

Б.Д. Краковский, В.А. Мартынов, О.М. Попов, В.Н. Удут

ОАО «НПО Гелиймаш», ул. Автозаводская, 25, г. Москва, РФ, 115280

e-mail: gmashinf@ru.ru

П.В. Кузнецов, О.Л. Мишин

ООО «Газпром Трансгаз Екатеринбург», ул. К. Цеткин, 14, г. Екатеринбург, РФ, 620000

e-mail: energogas@km.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СЖИЖЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В УСТАНОВКАХ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Приводятся расчётные и проектные данные о технико-экономических параметрах ожижителей природного газа малой и средней производительности. Представлены параметры установок сжижения природного газа (СПГ) производительностью 1 и 3 т/ч для работы в условиях газораспределительных станций и производительностью 1 т/ч применительно к условиям, характерным для автомобильных газонаполнительных компрессорных станций. Сообщается об экономических показателях более крупной СПГ-установки. Для этой установки более значительными являются затраты на транспортирование, хранение и регазификацию СПГ.

Ключевые слова: Сжиженный природный газ (СПГ). Газораспределительная станция. Автомобильная газонаполнительная компрессорная станция. СПГ-установка. Компрессор. Турбодетандер.

B.D. Krakovsky, V.A. Martynov, O.M. Popov, V.N. Udut, P.V. Kuznetsov, O.L. Mishin

MODERN TECHNOLOGIES OF LIQUEFACTION OF NATURAL GAS IN PLANTS OF SMALL AND AVERAGE PRODUCTIVITY

The settlement and design data on technical and economic parameters for liquefiers of natural gas of small and average productivity cited. Parameters of plants of liquefied natural gas (LNG) by productivity by 1 and 3 t/h for work in conditions of gas-distributing stations and productivity by 1 t/h with reference to conditions, characteristic for automobile gas-filling compressor stations are submitted. It is informed on economic parameters of larger LNG-plant. For this plant the expenses for transportation, storage and regasification of LNG are more significant.

Keywords: Liquefied natural gas (LNG). Gas-distributing station. Automobile gas-filling compressor station. LNG-plant. Compressor. Turbo-expander.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время имеются обширные данные о технологиях получения сжиженного природного газа (СПГ) [1-6]. Проведём оценку показателей установок сжижения газа, создаваемых на основе следующих циклов: со сжатием в компрессоре и расширением газа в детандере (рис. 1,а); с расширением газа в детандере и использованием вместо компрессора разности давлений между магистральным и распределительным трубопроводами на газораспределительной станции (ГРС) (рис. 1,б); со сжатием в компрессоре, промежуточным охлаждением природного газа (ПГ) до температуры -40 °С внешним источником холода и дросселированием (рис. 1,в); с внешним охлаждением потока ПГ смесью хладагентов (рис. 1,г).

В указанных основных технологических схемах

возможно использование предварительного охлаждения с помощью пропановой ХМ.

СПГ-установка на базе цикла, представленного на рис. 1,в, реализована в ООО «Лентрансгаз» [1] и в НПФ «Экип» (г. Москва).

Для сравнения показателей различных циклов проведены расчёты процессов сжижения ПГ при близких составах газа, эффективности теплообменных аппаратов и машин. Они выполнены с помощью специальной программы расчёта свойств углеводородных смесей, разработанной во ВНИИГаз.

В рассматриваемых циклах используются процессы: сжатие при температуре окружающей среды, охлаждение сжатого потока, его расширение в дроссельном вентиле с почти полным сжижением потока ПГ. Охлаждение осуществляют в рекуперативных теплообменниках, где холод обратного потока переда-

