

УДК 621.593

И.Ф. Кузьменко*, В.А. Передельский, А.Л. Довбиш

ОАО «Криогенмаш», пр. Ленина, 67, г. Балашиха Московской области, РФ, 143907

*e-mail: kuzmenko@cryogenmash.ru

УСТАНОВКИ СЖИЖЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА БАЗЕ ДЕТАНДЕРНЫХ АЗОТНЫХ ЦИКЛОВ

Для сглаживания пиков потребления природного газа, а также организации сбыта сжиженного природного газа (СПГ) необходимо создание крупнотоннажных СПГ-установок. Предлагается такие установки для сжижения природного газа разрабатывать с использованием внешних криогенных азотных термодинамических циклов. Для повышения эффективности циклов целесообразно применять в них турбодетандер-компрессорные агрегаты (ТДКА). Рассмотрены различные технологические схемы СПГ-установок, в состав которых включены криогенные азотные установки с количеством ТДКА от одного до четырёх. Приводятся данные о предпочтительных диапазонах производительностей и ожидаемых удельных затратах энергии предлагаемых СПГ-установок в зависимости от их схем и количества применяемых ТДКА. Отмечается, что разработанные СПГ-установки незначительно уступают по удельным затратам энергии установкам, в которых используется либо более сложное построение, например, каскадные схемы, либо многокомпонентные рабочие вещества.

Ключевые слова: Криогенная техника. Воздухоразделительная установка. Азот. Азотный термодинамический цикл. Турбодетандер-компрессорный агрегат (ТДКА). Сжиженный природный газ (СПГ). Компрессор. Детандер. Надёжность. Удельные затраты энергии. Капитальные затраты.

I.F. Kuzmenko, V.A. Peredelskiy, A.L. Dovich

NATURAL GAS LIQUEFACTION UNITS ON THE BASE OF EXPANDER NITROGEN CYCLES

It is necessary to create large-capacity LNG-units for natural gas peaks consumption shaving and also to expand liquefied natural gas (LNG) marketing. It is proposed to create such natural gas liquefaction units with the use of outer nitrogen cryogenic thermodynamic cycles. It is necessary to use turboexpander-compressor sets (TECS) in them for maximizing cycles efficiency. Different technological schemes of LNG-units including nitrogen cryogenic units with TECS from one to four have been examined. Data about preferable capacity range and expected specific power consumption of produced LNG-units depending on their schemes and the amount of TECS has been stated. It is marked that developed LNG-units are less effective in specific power consumption than units that include more complex structure, for example, cascade schemes or multicomponent work substances.

Keywords: Cryogenic engineering. Air separation plant. Nitrogen. Nitrogen thermodynamic cycle. Turboexpander-compressor set (TECS). Liquefied natural gas (LNG). Compressor. Expander. Safety. Specific power consumption. Capital expenditure.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в России уделяется большое внимание вопросам сооружения крупнотоннажных установок для сжижения природного газа (СПГ-установок) с целью его сбыта как товарного продукта на внутреннем или внешнем рынках, а также покрытия пиков потребления.

В настоящей статье представлена информация о возможностях нашего предприятия в создании таких установок на базе имеющегося многолетнего опыта разработок и эксплуатации криогенных воздухоразде-

лительных установок (ВРУ) средней и высокой производительности.

За 60 лет специалисты предприятия спроектировали, изготовили и поставили более 600 ВРУ для металлургической, химической и других отраслей промышленности России, СНГ и более 40 зарубежных стран [1].

ВРУ создаются на базе современных схемных решений, а также совместного производства отдельных видов оборудования на основе долговременной кооперации и сотрудничества с ведущими зарубежными компаниями: «Sulzer AG» (Швейцария) — регуля-

ные насадки; «Chart Industries Inc.» (Висконсин, США), «Nordon Cryogenie» (Франция) — пластинчато-ребристые теплообменники (ПРТ); «Rockwell Automation Inc.» (США) — автоматизированные системы контроля и управления; «Cameron Compression Systems» (США) — компрессорные установки и др. [2].

Предприятием выпускаются высоконадёжные блоки комплексной очистки с современными холодильными машинами и турбодетандеры с дожимающими компрессорными ступенями и высокими КПД.

