На правах рукописи

Красноносова Серафима Дмитриевна

УДК 621.59

ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОТОННАЖНЫХ УСТАНОВОК СЖИЖЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА ЭНТРОПИЙНО-СТАТИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Специальность 05.04.03 - Машины и аппараты, процессы холодильной, криогенной техники, системы кондиционирования и жизнеобеспечения

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва - 2016

Диссертация выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: **Архаров Алексей Михайлович**
заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Борзенко Евгений Иванович**
заслуженный работник высшей школы РФ,
доктор технических наук, профессор

Шуяков Андрей Леонидович
кандидат технических наук, начальник отдела
ООО «Криогенмаш - БЗКМ»

Ведущая организация: ПАО «Газпром– ВНИИГАЗ»

Защита диссертации состоится 16 марта 2016 года в 14 часов 30 минут на заседании Диссертационного совета Д 212.141.16 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Лефортовская наб., д.1, ауд. 314-Э (конф. зал).

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим выслать по адресу: 105005. г. Москва, 2-ая Бауманская д.5, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.16.

С текстом диссертации можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «___» _____2016 г.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета Д 212.141.16,
кандидат технических наук, доцент — Колосов М.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы: Получение сжиженного природного газа (СПГ) является сегодня одним из перспективных направлений развития российской промышленности. В 2009 году на Сахалине совместно с зарубежными компаниями был построен первый крупнотоннажный завод по сжижению природного газа «Сахалин-2» мощностью 26300 тонн СПГ в сутки. В настоящее время находятся на стадии планирования и разработки еще несколько крупнотоннажных заводов: «Владивосток СПГ» на полуострове Ломоносова, «Балтийский СПГ» в Ленинградской области, «Ямал СПГ» на Ямале. Производительность таких заводов составляет 1100-1800 тонн СПГ в час. Получаемый на этих заводах СПГ рассчитан на удовлетворение экспортных потребностей.

В то же время с каждым днем растет интерес к малотоннажному производству сжиженного природного газа. В России существует развитая трубопроводная система природного газа, включающая в себя ряд автомобильных газонаполнительных компрессионных (АГНКС) и газораспределительных (ГРС) станций. Компрессорная база этих станций мало загружена (до 20%). Станции расположены в непосредственной близости от потребителя природного газа. Поступающий природный газ содержит 95-98% метана. Все эти факторы создают хорошие предпосылки для создания малотоннажных установок сжижения природного газа непосредственно на АГНКС и ГРС и на местах его потребления в российских регионах.

Интенсивное строительство малотоннажных установок сжижения природного газа по всему миру началось после 2000 г., однако наиболее ускоренный рост наблюдается с 2010-2014гг. На данный момент Россия занимает 3 место по количеству введенных в эксплуатацию установок. Развитие малотоннажного производства сжиженного природного газа активно поддерживается программами Правительства РФ. Нельзя забывать о

ПИОТЕКА

незаменимой роли малотоннажного производства при использовании СПГ на железнодорожном, морском и авиационном транспорте.

В связи с увеличивающимся интересом к теме малотоннажного сжижения регулярно появляются новые схемы и решения. Для совершенствования установок сжижения природного газа важно иметь возможность определять узлы этих установок, в которых «потери» энергии наиболее существенны, и работать над повышением эффективности этих узлов. В МГТУ им. Баумана активно разрабатывается метод энтропийно-статистического анализа, который позволяет детально анализировать криогенные установки и решать такого рода задачи. Предложенная в настоящей работе методика анализа малотоннажных установок сжижения природного газа дает возможность применить энропийно-статистический метод для исследования существующих и проектируемых установок с целью определения их энергоэффективности. Перспективность применения предложенной методики для определения новых схемных решений сжижения природного газа делают ее актуальной.

Целью работы является разработка методики исследования термодинамической эффективности и распределения энергетических «потерь» в малотоннажных установках сжижения природного газа, применение этой методики для анализа существующих и вновь разрабатываемых установок, а также экспериментальное подтверждение расчетных данных.

Основные задачи исследования

1. Разработка методики энтропийно-статистического анализа для исследования малотоннажных установок сжижения природного газа.

2. Исследование и сравнение термодинамической эффективности существующих малотоннажных установок сжижения природного газа.

3. Анализ и оценка влияния величины производства энтропии в отдельных узлах установки на термодинамическую эффективность системы сжижения.