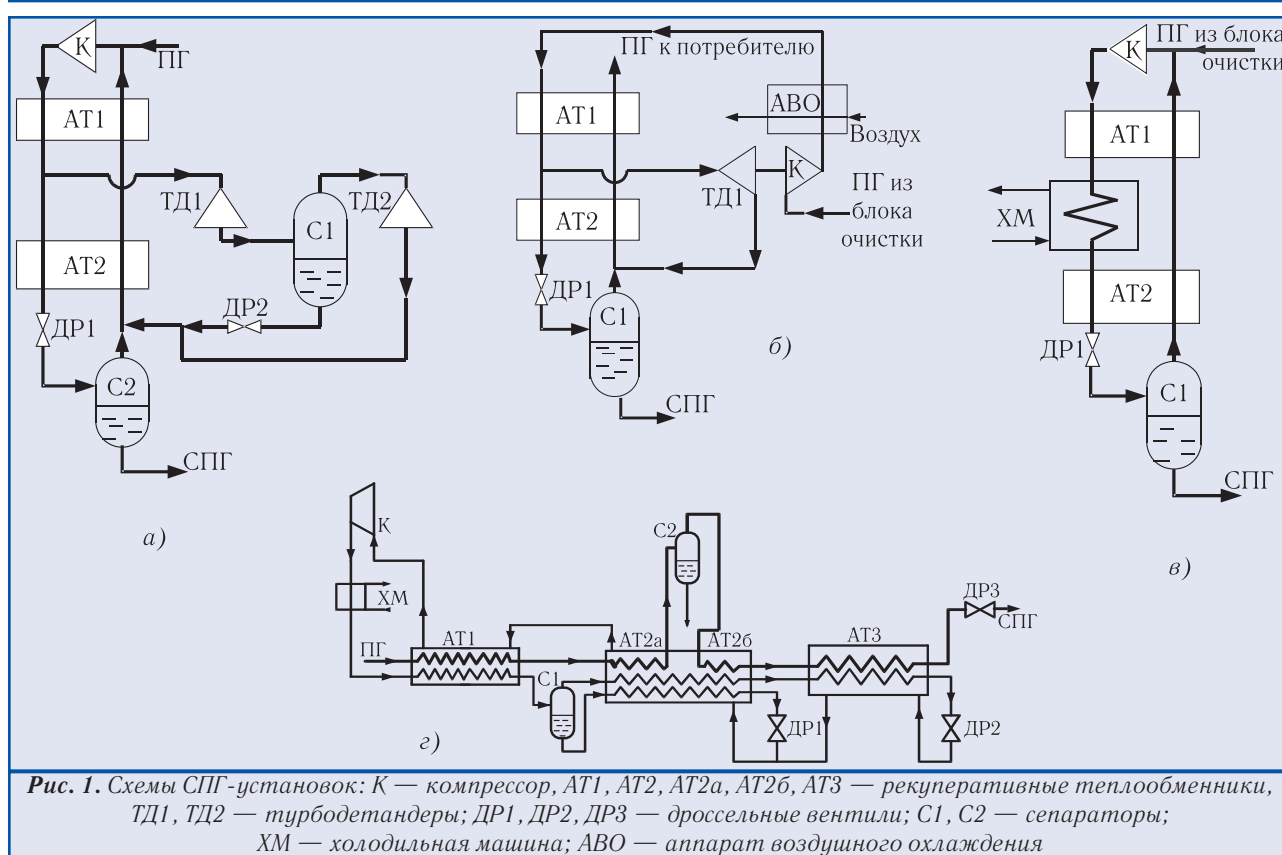


Рис. 1. Схемы СПГ-установок: К — компрессор, АТ1, АТ2, АТ2а, АТ2б, АТ3 — рекуперативные теплообменники, ТД1, ТД2 — турбодетандеры; ДР1, ДР2, ДР3 — дроссельные вентили; С1, С2 — сепараторы; ХМ — холодильная машина; АВО — аппарат воздушного охлаждения

ётся прямому потоку ПГ. В качестве обратного потока используется расширенный в детандере поток ПГ (рисунки 1,а и 1,б) и паровая фаза после расширения в дроссельном вентиле (рис. 1,в) или жидкостный поток смеси хладагентов (рис. 1,г)

В рассматриваемых схемах установок, кроме последней (рис. 1,г), теплоёмкость обратного потока существенно меньше теплоёмкости прямого. Поэтому в теплообменниках возникает большая (до 25 К) разность температур между проходящими в них потоками. Это приводит к существенным потерям от необратимости процессов и повышенным затратам энергии. В цикле схемы, изображённой на рис. 1,г, эта разность температур уменьшается до 4-7 К с одновременным соответствующим снижением затрат энергии.

В табл. 1 приведено сравнение параметров указанных схем, рекомендованы области их применения. Сообщаются полезные для технико-экономических оценок сведения об удельной массе теплообменных аппаратов, используемых в схемах рис. 1. Они дают представление об отношении массы аппаратов к часовой производительности установки. Имеются также данные о коэффициентах сжижения x , как отношении количества СПГ к количеству перерабатываемого потока ПГ или циркулирующего в цикле хладагента.