На рис. 1 показан блок разделения нашей самой крупной установки — КдАдАрж-100/50 с производительностью по перерабатываемому воздуху 500000 м³/ч. Габариты только блока разделения составляют 20×25×80 м. Приняты обозначения: *D* — диаметр; *H* — высота.

Используемые в нашем оборудовании технические решения подтвердили высокую их эффективность и надёжность в ходе эксплуатации ВРУ, а также ожижительных установок.

2. АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СПГ-УСТАНОВОК С РАЗЛИЧНЫМИ КРИОГЕННЫМИ АЗОТНЫМИ ЦИКЛАМИ

Накопленный предприятием опыт может использоваться при создании СПГ-установок средней и высокой производительности [3]. Прежде всего, это касается построения их схем на основе внешних криогенных азотных детандерных циклов [4,5].

На рис. 2 представлена обобщённая структурная схема подготовки и ожижения природного газа (ПГ).



Рис. 2. Обобщённая структурная схема подготовки и ожижения природного газа

В общем случае природный газ проходит блоки очистки от примесей и осушки, блок предварительного охлаждения, выделения при необходимости ШФЛУ (широкой фракции лёгких углеводородов) и блок ожижения, из которого СПГ поступает на хранение и отгрузку потребителям.

Для систем ожижения СПГ-установок производительностью более 3 т/ч нами разработаны схемы с азотным криогенным циклом с одним или несколькими детандерами и с предварительным охлаждением или же без него.

Расчётный анализ различных вариантов детандерных азотных термодинамических циклов для ожижения природного газа показал, что минимальные удельные энергозатраты обеспечивает либо цикл с двумя детандерными ступенями на различных температурных уровнях, либо цикл с одной детандерной ступенью и предварительным охлаждением на температурном уровне $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Производимая в детандерах работа может использоваться полезно на дожатие прямого потока азота или для выработки электроэнергии.

Технологическая схема СПГ-установки, реализующей цикл с одной ступенью турбодетандер-компрессорного агрегата (ТДКА), представлена на рис. 3.

Азот среднего давления (6-9 МПа) после циркуляционного компрессора дожимается в компрессорной ступени ТДКА и после охлаждения в конечном холодильнике, рекуперативном теплообменнике ТО и холодильной машине ХМ направляется в детандерную ступень. Холод, выработанный при расширении азота в детандерной ступени, охлаждает природный газ в теплообменнике ТО. После дросселирования предварительно охлаждённый и частично охваченный природный газ сливается в систему хранения СПГ. На одну из таких установок подписан контракт на её поставку в Китай. По ряду других проектов ведутся предконтрактные переговоры.

Применение схем с ТДКА позволяет организовать ожижение азотсодержащих природных газов с их одновременной деазотизацией, что практически невозможно в случаях использования дроссельных циклов высокого давления. Одна из таких схем приведена на рис. 4.

С ростом производительности требования к энергетической эффективности СПГ-установок возрастают. В связи с этим становится це-