4. Экспериментальное определение реальной термодинамической эффективности опытно-промышленных установок сжижения природного газа и сопоставление полученных результатов с расчетными значениями.

5. Выбор наиболее энергоэффективного цикла для малотоннажного сжижения природного газа и определение пути его дальнейшего совершенствования.

Научная новизна

1. Впервые предложена методика энтропийно-статистического анализа для исследования существующих и разрабатываемых малотоннажных установок сжижения природного газа.

2. Выполнен анализ основных существующих и перспективных схем установок малотоннажного сжижения природного газа. Показана эффективность замены дросселя на дроссель-эжектор в установках, работающих по циклу высокого давления. Предложен новый цикл с дроссель-эжектором и каскадным охлаждением.

3. Впервые получено экспериментальное подтверждение соответствия расчетных значений энергетических «потерь» реальным затратам в узлах действующих установок сжижения природного газа. Расхождение результатов расчетов со значениями, полученными экспериментально, находятся в пределах 5%.

Защищаемые положения

1. Методика энтропийно-статистического анализа для исследования установок сжижения природного газа.

2. Результаты расчетного исследования существующих и перспективных установок сжижения природного газа.

3. Результаты экспериментальных исследований опытно-промышленных установок сжижения природного газа.

Личное участие в получении результатов

Главы 1-4 выполнены лично автором. В главе 5 экспериментальные данные получены ЗАО НПК «НТЛ». Все расчеты и выводы главы 5 сделаны лично автором.

Достоверность полученных автором результатов

Достоверность полученных автором данных подтверждается применением сертифицированных измерительных приборов, использованием проверенных способов измерения параметров и методик проведения экспериментов. Все полученные данные могут быть повторно воспроизведены в результате эксперимента.

Практическая значимость

В проведенном исследовании анализируется ряд существующих малотоннажных установок сжижения природного газа. На конкретных примерах показано, что предложенная методика позволяет решить ряд конкретных задач на стадии проектирования низкотемпературных установок сжижения природного газа, включая определение эталонного значения величины термодинамической эффективности установки. Она дает возможность анализировать и определять вероятные величины реальных (действительных) энергетических «потерь» в результате необратимости, идентифицировать узлы и компоненты установок, которые требуют усовершенствования, и в итоге прогнозировать технические и экономические характеристики проектируемых установок. В связи с проблемами глобального потепления и увеличением стоимости электроэнергии в мире, проблема энергосбережения становится более важной, и энтропийно-статистический метод предлагает способ частичного решения этой проблемы на начальной стадии проектирования.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на 11-й международной криогенной конференции МИХ (Братислава, 2010 г.), 2-й международной конференции «ПРОМЫШЛЕННЫЕ ГАЗЫ» (Москва,

2011 г.) и на международной конференции «Сжиженный природный газ» в рамках выставки «Криоген-Экспо. Промышленные газы - 2015» (Москва, 2015 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 5 научных работ, из них 4 в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК, общим объемом 1,74 п.л..

Объём и структура работы

Диссертационная работа состоит из пяти глав, основных выводов, списка использованной литературы (83 наименования) и приложения. Работа содержит 139 страниц текста, 50 иллюстраций, 26 таблиц и приложение на 23 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлены методы термодинамического анализа низкотемпературных систем и проведен обзор научно-технической литературы по исследованию и сравнению установок сжижения природного газа.

При анализе энергосистем можно применять различные методы исследования. Для установок сжижения природного газа основными методами анализа являются энтропийно-статистический метод, разработанный А.М. Архаровым, и эксергетический метод, разработанный В.М. Бродянским. Выбор метода исследования зависит от конкретной анализируемой системы и решаемой задачи. Примерами таких задач может быть генерация холода, генерация работы (электроэнергии), криостатирование, сжижение газов и многие другие.

Если целью рассматриваемой задачи является генерация работы (электроэнергии), то применение понятия эксергии, определяющую работоспособность теплоты, является рациональным. Если целью рассматриваемой задачи является генерация холода, то логичнее

использовать понятие энтропии, производство которой должно быть компенсировано затратой энергии (работой, теплотой, электроэнергией).