Существенное отличие затрат энергии на сжижение в схеме установки, изображённой на рис. 1,а также увеличение удельной массы теплообменных аппаратов объясняется приведёнными выше расхожде-

ниями в движущих силах процесса теплообмена.

Таблица 1. Параметры установок, выполненных по различным схемам

Производительность, т/ч	Коэффициент сжижения x	Удельный расход энергии, кВт·ч/кг	Масса теплообменников, отнесённая к кг/ч СПГ
30-100 и более	Холодильный цикл на смесях с пропановым охлаждением, $x=0,35$	0,45-0,50	—
10-30	Холодильный цикл на смесях, $x=0,30-0,27$	0,55-0,70	3,5-4,2
10-20	С компрессором, турбодетандером и пропановым охлаждением, $x=0,22-0,25$	0,75-0,90	1,4-1,8
3-10	С компрессором и турбодетандером, $x=0,20-0,25$	0,8-1,0	1,2-1,5
1-2	С компрессором в.д. и холодильной машиной, $x=0,35-0,40$	0,9-1,1	0,9-1,1
1-3	С турбодетандером на ГРС, $x=0,10-0,15$	—	1,4-2,0

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОЖИЖИТЕЛЕЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Специалистами ОАО «НПО Гелиймаш» разработано несколько типов ожигителей природного газа (см. таблицы 2 и 3).

Таблица 2. Технические параметры ОПГ-1К-22-2

Наименование параметра	Значение
Производительность по СПГ, кг/ч, не менее	1000
Давление ПГ на входе, МПа	от 1,2 до 1,8
Давление несжижаемого природного газа (возврат из ОПГ), не выше, МПа	2
Давление СПГ в криогенной ёмкости, МПа	от 0,13 до 0,30
Потребляемая электроэнергия:	
– напряжение, В	220/380
– частота, Гц	50±1
– мощность, кВт, не более	1150

Таблица 3. Технические параметры ОПГ-1-3,5-0,6

Наименование параметра	Значение
Производительность по СПГ, кг/ч, не менее	1000
Давление ПГ на входе, МПа	от 3,5 до 4,4
Давление ПГ на выходе из ОПГ, МПа	от 0,55 до 0,90
Потребляемая электроэнергия:	
– напряжение, В	220/380
– частота, Гц	50±1
– мощность, кВт, не более	30

Техническая характеристика ОПГ-1К-22-2

Ожижитель ОПГ-1К-22-2 основан на цикле с компрессором высокого давления и холодильной машиной (см. рис. 1,в). Рабочая среда на входе — газ горючий природный по ГОСТ 5542-87. На выходе из установки — газ горючий природный сжиженный по ГОСТ 20448-90. Показатели указанной СПГ-установки приведены в табл. 2.

Ожижитель природного газа ОПГ-1-3,5-0,6

Ожижитель ОПГ-1-3,5-0,6 реализует цикл среднего давления с детандером (см. рис. 1,б). Он предназначен для сжижения природного газа на ГРС и слива СПГ в криогенную ёмкость. Основные его показатели сведены в табл. 3.

Разработан и изготовлен ожижитель природного газа ОПГ-3-3-0,6. Он аналогичен описанному выше и отличается от него производительностью и схемой блока очистки. Сейчас завершается его монтаж. Его будут использовать в составе станции снабжения топливом опытного магистрального тепловоза.

Для оценки массогабаритных показателей основного оборудования этого ожижителя можно ориентироваться на данные табл. 4.

Теплообменные аппараты представляют собой витые многослойные поперечноточные аппараты из

Таблица 4. Характеристики аппаратов ОПГ-3-3-0,6

Наименование	Габариты, мм (L×W×H) или (D×L)	Масса, кг	Количество, шт.
Аппарат теплообменный предварительный АТ1	∅1200×2400	3700	1
Аппарат теплообменный основной АТ2	∅1000×1900	1000	1
Охладитель масла	∅2500×1600	1550	1
Нагреватель природного газа	1000×1000×5400	1500	1
Охладитель природного газа АВО	∅2100×2000	2200	1

труб, оребренных проволокой, со статистически однородной компактной структурой. Оребренные проволокой трубы навиты в одном направлении на цилиндрический сердечник и образуют намотку, которая заключена в обечайку. Концы труб заделаны в трубные решетки. На рис. 2 представлена конструкция криогенного блока.