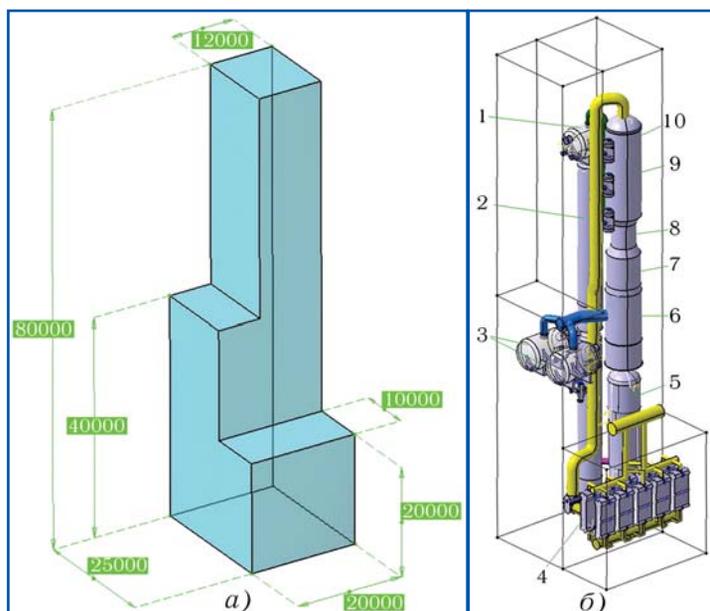


Рис. 1. Внешний вид блока разделения (а) и его внутреннее устройство (б) с размерами в мм: 1 — конденсатор технического аргона; 2 — колонна сырого аргона ($D=3800$); 3 — основные конденсаторы; 4 — ПРТ (каждый — $5800 \times 3300 \times 1400$); 5-8 — нижняя колонна ($H=28000$; 5 — $D=4500$; 6 — $D=5800$; 7 — $D=5200$; 8 — $D=3800$); 9,10 — верхняя колонна ($H=40000$; $D=5200$)

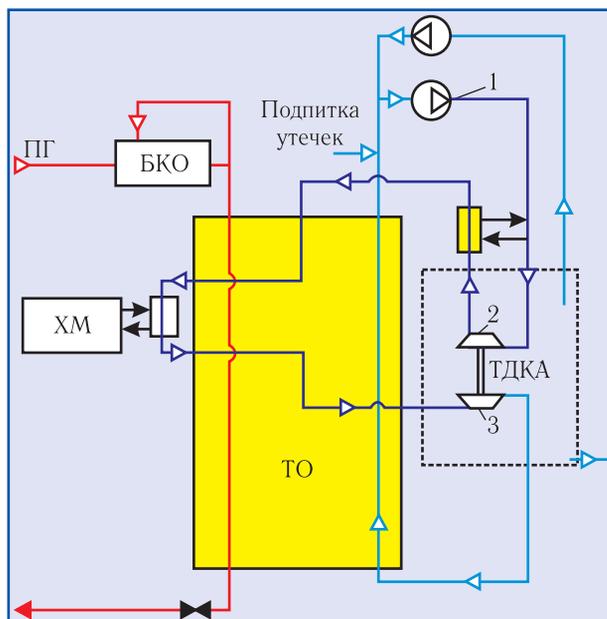


Рис. 3. Схема СПГ-установки с криогенной азотной установкой с ТДКА: 1 — азотный циркуляционный компрессор; 2, 3 — компрессорная и детандерная ступени ТДКА, соответственно; БКО — блок комплексной очистки и осушки природного газа; ХМ — холодильная машина; ТО — рекуперативный теплообменник; — природный газ; — азот высокого давления; — азот низкого давления

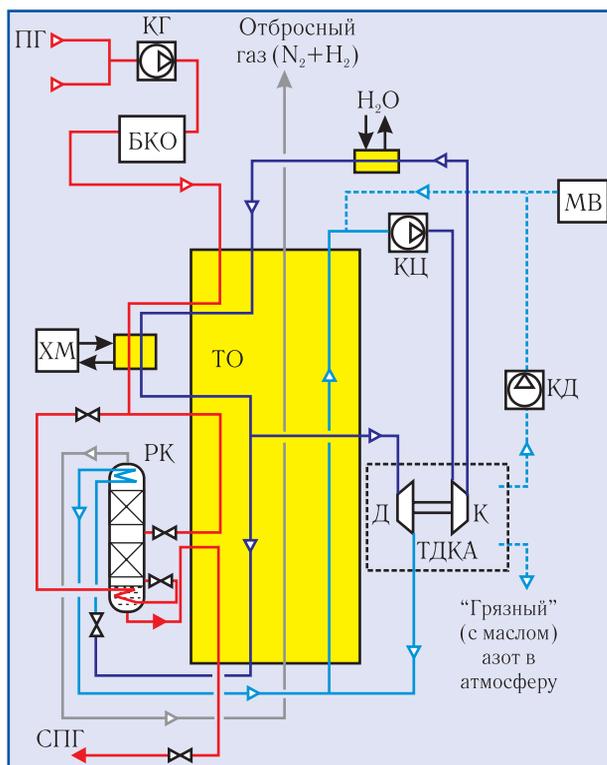


Рис. 4. Технологическая схема СПГ-установки, в которой используется ПГ, содержащий значительное количество азота: КГ, КЦ, КД — компрессоры для подачи природного газа, азотные, циркуляционный и дожимающий; ТДКА — турбодетандер-компрессорный агрегат; БКО — блок комплексной очистки и осушки ПГ; ХМ — холодильная машина; ТО — рекуперативный теплообменник; РК — ректификационная колонна

лесообразным увеличение числа детандерных ступеней. Так, в ОАО «Криогенмаш» была разработана схема установки с двумя детандерами для производства холода на разных температурных уровнях и трёхступенчатым пропановым предварительным охлаждением (см. рис. 5). Эта установка будет характеризоваться удельными энергозатратами, весьма близкими к показателям лучших установок, созданных на основе смесевых циклов.