Исследование циклов сжижения природного газа в основном проведено для крупнотоннажного производства. Малотоннажное сжижение природного газа гораздо менее освещено в литературе. В большинстве случаев эффективность работы установок оценивается по удельным затратам электроэнергии на 1 кг СПГ. Несмотря на то, что такой подход кажется рациональным, он не всегда верен для установок сжижения природного газа, потому что не дает представления об эффективности и распределении энергетических «потерь» по узлам установки.

Эффективность цикла с точки зрения термодинамического совершенства рассмотрена лишь в нескольких работах. Термодинамический КПД более достоверно характеризует рассматриваемый цикл, потому что отражает «потери» холодопроизводительности в результате необратимости процессов и позволяет установить их относительное значение.

При проведении детального исследования циклов рассматриваемые установки сжижения природного газа анализируются и с помощью эксергетического метода. В этом случае использование понятия «эксергии холода», отнесенное к теплоте, которую может воспринять сток, нерационально в едином термодинамическом пространстве, потому что это искажает изначальное значение термина, данное Рантом в 1956г. Введение такого термина значительно усложняет применение эксергетического анализа для низкотемпературных систем.

Проведенный в первой главе анализ показал, что существует потребность в создании методики для исследования малотоннажных установок сжижения природного газа, которую можно применять для анализа существующих и проектируемых установок.

Во второй главе приведена разработанная методика применения энтропийно-статистического анализа для исследования малотоннажных установок сжижения природного газа.

. Используя уравнение Гюи-Стодолы:

$$\Delta l = T_{oc} \cdot \sum_{i=1}^{n} \Delta s_i', \qquad (1)$$

где $\Delta s_i'$ - суммарная величина производства энтропии вследствие необратимости во всех "n" подсистемах, можно в первом приближении определить не только теоретические, но и реальные затраты энергии на компенсацию производства энтропии.

Для функционирования реальной криогенной установки требуются затраты работы:

$$L_д = l_{min} + \Delta l, \qquad (2)$$

где величина l_{min} – это затраты работы криогенной установки, работающей по циклу с полностью обратимыми процессами (термодинамически совершенная установка); Δl – величина энергетических «потерь», обусловленных необратимостью.

Степень термодинамического совершенства криогенной установки определяется как:

$$\eta = \frac{l_{min}}{L_д}. \qquad (3)$$

Для расчета «потерь» в отдельных узлах используется информация о следующих среднестатистических величинах, полученных на основании многолетнего опыта проектирования и эксплуатации криогенных установок:

T_{OC}=300 К - температура окружающей среды принимается равной средней температуре излучения Земли в окружающее пространство;

ΔT=5÷10 К - величина недорекуперации в теплообменных аппаратах, возникающая вследствие несовершенства процесса теплообмена;

q_{OC} - теплоприток из окружающей среды, который зависит от вида применяемой изоляции. В малотоннажных установках сжижения природного газа применяется, как правило, насыпная (перлит) изоляция или изоляция на основе вспененного каучука. Для данного характерного температурного уровня (T >80 К) q_{OC}= 1÷ 4 кДж/кг сжатого газа;

$\eta_{из}$, $\eta_{ад}$ – коэффициенты, характеризующие эффективность сжатия в

компрессорах. Для оценки совершенства процессов в компрессорах используются изотермический $\eta_{из}$ и адиабатный $\eta_{ад}$ КПД. Значения величин: $\eta_{из}$=0,55..0,65, а $\eta_{ад}$ =0,7..0,8.

Суммарная работа, затрачиваемая на компенсацию производства энтропии в контуре природного газа (ПГ):

$$\Sigma\Delta l'_{iПГ} = \Sigma T_{oo}\Delta s'_i + l_{min} + \Sigma\Delta l'_i - l_{\min\,охл.}, \qquad (4)$$

где $\Sigma T_{oo}\Delta s'_i$ – суммарные затраты энергии на компенсацию производства энтропии в узлах контура ПГ (таких как теплообменник, дроссель, эжектор, сепаратор-смеситель, др.), $\Sigma\Delta l'_i$ – затраты энергии на компенсацию теплопритоков из окружающей среды и недокуперации, l_{min}, $l_{\min\,охл.}$ – минимальная работа ожижения и минимальная работа предварительного охлаждения.

