

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАСКАДНОГО ЦИКЛА СЖИЖЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Мещерин И.В., Хлыбов Н.В.

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина

В целях более эффективного использования холодных арктических условий и учитывая аналитические данные о применяемых на заводе «Ямал СПГ» технологиях предлагается альтернативная технологическая схема производства СПГ (схема 1).

В технологии используются три смешанных хладагента (MR1, MR2, MR3), состав каждого из которых есть возможность корректировать, учитывая температуру окружающего воздуха.

Первые два хладагента состоят из смесей метана, этана, пропана и азота в различных концентрациях – первый тяжелее (предварительное охлаждение), а второй легче (сжижение и переохлаждение). Третий хладагент используется только для охлаждения первых двух и напрямую поток сырьевого природного газа не охлаждает. Он состоит из смеси этана и пропана, концентрации которых тоже можно регулировать – летом увеличить долю пропана, а зимой долю этана.

Второй хладагент MR2 после охлаждения разделяется на два потока, первый из которых охлаждает природный газ на стадии сжижения, а второй – на стадии переохлаждения. Обе стадии могут протекать в одном витом криогенном теплообменнике или в двух пластинчато-ребристых теплообменниках. Первый поток после стадии сжижения забирает тепло на стадии предохлаждения, а второй поток после стадии переохлаждения забирает остатки тепла на стадии сжижения.

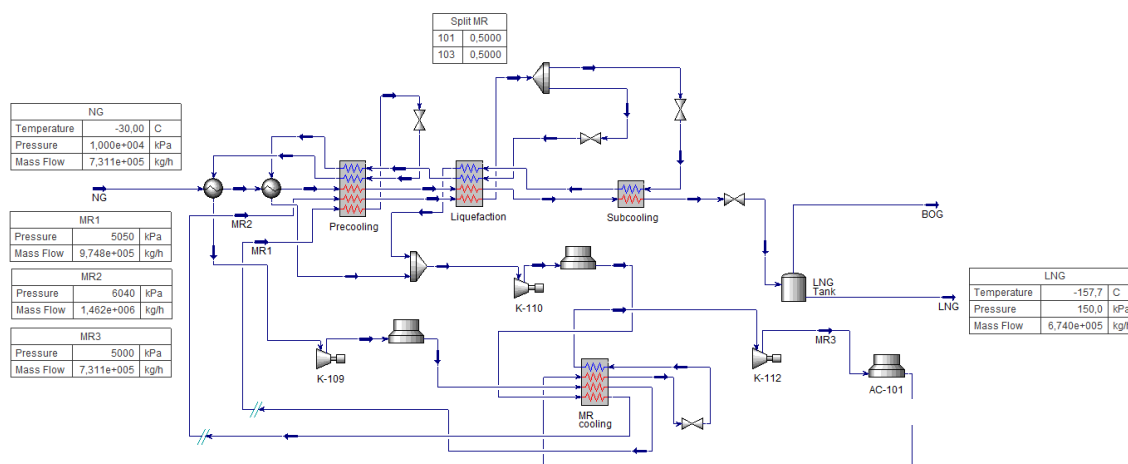


Рисунок 1 – Принципиальная схема альтернативной технологии сжижения

В итоге образуется СПГ с температурой минус 161,5 °С и давлением 130 кПа. Расчетная степень ожижения исходного сырьевого потока при стабильном режиме работы достигает 99 %. Отпарной тощий газ можно использовать как топливо газотурбинных установок.

Приведенные характеристики позволяют получать СПГ при более низких затратах энергии в широком диапазоне температур. Для сокращения энергозатрат можно использовать турбодетандеры, которые передадут энергию расширяющихся потоков на нагнетаемые потоки.

Основными отличиями альтернативной технологии от процесса MFC компании «Linde» являются более низкая проектная производительность, а также иное аппаратное оформление, в частности циклы охлаждения потоков природного газа и смешанных хладагентов организованы другим образом.