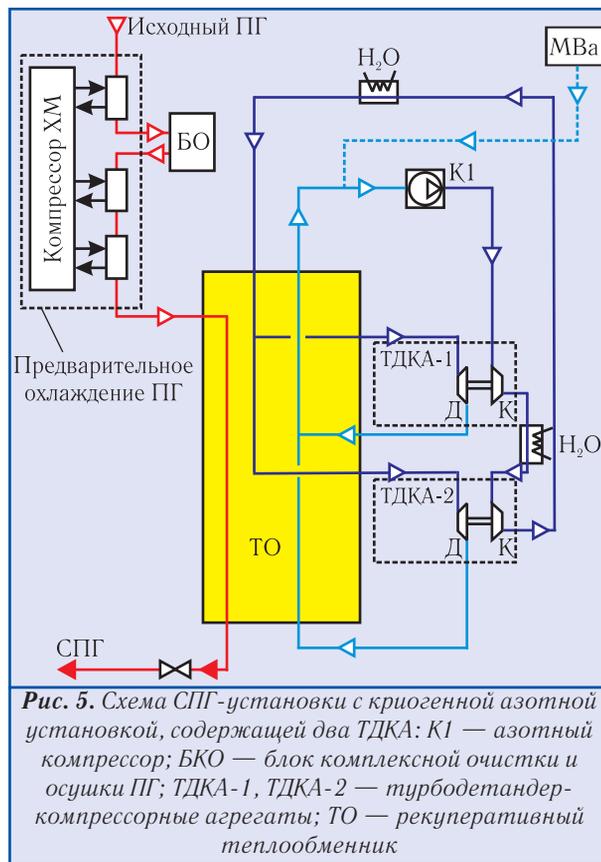


Рис. 5. Схема СПГ-установки с криогенной азотной установкой, содержащей два ТДКА: К1 — азотный компрессор; БКО — блок комплексной очистки и осушки ПГ; ТДКА-1, ТДКА-2 — турбодетандер-компрессорные агрегаты; ТО — рекуперативный теплообменник

Для создания СПГ-установок больших производительностей нами рассматривается использование схем с тремя и четырьмя ТДКА. Так, на рис. 6 представлена расчётная схема установки с четырьмя ТДКА и конечным жидкостным детандером на СПГ.

Табл. 1 даёт представление об энергетических характеристиках СПГ-установок на базе схем с двумя ТДКА на разных температурных уровнях и трёхступенчатом пропановым предварительным охлаждением (см. рис. 5), а также с четырьмя ТДКА и конечным жидкостным детандером на СПГ (рис. 6) с условной производительностью 100 т СПГ/ч. Данная информация взята из проектов установок, разработанных для ОАО «Газпром».

В ходе расчётов использовались следующие показатели эффективности компрессорных и расширительных машин: адиабатные КПД компрессоров азотных циркуляционных, компрессора пропановой холодильной машины и дожимающего компрессора ПГ — 80 %; температуры газов после межступенчатых и конечных холодильников — 40 °С; адиабатные КПД детандерных ступеней ТДКА — 85 %, компрес-