Суммарная работа, затрачиваемая на компенсацию производства энтропии в контуре ПКХМ:

$$\Sigma\Delta l'_{iПКХМ} = (\Sigma T_{oo}\Delta s'_i + \Delta l'_i)Y + l_{\min\,охл.}, \qquad (5)$$

где $\Sigma T_{oo}\Delta s'_i$ - суммарные затраты энергии на компенсацию производства энтропии в узлах контура предварительного охлаждения ПКХМ (таких как испаритель, конденсатор, дроссель); $\Delta l'_i$ - затраты работы на компенсацию теплопритоков к контуру предварительного охлаждения; Y – величина соотношения расходов природного газа и внешнего хладагента; $l_{\min\,охл.}$ – величина минимальной работы предварительного охлаждения ПГ.

Мерой достоверности расчета является величина разности энергии, вырабатываемой компрессорами (изотермическая или адиабатная работа сжатия), и затрачиваемой на генерацию энтропии по контурам природного газа и ПКХМ (суммарные теоретические «потери», определяемые уравнениями (4), (5)):

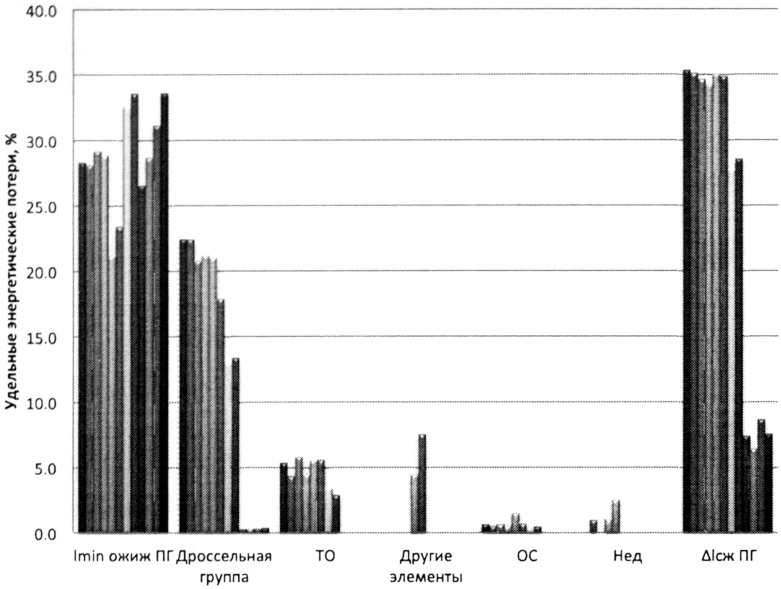
$$\Delta = \left(\Sigma\Delta l'_{iПГ} + \Sigma\Delta l'_{iПКХМ}\right) - \left(l_{из.сж} + Y\, l_{ад}^{ПКХМ}\right)$$

В третьей главе приведены результаты энтропийно-статистического анализа ряда существующих и проектируемых малотоннажных установок сжижения природного газа.

На основе предложенной методики исследованы установки с дроссельным циклом высокого давления с предварительным фреоновым охлаждением, с дроссельно-эжекторным циклом высокого давления с одной и двумя дроссель-эжекторными ступенями, с предварительным охлаждением на температурном уровне -70°С и с внешним азотным рефриджераторным детандерным циклом. Результаты расчета распределения затрат на производство энтропии по узлам установок в контуре природного газа приведены на Рис.1.

В результате проведенного анализа можно наглядно видеть пути совершенствования дроссельного цикла с предварительным охлаждением. Введение дополнительного дроссель – эжектора для рециркуляции пара из хранилища СПГ в прямой поток уменьшает общие затраты в результате необратимости всей установки на 9%, снижая энергозатраты в дроссельной группе на 19% (1,7% от общих затрат). Благодаря этому степень термодинамического совершенства повышается на 3,1%.

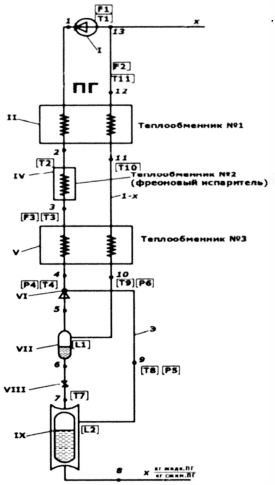
Применение предварительного охлаждения на уровне -70°С позволяет дополнительно снизить затраты в дроссельной группе таким образом, что они составляют 13% от общих энергетических «потерь» в установке. Затраты энергии на сжатие в компрессоре снижаются с 34,7% в цикле с одним дроссель-эжектором до 27,8% в цикле с предварительным охлаждением до -70°С. Это позволяет достичь степени термодинамического совершенства 0,325, что на 10% выше, чем в цикле с одним дроссель-эжектором, и на 13% выше, чем в дроссельном цикле.