Рис. 2. Криогенный блок ожижителя ОПГ-3-3-0,6

Таблица 5. Параметры агрегата турбодетандер-турбокомпрессор

Параметр	Турбодетандер	Турбокомпрессор
Давление на входе, МПа	3,6	3,1
Давление на выходе, МПа	0,76	3,7
Температура на входе, К	218	300
Температура на выходе, К	156	321
Диаметр колеса, мм	140	125
Частота вращения, об/мин	40500	
Мощность, кВт	590	375

Ответственным элементом ожижителя ПГ является агрегат, представляющий собой комбинацию турбодетандера с турбокомпрессором, который имеет общую ходовую часть, размещённую в едином корпусе.

Турбодетандер и турбокомпрессор имеют рабочие колеса радиально-осевого типа, которые консольно закреплены на противоположных концах общего вала. Энергия, выделяю-

щаяся при расширении газа в проточной части турбодетандера, расходуется: на сжатие газа в турбокомпрессоре (~65 % энергии); на компенсацию потерь трения в подшипниках (оставшаяся часть энергии).

Общий вал турбодетандера и турбокомпрессора вращается в гидродинамических опорах с масляной смазкой, обеспечивающих надёжную работу ротора. На фото 3 — общий вид смонтированного агрегата после завершения процесса его изготовления.



Фото 3. Аппарат турбодетандер-турбокомпрессор ожижителя ОПГ-3-3-0,6

3. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТА ОЖИЖИТЕЛЯ ПГ

На основании проведённых расчётных исследований определены параметры ожижителя природного газа (см. табл. 6) с годовой производительностью 100 тыс. т СПГ.

С учётом характеристик компрессора, предложенного по нашему запросу фирмой «Thermodyn» (филиал компании «Дженерал Электрик»), можно, в зависимости от указанных ранее схем, получить от 9 до 16,5 т/ч СПГ. Показатели нескольких СПГ-установок указаны в табл. 7.

Как следует из табл. 7, удельные затраты энергии в СПГ-установках, построенных по разным технологическим схемам, отличаются почти в два раза. С другой стороны, усложнение состава оборудования и, как следствие, снижение в этом случае надёжности работы СПГ-установки приводят к увеличению капитальных и эксплуатационных затрат. Решение о применении той или иной схемы принимается на основании конкретных условий. Например, если перерабатываемый газ «жирный», то целесообразно использовать схему на смесях. В этом случае доступны компоненты сме-

си (этан, пропан и др.) в необходимых количествах для формирования многокомпонентного рабочего тела и обеспечения постоянства его состава и расхода.

Данные о стоимости, конечно, являются несколько приближенными. Вместе с тем, из табл. 6 следует, что стоимость системы хранения, транспортирования СПГ и его регазификации соизмерима со стоимостью ожижителя.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные сведения о технических и стоимостных показателях оборудования для получения и

Таблица 6. Техничко-экономические показатели производства 100 тыс. т СПГ в год

Наименование показателя	Значение
Объём производства СПГ	100 тыс. т в год (12,5 т/ч)
Капитальные затраты, долл. США:	
— ожижитель	14 млн.
— система хранения с 5-ью стационарными ёмкостями 130/6 (130 м ³)	1,25 млн.
— строительство	5 млн.
— контейнеры-цистерны КЦМ 35/0,6 для транспортирования СПГ 36 шт. ¹⁾	3,24 млн.
— контейнеры-цистерны КЦМ 35/0,6 для транспортирования СПГ 180 шт. ²⁾	16,2 млн.
Энергетические затраты:	
— потребляемая мощность, кВт	11000
— расход газа на газовый привод, м ³ /кг СПГ	0,14
Годовые эксплуатационные затраты на ожижение, долл. США	7,6
Себестоимость ожижения, долл. США на 1 т	76
Удельные эксплуатационные затраты на транспортирование, долл. США на 1 т СПГ ³⁾	32
Себестоимость ожижения и доставки СПГ (с транспортными расходами и контейнерами 36/180 шт.), долл. США на 1 т СПГ	114/139
Стоимость СПГ (без учёта затрат на транспортирование), обеспечивающая окупаемость проекта, долл. США на 1 т СПГ	
— за 5 лет	140
— за 8 лет	115
— за 10 лет	108
Стоимость СПГ (с учётом затрат на транспортирование), обеспечивающая окупаемость проекта, долл. США на 1 т СПГ	
36 контейнеров ¹⁾ :	
— за 5 лет	180
— за 8 лет	160
— за 10 лет	150
180 контейнеров ²⁾ :	
— за 5 лет	250
— за 8 лет	220
— за 10 лет	205

Примечания: ¹⁾ Цикл оборота 2 сут.; ²⁾ цикл оборота 10 сут.; ³⁾ среднее расстояние до потребителя — 400 км.