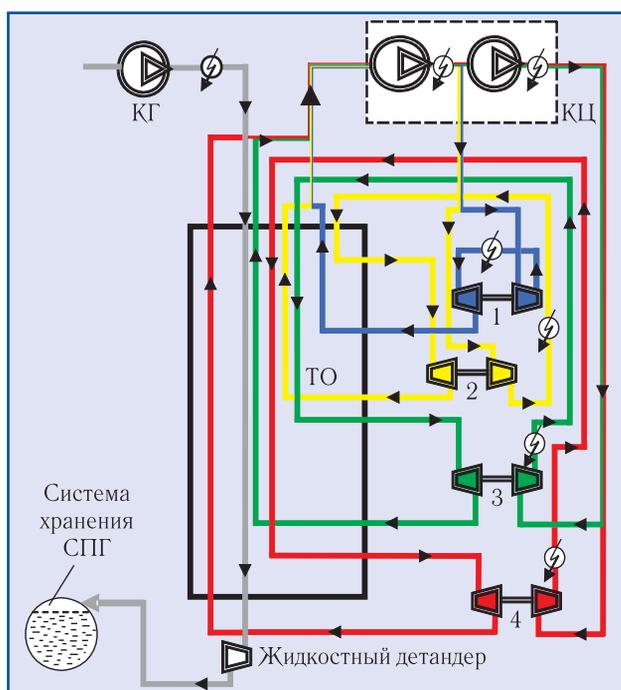


Рис. 6. Схема СПГ-установки с включённой в неё криогенной азотной установкой, содержащей четыре ТДКА: КГ, КЦ — газовый и азотный циркуляционный компрессор двухступенчатого сжатия; 1-4 — четыре ТДКА; ТО — пластинчато-ребристый рекуперативный теплообменник; — линия ПГ; — линия азота верхнего контура; — линия азота нижнего контура; — линия азота 228-310 К; — линия азота 213-310 К; — линия азота 152-310 К; — линия азота 110-310 К

сорных ступеней ТДКА — 75 %; адиабатный КПД жидкостного детандера ПГ — 75 %.

В табл. 2 приводится сопоставление энергетических показателей различных циклов СПГ-установок. Из указанных данных отчетливо видна перспектив-

Таблица 1. Энергетические характеристики СПГ-установок с внешним криогенным азотным циклом с двумя и тремя ТДКА

Наименование параметра	Схема 1 (рис. 5)	Схема 2 (рис. 6)
Производительность СПГ-установки, т/ч	100	100
Составляющие потребляемой мощности, кВт:		
— азотные циркуляционные компрессоры	37260	43400
— пропановая холодильная машина	3540	—
— дожимающий компрессор ПГ	—	2020
Мощность, вырабатываемая жидкостным детандером	—	333
Суммарная потребляемая мощность на ожижение, кВт	40800	45087
Удельные затраты на ожижение, кВт·ч/кг СПГ	0,408	0,451

Таблица 2. Сравнение показателей СПГ-установок, создаваемых на основе различных циклов

Наименование цикла	Диапазон производительности, т/ч	Расход энергии кВт·ч/кг
Дроссельно-эжекторный высокого давления	1-5	0,7
Азотный с одним ТДКА и холодильной машиной	5-15	0,6-0,7
Азотный с двумя ТДКА и пропановым трёхступенчатым охлаждением	20-100	0,39-0,42
С 4-мя детандерами без предварительного охлаждения	50-250	0,42-0,47
Смесевой или каскадно-смесевой с несколькими ступенями охлаждения	400-600	0,33-0,38

ность азотных криогенных циклов с ТДКА. СПГ-установки большой производительности на основе детандерных циклов, как следует из табл. 2, по удельным затратам вплотную приближаются к показателям эффективности лучших смесевых циклов.

Качественное сравнение характеристик внешних криогенных азотных циклов с ТДКА с характеристиками традиционных высокоэффективных смесевых и каскадных циклов можно выполнить с помощью данных табл. 3. По всем показателям криогенные азотные циклы имеют преимущества перед смесевыми и каскадными за исключением удельного расхода энергии, который у них оказывается несколько выше. Хотя следует отметить, что этот показатель компенсируется более низкими капитальными затратами, в том числе за счёт возможности использования не взрывозащищённого оборудования обычного исполнения.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отечественное криогенное машиностроение имеет большой опыт разработок эффективного технологического оборудования крупных криогенных систем и установок и, прежде всего, ВРУ на базе детандерных циклов. Их эксплуатация в течение многих лет подтвердила правильность применяемых схемных и конструкторских решений.

Российская газовая промышленность, учитывая международные тенденции, может с успехом начать внедрение разрабатываемых нами крупнотоннажных СПГ-установок на базе внешних криогенных азотных циклов с ТДКА.