- Установка с дроссельным циклом высокого давления и предварительным фреоновым охлаждением*
- Установка с дроссельным циклом высокого давления и предварительным фреоновым охлаждением**
- Установка с одной дроссель-эжекторной ступенью*
- Установка с одной дроссель-эжекторной ступенью**
- Установка с двумя дроссель-эжекторными ступенями**
- Установка с одной дроссель-эжекторной ступенью, предназначенная для сжижения природного газа с содержанием низкокипящих компонентов до 9%**
- Установка с одной дроссель-эжекторной ступенью и предвариельным охлаждением на уровне -70°С*
- Установка с одной дроссель-эжекторной ступенью и предварительным охлаждением каскадной холодильной машиной*
- Ожижитель природного газа с внешним азотным рефрижераторным детандерным циклом при η=0,6 и ηs=0,8**
- Ожижитель природного газа с внешним азотным рефрижераторным детандерным циклом при η=0,65 и ηs=0,8**
- Ожижитель природного газа с внешним азотным рефрижераторным детандерным циклом при η=0,6 и ηs=0,835**
- Ожижитель природного газа с внешним азотным рефрижераторным детандерным циклом при η=0,65 и ηs=0,835**

Рис. 1. Сравнение распределения энергетических затрат по элементам цикла природного газа, % (от общих затрат) : * - цикл, рассчитанный на метане, ** - цикл, рассчитанный на природном газе

В четвертой главе приводится описание опытно-промышленной установки, работающей по дроссель-эжекторному циклу, методика измерений и результаты проведенных исследований.



Принципиальная схема установки приведена на Рис.2. В общей сложности было проведено 6 опытных режимов, в течение которых регистрировались температура, давление и расход в указанных выше точках.

Рис. 2. Принципиальная схема установки СПГ с дроссельно-эжекторным циклом

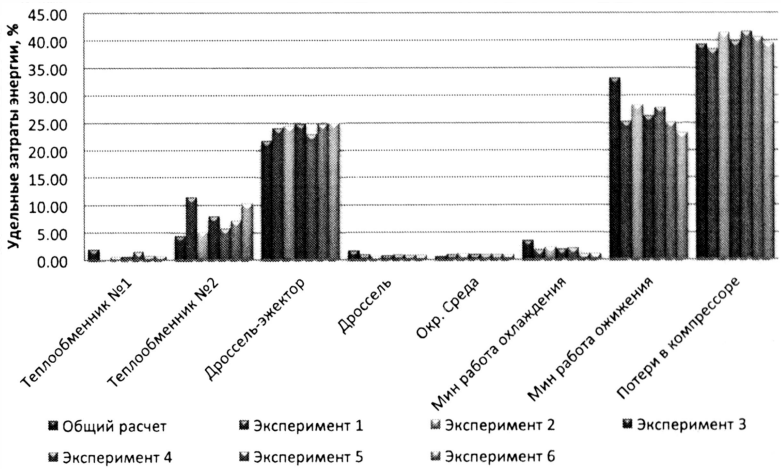


Рис. 3. Распределение энергетических затрат на производство энтропии в узлах установки сжижения природного газа с дроссель-эжекторным циклом охлаждения, %

Полученные в результате расчета и эксперимента распределение энергетических «потерь» по узлам установки приведены на Рис. 3. Расхождение расчетных и экспериментальных значений энергетических «потерь» составляет менее 5%, что говорит о том, что можно успешно использовать предложенную методику для анализа установок сжижения природного газа.

Экспериментальные данные подтвердили распределение энергетических «потерь» в результате необратимости по основным узлам установки. Наибольшие «потери» происходят в дроссель-эжекторном узле и составляют 21,8%. Но введение дроссель-эжектора в цикл привело к снижению общих затрат на дросселирование на 1,7% от общих затрат. Таким образом, удалось повысить эффективность цикла сжижения путем внедрения дешевого, простого и надежного устройства.