Сравнение технологических схем

Для сравнения альтернативной технологии с процессом «Арктический каскад» компании «НОВАТЭК» [1] обе были смоделированы в программе Aspen HYSYS. К сравнению добавлена близкая по производительности технология Smartfin от «Air Liquide» в силу ее наибольшего соответствия современным тенденциям развития процессов сжижения газа по мнению

авторов статьи. В сравнение не включалась технология C_3MR , так как производительность линии с ее использованием значительно выше.

Оценочно, «Арктический каскад» при эквивалентной производительности имеет большую металлоемкость: используется пять витых испарителей этана, главный криогенный теплообменник – испаритель азота, а также многопоточная емкость мгновенного испарения.

При альтернативной технологии используется лишь четыре модели теплообменных аппаратов, две из которых при воплощении в жизнь могли бы быть объединены в один витой криогенный теплообменник с двумя условными секциями или в многопоточный пластинчато-ребристый теплообменник при готовности завода изготовителя.

В технологии Smartfin [2, 3] используется относительно небольшое количество оборудования. В качестве основного теплообменника выступает алюминиевый паянный агрегат. Основным хладагентом является смесь метана, этана, пропана, бутана и этилена [4]. Основной сложностью возможного использования данной технологии на заводе «Ямал СПГ» является слишком сложный состав хладагента, в частности наличие в нем этилена, который на заводе не производится. При этом следует отметить, что по авторским расчетам смесь этих газов наиболее эффективно сжижает сырьевой поток зимой, так как этилен из указанных выше веществ имеет наименьшую температуру кипения.

Сравнение удельных массовых расходов потоков хладагентов в обеих схемах приведено в табл. 1.

Расчет показывает, что металлоемкость труб и узлов также снижается при использовании альтернативной технологии по сравнению с «Арктическим каскадом» в силу меньшего суммарного удельного расхода хладагента.

График потребления энергии для различных технологий на 1 т СПГ приведен на рисунок 2.

Таблица 1 – Сравнение удельных массовых расходов потоков хладагентов

Поток хладагента	Расход хладагента на 1 кг/ч потока природного газа, кг/ч	
	«Арктический каскад»	Альтернативная
Этан	2,22	-
Азот	2,40	-
Смешанный хладагент 1	-	1,33
Смешанный хладагент 2	-	2,00
Смешанный хладагент 3	-	1,00
ИТОГО	4,62	4,33

По расчетам удельных энергозатрат при минус 30 °С все технологии показывают примерно одинаковые результаты – около 220 кВт энергии на 1 т СПГ.

С ростом температуры до минус 10 °С энергозатраты «Арктического каскада» и альтернативной технологии растут примерно одинаково – до 228 кВт. Далее с ростом температуры за счет некоторого утяжеления составов хладагентов рост в энергозатратах у альтернативной технологии не слишком велик, и при 30 °С это значение составляет 234 кВт. Нагнетание и охлаждение этана и азота («Арктический каскад») в условиях высокой температуры воздуха приводит к резкому росту энергозатрат – до 256 кВт на тонну СПГ.

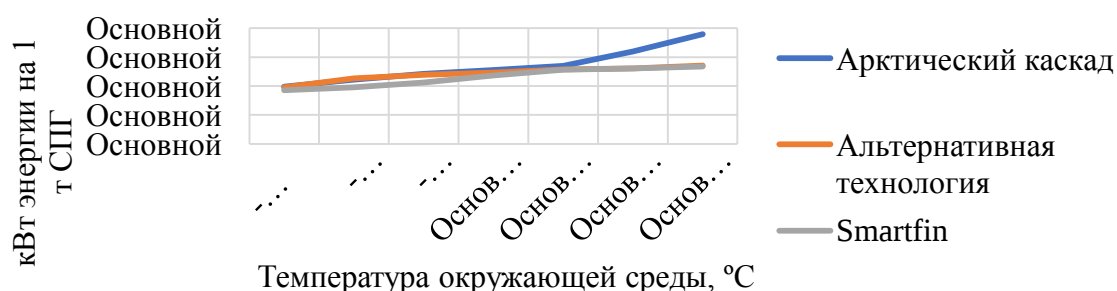


Рисунок 2 – Расчет потребления энергии для различных технологий на 1 т СПГ (400 т СПГ в год) в зависимости от температуры воздуха