Отметим ряд основных преимуществ таких установок: удельные энергозатраты в них на ожижение СПГ — 0,38-0,45 кВт·ч/кг; удельные капитальные затраты на технологическое оборудование оказываются в 2-3 раза ниже, чем у смесевых циклов, в том числе в результате применения оборудования обычного исполнения; широкой может быть область производительностей рассматриваемых СПГ-установок от средних (от 3 т/ч СПГ) до больших (до 250 т/ч СПГ) с возможностью очистки от азота ожижаемого потока газа; им свойственны высокие надёжность и эффективность в эксплуатации (из опыта создания и результатов работы у потребителей ВРУ); возможно получение

Таблица 3. Качественные показатели различных типов СПГ-установок

Критерии сравнения	Виды холодильных циклов		
	каскадные	смесевые	азотные с ТДКА
Степень отработки решений	высокая	высокая	высокая
Потребность в площадях	высокая	средняя	низкая
Опасность хранения хладагента	да	да	нет
Чувствительность к качке	средняя	средняя	низкая
Простота эксплуатации	средняя	средняя	высокая
Простота пуска-остановки	средняя	низкая	высокая
Адаптация к составу газа	высокая	средняя	высокая
Общие капитальные затраты	высокие	средние	низкая
Удельные затраты энергии	низкие	низкие	незначительно выше

ние в этих СПГ-установках переохлажденного СПГ на 2-5 °С по отношению к равновесному атмосферному давлению, что позволяет использовать для хранения СПГ крупные ёмкости с давлением хранения 15-50 КПа (изб.) без дренажа паров; применение в установках компактных пластинчато-ребристых теплообменников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рубцов А.И. История создания, этапы становления,

состояние и перспективы развития ОАО «Криогенмаш»// Технические газы. — 2009. — № 6. — С. 2-7.

2. Лавренченко Г.К. Современные тенденции и перспективы развития лидера криогенного машиностроения и производителя... криопродуктов// Технические газы. — 2007. — № 3. — С. 10-18.

3. Кузьменко И.Ф. Тенденции развития СПГ-установок средней производительности для организации газоснабжения//

Технические газы. — 2008. — № 3. — С. 36-42.

4. Расчетно-теоретическое исследование и разработка принципиальных схем установок СПГ средней производительности на базе азотных детандерных циклов: Отчёт по НИР № 2.43/ ОАО «Криогенмаш»; Руководитель работы В.А. Передельский; Отв. исполнитель А.Л. Довбиш, 2008. — 31 с.

5. Термодинамическая эффективность установок СПГ с различными холодильными циклами на основе расчетного анализа в пакете HYSYS: Отчёт по НИР № 4168/ ОАО «Криогенмаш»; Руководитель работы А.И. Ляпин; Отв. исполнитель А.Л. Довбиш, 2008. — 37 с.



FRUNZE
ОСНОВАНО В 1896 ГОДУ

20 лет на рынке АГНКС, лучшее соотношение цена - качество!

- Выпущено 200 станций 17 модификаций с общим количеством компрессоров 480 шт.;
- Производительность от 125 до 700 заправок в сутки;
- Диапазон входного давления от 0,5 до 17 атм;
- Полная комплектация по выбору Заказчика;
- Разные системы осушки, в том числе энергосберегающая короткоцикловая;
- Изготовление в "северном" исполнении;
- Натурные испытания на заводских стендах;
- Поставка в полной заводской готовности и минимальный срок ввода в эксплуатацию;
- Строительство объектов "под ключ";
- Пуско-наладка, гарантийное и послегарантийное обслуживание, обучение персонала.



Метан

Постройте выгодный и надежный бизнес
с АГНКС производства ОАО "Сумское НПО им.М.В.Фрунзе"

Украина, 40004, г.Сумы, ул.Горького, 58
www.frunze.com.ua, snpo@frunze.com.ua

управление продаж:
т. +38 0542 78 84 64, ф. +38 0542 22 63 62

отдел маркетинга:
т. +38 0542 78 05 71

Представительство в России г.Москва
т. +7 495 745 88 30, ф. +7 495 745 88 31