В пятой главе описывается экспериментальная установка с предварительным охлаждением до -70°С, проводится анализ полученных результатов и их сопоставление с данными, полученными расчетным путем с помощью разработанной методики. Принципиальная схема установки представлена на Рис. 4. Распределение затрат на производство энтропии в цикле сжижения природного газа представлено на Рис. 6. Расхождение расчетных и экспериментальных данных по узлам установки с дроссельно-эжекторным циклом и предварительным охлаждением на температурном уровне -70°С составляет не более 4%, что еще раз подтверждает, что предложенная методология применения энтропийно-статистического анализа может быть успешно использована для расчета распределения энергетических «потерь» в установке.

Результаты анализа показывают, что схему сжижения природного газа можно усовершенствовать, если природный газ предварительно охлаждать не одной нижней ветвью каскада R23, а обеими фреоновыми ветвями каскада R22 и R23. Предварительный отвод тепла на более высоком температурном уровне может позволить уменьшить «потери» во фреоновых контурах и,

соответственно, повысить эффективность ожижительной установки. Принципиальная схема предлагаемой установки представлена на Рис. 5. В цикл входит трехпоточный теплообменник №2, который помимо потоков фреонов R22 и R23 включает в себя поток природного газа. Результаты проведенного анализа установки с каскадным охлаждением схематически изображено на Рис. 7. Как наглядно видно из рисунка, затраты на производство энтропии в контуре природного газа в предложной схеме с каскадным охлаждением остаются без изменений.

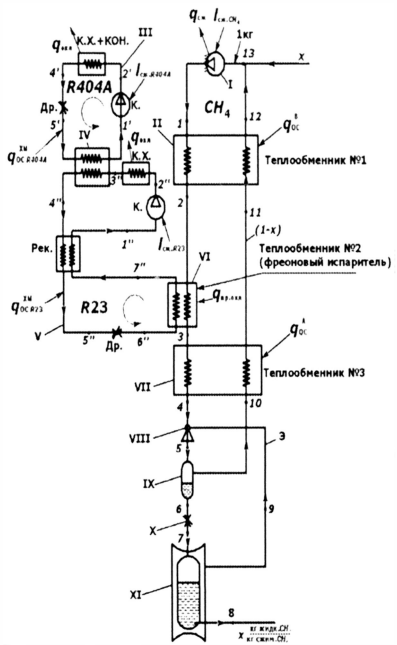


Рис. 4. Принципиальная схема опытно-экспериментальной установки с дроссель-эжекторным циклом высокого давления и предварительным фреоновым охлаждением на температурном уровне -70°С

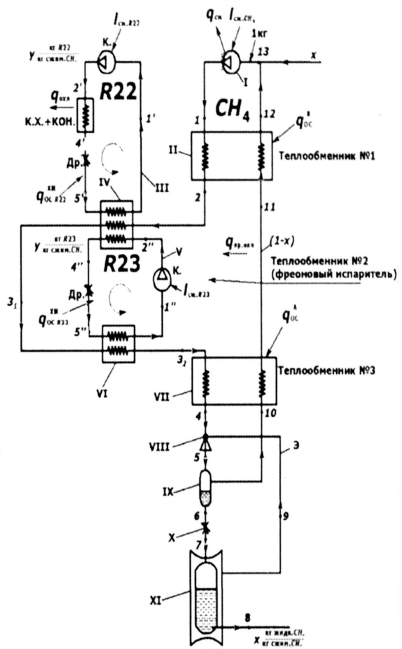


Рис. 5. Принципиальная схема установки в дроссель-эжекторным циклом высокого давления и каскадным фреоновым охлаждением

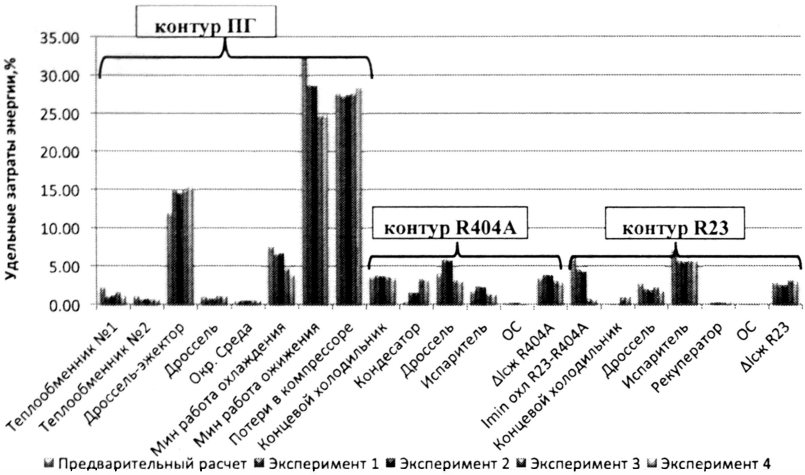


Рис. 6. Распределение затрат энергии в установке сжижения природного газа, % (от общих затрат)

