

Холодильный цикл Брайтона также нашел применение в устройстве судов – плавучих заводов СПГ, на которых изначально более безопасный хладагент, используемый в процессе сжижения, позволяет сократить занимаемое оборудованием пространство. Применение инертного, негорючего азота в качестве хладагента может быть более рациональным, так как это позволяет сократить запас сжиженных углеводородов в установке сжижения. В соответствии с требованиями безопасности, снижение запаса углеводородов позволяет обеспечить более компактное устройство установки сжижения на судне – заводе СПГ, где пространство обладает большой ценностью. Кроме того, эффективность холодильного цикла Брайтона не зависит от движения судна, поскольку хладагент находится в паровой фазе в течение процесса.

Технология, включающая в себя три холодильных цикла, применяемая для сверхкрупнотоннажного (около 8 млн т/год) производства СПГ в Катаре также включает холодильный цикл Брайтона. В этой схеме простой, эффективный и легкий в эксплуатации азотный расширительный контур применяется для дополнительного охлаждения выходного потока СПГ из традиционного холодильного цикла с хладагентом из смеси углеводородов с предварительным охлаждением пропаном. В результате, **треххладагентный процесс** позволяет нивелировать недостатки широко известного пропанового холодильного цикла с хладагентом из смеси углеводородов, что позволяет обеспечить очень высокую производительность на одной линии и в то же время сохранить стандартные размеры оборудования.

Сравнение относительной удельной мощности условиях холодильного цикла Брайтона с использованием азота и метана (рисунок 5) показывает, что метан является более эффективным (цикл с его применением имеет меньшую удельную мощность) в интервалах температур предварительного охлаждения и сжижения. Это связано с тем, что метан имеет меньший коэффициент теплоемкости.

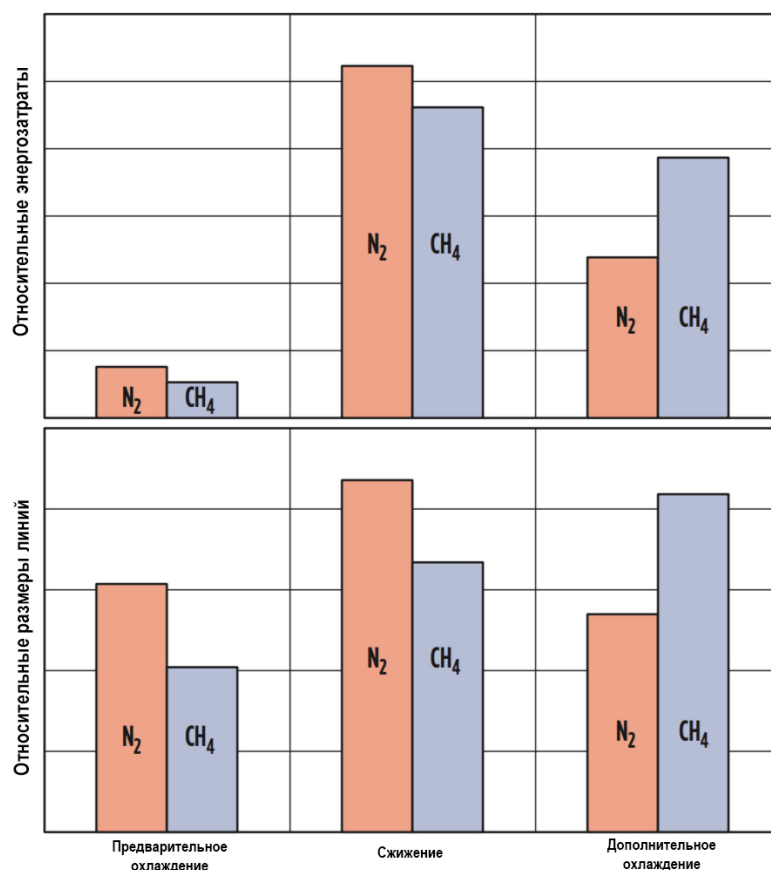


Рисунок 5 – Сравнение метана и азота в качестве рабочих тел

Для заданной степени сжатия азот будет иметь большую конечную температуру, чем метан, за счет большего значения коэффициента теплоемкости. Это значит, что больше работы затрачивается на осуществление процесса сжатия вследствие более высокой температуры. Кроме того, дополнительные затраты работы возникают на этапе теплоотвода. Повышенное нагревание в процессе сжатия азота в некоторой степени может быть снижено за счет внедрения к компрессору промежуточных охладителей (интеркулеров). Однако, процесс промежуточного охлаждения влечет увеличение потерь давления, что делает сжатие метана более эффективным, чем сжатие азота.

