

## УДК 66.078

А.Б. КАРПОВ, ассистент (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина)  
г. Москва

### АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ МАЛОТОННАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Мировая индустрия сжиженного природного газа (СПГ) включает крупнотоннажное производство, основная цель которого - поставка СПГ на мировые рынки, и малотоннажное производство, нацеленное на межрегиональную торговлю и удовлетворение спроса на внутреннем рынке [1]. Низкие цены на природный газ позволяют газодобывающим компаниям рассматривать инвестиции в малотоннажные заводы по производству СПГ. К настоящему моменту в России построены и введены в эксплуатацию несколько малотоннажных установок по производству сжиженного природного газа [2]. Ввиду высокой маржинальности продаж сжиженного природного газа, используемого в качестве моторного топлива, перспективно развитие малотоннажных процессов производства СПГ [3]. Частным вопросом при этом является, какая технология сжижения наилучшая. Оптимизация технологии СПГ является весьма трудоемкой и сложной задачей [4]. На первый взгляд, на рынке существует множество альтернативных вариантов технологических процессов. Однако при более внимательном рассмотрении выбор сужается до технологий сжижения с применением смешанного хладагента (SMR) или азотного цикла ( $N_2$ ). Эти технологии преобладают в диапазоне мощностей малотоннажного производства от 25 до 350 тыс. т/год СПГ.

Для сравнения двух конкурирующих технологий сжижения в работе были выбраны два процесса. В них в качестве основных теплообменников в блоке сжижения используются паяные алюминиевые пластинчатые теплообменники. Процессы являются одноконтурными: с многоступенчатым охлаждением смешанным хладагентом и циклом двойного расширения азота.

Высокие удельные энергозатраты ограничивают широкое применение варианта процесса с одноступенчатым расширением азота. Другие процессы двойного расширения имеют различные конфигурации, используют углеводородные компоненты, смешанные с азотом в качестве хладагента, или представляют собой комбинации технологий SMR и  $N_2$ -цикла. Считается, что классический цикл с двойным расширением  $N_2$  и технология SMR, используемые в данной работе для сравнения, являются краеугольными камнями современных малотоннажных технологий СПГ.

Выбор проектных технологических параметров установки, таких как температура окружающей среды, давление и состав подаваемого газа, давление в резервуарах, количество отпарного газа и т.д., оказывают значительное ( $\pm 20\%$ ) влияние на удельные энергетические потребности завода СПГ. Для обеспечения верного сопоставления производительности принципиально использовать одинаковые технологические параметры или, поскольку различные процессы являются оптимальными в разных условиях, можно использовать равные диапазоны параметров. По этой причине был изучен ряд конструктивных параметров, а не одна, произвольно выбранная точка. Также из сравнения исключено указание абсолютных показателей, чтобы исключить вводящие в заблуждение данные - вместо этого приводятся относительные различия.

Расчетная температура окружающей среды влияет на производительность процесса – потребляемая мощность любого процесса охлаждения возрастает с повышением температуры окружающей среды, при этом рост зависимости энергопотребления установки с азотным циклом выше по сравнению с SMR.

В среднем, азотный цикл требует примерно на 30% больше мощности, чем SMR-процесс. Эта разность потребляемой энергии уменьшается по мере увеличения давления сырьевого газа. Можно сделать вывод, что основной недостаток азотного цикла – высокая энергоемкость – в наименьшей степени проявляется для установок с низким давлением подаваемого газа и высокой температурой окружающей среды. При таких условиях может быть достигнута разница между SMR и циклом  $N_2$  в потреблении энергии в 25%, тогда как при высоком давлении сырьевого газа и низкой температуре окружающей среды SMR-процесс энергоэффективнее на 35%.