Рис. 7. Схематическое изображение распределения затрат энергии по элементам установки, работающей по дроссель-эжекторному типу с каскадным циклом предварительного охлаждения (пунктирной линией показано распределение затрат в цикле с предварительным охлаждением на температурном уровне -70°С)

Основной выигрыш в расходуемой на производство энтропии работе происходит во фреоновом контуре R23. Благодаря тому, что фреон в контуре R22 предварительно частично охлаждает природный газ, минимальная работа охлаждения, приходящаяся на контур R23, снижается на 34%. В связи с этим значительно уменьшаются энергетические «потери» в испарителе и на сжатие в компрессоре. Вследствие этого суммарные энергетически затраты в контуре R23 уменьшаются на 38%. Это ведет к сокращению общих затрат всей установки на 5,5%. Таким образом, на основании анализа, проведенного по предложенной методике, разработан усовершенствованный цикл с дроссель-эжектором и каскадным охлаждением. Реализация этого цикла позволяет уменьшить удельные затраты электроэнергии до 0,478 кВт ч/кг СПГ и достичь степени термодинамического совершенства 0,341.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основе энтропийно-статистического подхода впервые разработана методика анализа малотоннажных установок сжижения природного газа. На основании предложенной методики выполнено исследование установок сжижения природного газа, работающих по 7 различным термодинамическим циклам.

Применение разработанной методики позволило:

- выявить узлы с максимальными «потерями» энергии в исследованных установках;
- показать распределение «потерь» энергии по узлам установок сжижения природного газа;
- предложить новый цикл с дроссель-эжектором и каскадным охлаждением.

Выявлено, что совершенствование дроссельного узла путем замены его на дроссель-эжектор повышает эффективность обычного дроссельного цикла на 3%.

Термодинамические расчеты показали, что применение внешнего азотного цикла в исследованных установках для целей сжижения природного газа эффективнее циклов высокого давления.

Результаты сравнения расчетных данных, полученных по разработанной методике, показали хорошее согласование с экспериментальными данными, полученными на двух промышленных установках сжижения природного газа. Расхождение значений энергетических «потерь» по узлам установок не превысило 5%.

У2102128
Красноносова С.Д.
Исследование
малотоннажных установок

2102128

Возвратите книгу не позже
обозначенного здесь срока

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Красноносова С.Д. К анализу существующих установок ожижения природного газа малой производительности / А.М. Архаров, В.Ю. Семенов [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2010. № 7. С. 24–35. (1,386 п.л./0,462 п.л.)

2. Krasnonosova S. Entropic and Statistic Analysis of Low Capacity Plants for Liquid Natural Gas (LNG) Production / A. Arkharov, V. Semenov [и др.] // Proc. of the 11th Cryogenics IIR International Conference. 2010. С. 92–100. (1,04 п.л./ 0,462 п.л.)

3. Красноносова С.Д. Энтропийно-статистический анализ установок малой производительности для ожижения природного газа с содержанием метана 92% / А.М. Архаров, В.Ю. Семенов [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2012. № 4. С. 19–27. (1,04 п.л./0,347 п.л.)

4. Красноносова С.Д. Методология энтропийно-статистического анализа малотоннажных установок ожижения природного газа / А.М. Архаров, В.Ю. Семенов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2015. № 10. С. 12–16. (0,578 п.л./0,121 п.л.)

5. Красноносова С.Д. Энтропийно-статистический анализ установки ожижения природного газа с внешним азотным циклом охлаждения / А.М. Архаров, В.Ю. Семенов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2015. № 11. С. 3–9. (1,04 п.л./0,347 п.л.)

Подписано в печать: 10.01.16
Объем : 1,0 усл.п.л.
Тираж: 100 экз. Заказ № 516
Отпечатано в типографии «Реглет»
г. Москва, Ленинский проспект, д.2
(495) 978-66-63, www.reglet.ru