За счет присутствия этилена в смешанном хладагенте технологии Smartfin в холодные времена года и при малой мощности по СПГ энергозатраты получаются наименьшими – 217 кВт. С повышением

температуры воздуха присутствие этилена снижается, растет расход более тяжелых газов. При достижении отметки в 0 °С состав хладагента уже лишается этилена, что способствует снижению скорости роста в энергозатратах, и график изменяет характер роста (вначале рост сопоставим с линией «Арктического каскада», а после с линией альтернативной технологии). При этом стоит учесть, что энергозатраты технологии сильно растут с увеличением производительности по СПГ (рисунок 3), так как в технологии используется всего один смешанный хладагент, отвечающий как за предварительное охлаждение природного газа, так и за его сжижение.

Известно, что технология C_3MR в среднем расчетно потребляет 260 кВт энергии на 1 т СПГ [5], а в пике и до 343 кВт [6], что выше, чем в остальных трех технологиях.

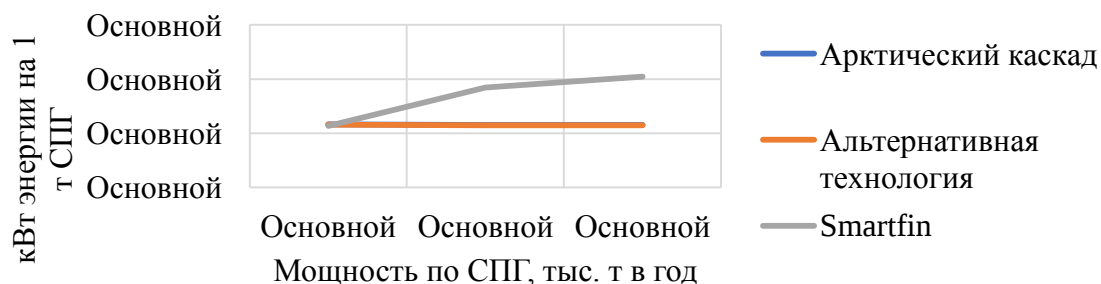


Рисунок 3 – Расчет потребления энергии для различных технологий на 1 т СПГ при 0 °С в зависимости от производительности

ЛИТЕРАТУРА:

1.Минигулов Р.М. Способ сжижения природного газа по циклу высокого давления с предохлаждением этаном и переохлаждением азотом «Арктический каскад» и установка для его осуществления: пат. РФ 2 645 185; заявл. 16.03.2017; опубл. 16.02.2018.

2.Российские производства по сжижению природного газа. Дата обновления: 11.10.2019. URL: <https://magazine.nftegaz.ru/articles/spg/500005-rossiyskie-proizvodstva-po-szhizheniyu-prirodnogo-gaza/> (дата обращения: 4.09.2021).

3. Smartfin – Single Mixed Refrigerant Technology. Дата обновления: 2021. URL: <https://www.engineering-airliquide.com/smartfin-single-mixed-refrigerant-technology> (дата обращения: 5.09.2021).

4. Российские производства по сжижению природного газа. Дата обновления: 11.10.2019. URL: https://gaschemistry.ru/publications/2019/neftegaz10_kondratenko.pdf (дата обращения: 6.09.2021).

5. Арктический каскад. Дата обновления: 3.09.2020. URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/pererabotka-nefti-i-gaza/524100-arkticheskiy-kaskad/> (дата обращения: 7.09.2021).

6. Установки сжижения природного газа. Дата обновления: 24.04.2020. URL: <https://goload.ru/ustanovki-szhizheniya-prirodnogo-gaza-spg/> (дата обращения: 8.09.2021).