Таблица 7. Параметры ожижителя средней производительности, выполненного по различным циклам

Схема охлаждения	Поток через компрессор, кг/ч		Мощность компрессора, МВт		Масса теплообменника, т	Кол-во компрессоров	Детандерный поток, кг/ч	Уд. расход энергии, кВт·ч/кг	Производительность, т/ч
	Основной	Пропановый	Основной	Пропановый					
Холодильный цикл на смеси	50000	—	9	—	58	1	—	0,55	16,5
Детандерная	50000	—	10	—	12	1	38500	1,07	9,3
Детандерная с пропановым охлаждением	50000	32300	8,6	1,9	20	1 основн. 1 пропан.	34500	0,84	12,5

использования СПГ могут служить основой для проектных проработок конкретных установок ожижения ПГ. Планируемые испытания сооружаемой сейчас СПГ-установки снабжения топливом опытного магистрального тепловоза с производительностью 3 т/ч СПГ дадут достоверные сведения по рассматриваемому вопросу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будзуляк Б., Сердюков С., Пронин Е. Малотоннажное производство сжиженного газа - самостоятельный вид деятельности// Автогазозаправочный комплекс + Альтернативное топливо. — 2005. — № 6. — С. 38-44.

2. Горбачёв С. Эффективность технологий производства СПГ на АГНКС// Автогазозаправочный комплекс + Альтернативное топливо. — 2005. — № 2. — С. 42-44.

3. Liquefied natural gas. Linde presentation «Experience and Technology», March 2005, 120 p.

4. Краковский Б.Д., Попов О.М., Удут В.Н. Выбор схемы ожижителя природного газа// Холодильная техника. — 1999. — № 9. — С. 26-28.

5. Natural gas liquefier/ В.Д. Krakovsky, V.A. Martynov, O.M. Popov at al// Proc. of the 8th Cryogenics Conference. — Praha, 2004. — P. 203-209.

6. Саркисян В., Бучнев О. Комплексное использование СПГ в агропромышленном комплексе — основа подьёма сельского хозяйства// Автогазозаправочный комплекс + Альтернативное топливо. — 2006. — № 4. — С. 42-46.

Уважаемые рекламодатели!
Ваша реклама в наших журналах – самый кратчайший и надежный путь на российский холодильный рынок!

Dear advertisers!
Your advertisement in our magazines is the shortest and most reliable way to Russian refrigeration market!

Издательский дом
Холодильная техника
Выпускает журналы:

ЖУРНАЛЫ РАСПРОСТРАНЯЮТСЯ
✓ По подписке – в России, странах СНГ, за рубежом.
✓ Доставляются в органы законодательной и исполнительной власти России.
✓ Направляются на конгрессы, конференции, семинары, выставки.

THE MAGAZINES ARE DISTRIBUTED
✓ On a subscription basis – in Russia, countries of CIS, foreign countries.
✓ Delivered to the State and Governments departments of Russia.
✓ Distributed – during congresses, conferences, seminars, exhibitions.

ПОДПИСКА

	по каталогу «Еврей и журнал» Агентства «Роспечать»		по объединенному каталогу «Пресса России» («Еврей» каталог)		по каталогу российской прессы «Почта России»
	Иркутск	Иркутск	Иркутск	Иркутск	
на полугодие	на год	на полугодие	на полугодие		
ХТ	71048	71656	27918	12545	
МБП	48610	48611	88211	12547	
МАХ	48551	79889	87324	12548	

АДРЕС ИЗДАТЕЛЬСТВА:
Россия, 107045, Москва, Уланский пер., д. 21, стр. 2, оф. 1
Russia, 107045, Moscow, Ulansky per., 21, b. 2, of. 1
Тел.: (495) 607-2396, 607-2426, 607-1145, Тел./факс: (495) 607-2066
E-mail: holodteh@ropnet.ru
http://www.holodteh.ru