Также на рисунке 5 показано, что размер коммуникаций в случае применения метана меньше, чем в случае применения азота, как для коммуникаций предварительного охлаждения, так и для коммуникаций сжижения. Это объясняется большей изобарной теплоемкостью метана по сравнению с азотом. За счет большей изобарной теплоемкости требуется меньший массовый расход для обеспечения эквивалентного охлаждения, в результате чего используются меньшие размеры коммуникаций.

Результаты отличны для этапа дополнительного охлаждения СПГ, который обеспечивает глубокое охлаждение. Для этапа дополнительного охлаждения азотный холодильный цикл Брайтона более эффективен, чем метановый холодильный цикл Брайтона, а также он требует меньших размеров технологических линий. Это обусловлено сравнительно низким давлением насыщенных паров. Давление насыщенных паров жидкости при наименьшей температуре в течение процесса (-153°C) определяет максимальное давление на выходе из детандера. Давление насыщенных паров метана и азота при -153°C 1,9 бар и 25 бар, соответственно.

Так как потери давления пропорциональны абсолютному давлению, нагревание метана при низком давлении влечет за собой большие потери давления наряду с уменьшением общей эффективности процесса в случае использования метана в качестве рабочего тела.

Несмотря на то, что метан имеет лучшие показатели производительности для стадии предварительного охлаждения и сжижения, оптимальным рабочим телом для холодильного

цикла Брайтона является азот, в случае если используется только одно рабочее тело для всего процесса сжижения СПГ (предварительное охлаждение, сжижение и дополнительное охлаждение). В целом, преимущества метана в предварительном охлаждении и охлаждении на этапе сжижения уступают недостаткам в обеспечении дополнительного охлаждения.

Существует комплексное решение, которое обеспечивает приемлемую степень эффективности при небольших размерах оборудования – схема с применением **цикла с интегрированным детандером и испарительным циклом** (рисунок 6) компании «Air Products and Chemicals».

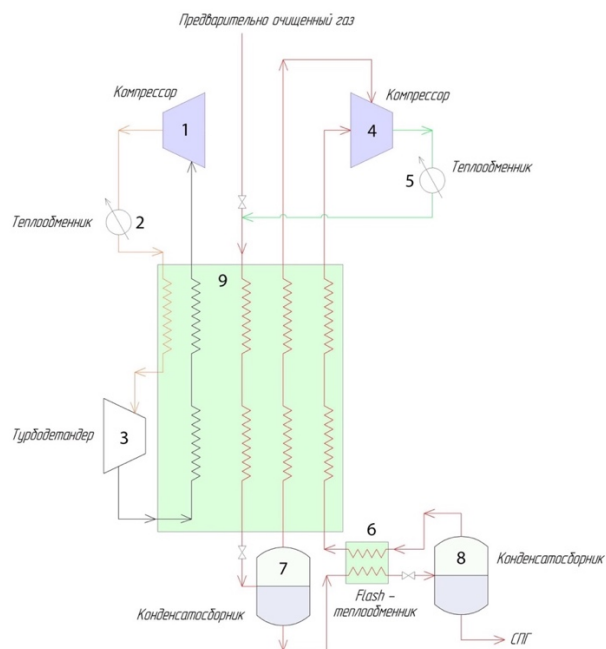


Рисунок 6 – Принципиальная схема установки по получению СПГ:

- 1 – компрессор основного цикла; 2 – теплообменник типа холодильник основного цикла; 3 - турбодетандер основного цикла; 4 – компрессор цикла сжижения паровой фазы; 5 – теплообменник типа холодильник цикла сжижения паровой фазы; 6 – испарительный теплообменник; 7 – конденсатосборник; 8 – конденсатосборник