Поскольку эффективность процесса охлаждения улучшается при сближении кривых охлаждения подаваемого газа и хладагента, то состав исходного газа также оказывает влияние. При анализе данного параметра выявлено, что он имеет умеренный эффект. Эффективность азотного цикла немного улучшается на обедненных сырьевых газах. Улучшение может составлять до 5%. Объяснением этого является то, что азот работает как высокоэффективный хладагент при криогенных условиях, но показывает низкую эффективность при более высоких температурах процесса сжижения.

Так как азотный цикл демонстрирует низкую эффективность при высоких температурах сжижения, на многих установках сжижения с  $N_2$ -циклом имеется блок предварительного охлаждения, который обеспечивает холодопроизводительность при более высоких температурах.

Существуют различные технологии предварительного охлаждения. Предохладение аммиаком и пропаном считается наиболее распространенным и простым вариантом для одного цикла одноступенчатого процес-

са охлаждения. Однако добавление дополнительных этапов охлаждения позволяет повысить эффективность, но при этом увеличивает стоимость и сложность аппаратного оформления.

Помимо энергопотребления, существуют два других параметра, влияющих на инвестиционные затраты, которые существенно различаются для двух процессов сжижения. В то время как в цикле SMR используется двухфазный хладагент, хладагент в цикле расширения азота всегда находится в газовой фазе. Неудивительно, что объемные потоки (и, следовательно, диаметры труб) в азотном цикле больше, чем в цикле SMR. Кроме того, давление азота (и, следовательно, толщина труб) должно быть значительно выше, чтобы достичь требуемой эффективности процесса.

Оба холодильных цикла SMR и  $N_2$  работают в замкнутых контурах; то есть они не «потребляют» хладагент во время работы. Как правило, системы компрессоров и уплотнений, используемые в этих холодильных циклах, не являются полностью герметичными, и поэтому утечки хладагента периодически должны восполняться. В каждом случае требуется узел хранения хладагентов. Для азотного цикла эта система может состоять из резервуара с жидким азотом с испарителем. В то время как для цикла SMR требуется хранение углеводородных компонентов  $C_2-C_5$  в разных резервуарах.

Сравнивая капитальные затраты в два разных варианта можно отметить, что:

- компрессоры SMR-процесса являются дорогостоящим оборудованием по сравнению с оборудованием для разделения воздуха, используемым в азотном цикле;
- количество трубопроводов более чем на 100% выше для цикла  $N_2$  по сравнению с циклом SMR, что приводит к значительно более высоким расходам материалов;
- общая разница затрат между альтернативными вариантами мала - всего около 5%.

При сравнении эксплуатационных затрат следует учесть, что затраты на оплату труда персонала будут одинаковыми, а затраты на техническое обслуживание оборудования трудно точно оценить, при этом:

- цикл SMR показывает значительные преимущества в отношении энергопотребления
- для азотного цикла стоимость расходов на систему подпитки жидким азотом сопоставима с затратами на электроэнергию
- при рассмотрении 15-летнего жизненного цикла относительный недостаток для азотного цикла - энергетические затраты – достигают того же порядка, что и абсолютная стоимость системы сжижения.

Таким образом, рассмотрев лишь ряд различий в капитальных затратах между двумя холодильными технологиями, можно сделать вывод, что

при выборе технологий лучше всего опираться на операционные расходы и эксплуатационные особенности работы установок.

Список литературы:

1. Голубева И.А., Мещерин И.В., Дубровина Е.П. Производство сжиженного природного газа: вчера, сегодня, завтра // Мир нефтепродуктов №6, 2016. - С. 4-13
2. Кондратенко А.Д., Карпов А.Б., Козлов А.М., Мещерин И.В. Российские малотоннажные производства по сжижению природного газа // НефтеГазХимия №4, 2016. - С. 31-36
3. Кондратенко А.Д. Разработка технологии подготовки природного газа для малотоннажного производства СПГ // в сб. трудов 71-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2017», 2017. - С. 176-181
4. Мещерин И.В. Оптимизация технологий сжижения природного газа с целью повышения экономической эффективности процесса // Территория Нефтегаз № 3, 2016. – С. 146-153.