

УДК 621.593

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

ОАО «Криогенмаш», просп. Ленина, 67, г. Балашиха Московской обл., РФ, 143907

*e-mail: ivan_kouzmenko@yahoo.com

НАУЧНО-КОНСТРУКТОРСКАЯ БАЗА, ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА ОАО «КРИОГЕНМАШ» — СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ СПГ-ОБОРУДОВАНИЯ

Эффективные и надёжные СПГ-установки производит компания «Криогенмаш» — лидер российского криогенного машиностроения. В установках малой производительности применяется простой холодильный цикл высокого давления сжижаемого природного газа. В них используется внешнее охлаждение; вместо дросселя применяются эжекторы. Более десяти таких СПГ-установок для получения 1,5; 2,5 и 3 т/ч продукта поставлены компанией в Китай. Удельный расход энергии в них — 0,616 ... 0,753 кВтч/кг СПГ. В СПГ-установках средней производительности компания намерена использовать для ожижения природного газа эффективные внешние азотные холодильные циклы с несколькими турбодетандер-компрессорными агрегатами. Компания разработала СПГ-установки средней производительности для получения от 7 до 100 т/ч СПГ. Удельный расход энергии в них ожидается на уровне 0,45-0,49 кВтч/кг СПГ. Компания производит эффективное криогенное оборудование для инфраструктуры распределения и использования СПГ. К ним можно отнести резервуары хранения СПГ ёмкостью от 5 до 250 м³; полуприцеп - цистерну вместимостью 30 м³ СПГ. Компания располагает достаточной научно-конструкторской и производственной базой для изготовления современного криогенного оборудования, предназначенного для внедрения его в различные СПГ-технологии.

Ключевые слова: Сжиженный природный газ (СПГ). Холодильный цикл высокого давления. Дроссельно-эжекторная ступень. Удельный расход энергии на получение СПГ. Детандерный азотный цикл. Детандерная ступень. Турбодетандер. Теплообменник. Диаграмма Q-T. Потери от необратимости теплообмена.

I.F. Kuzmenko, A.L. Dovich, K.V. Bezrukov, V.A. Peredelsky**SCIENTIFIC AND ENGINEERING BASE, DEVELOPMENT AND PRODUCTION EXPERIENCE OF «CRYOGENMASH» — IMPROVEMENT LNG-EQUIPMENT**

Efficient and reliable LNG-installations are manufactured by company «Cryogenmash» — leader of Russian cryogenic engineering. In the small productivity installations is used a simple refrigeration cycle of high pressure liquefied natural gas. In them external cooling are carried out and ejectors are used instead of throttle. For more than ten of such LNG-installations to obtain 1,5; 2,5 and 3 t/h of product by company was supplied to China. The specific consumption of energy in them — 0,616 ... 0,753 kWh/kg of LNG. At the LNG installations of average production capacity the company intends to use for natural gas liquefaction the effective external nitrogen cooling cycles with several turbo-expander-compressor units. The company has developed LNG installations of average capacity to obtain from 7 to 100 t/h of LNG. The specific consumption of the energy in them is expected to be 0,45 - 0,49 kWh/kg of LNG. The company manufactures efficient cryogenic equipment for distribution infrastructure and using LNG. These include the LNG storage reservoirs with capacity from 5 to 250 m³, semitrailer — a cistern with capacity of 30 m³ of LNG. The company has enough scientific and engineering and manufacturing base for production of modern cryogenic equipment intended for implementation it in the different LNG technologies.

Keywords: Liquefied natural gas (LNG). High-pressure refrigeration cycle. Throttle-ejector stage. Specific energy consumption for LNG production. Expander nitrogen cycle. Expander stage. Turbo expander. Heat exchanger. Q-T-diagram. Losses of heat transfer irreversibility.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в газовой промышленности России, в её государственных и частных структурах с большим вниманием стали относиться к проблеме развития производств сжиженного природного газа (СПГ) и инфраструктуры его распределения и применения как для целей экспорта, так и газификации регионов, удаленных от газопроводной сети. Известны проекты ОАО «Газпром», ОАО «Новатэк» по созданию крупных экспортных терминалов СПГ. Кроме этого, обе компании приступили к реализации ряда программ газификации на основе СПГ регионального масштаба. Дочерние фирмы ОАО «Газпром» («Газэнергосеть», «Газпром Промгаз», «Газпром ВНИИгаз», «Газпром добыча шельф» и др.) возглавляют разработку СПГ-проектов, в том числе направленных на газификацию регионов, локальное энергообеспечение, использование на транспорте, создание плавучих СПГ-платформ и т.п. Специальный выпуск журнала «Газовая промышленность» [1] даёт представление о масштабах этих перемен. Аналогичные процессы происходят и в сопредельных странах, и дальнем зарубежье.

ОАО «Криогенмаш» на основе собственного своего многолетнего опыта в криогенной технике определил свою нишу в разработках и производстве СПГ-оборудования. В прошедшие 10 лет их удалось вывести на ощутимый уровень практической реализации. Основное содержание разработок и результаты использования нашли отражение как в публикациях, так и на конференциях, международном семинаре по СПГ в Одессе [2-5].

Содержание настоящей статьи отражает новые разработки и перспективы развития в ОАО «Криогенмаш» направления, связанного с созданием СПГ-оборудования.

2. СПГ-УСТАНОВКИ МАЛОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

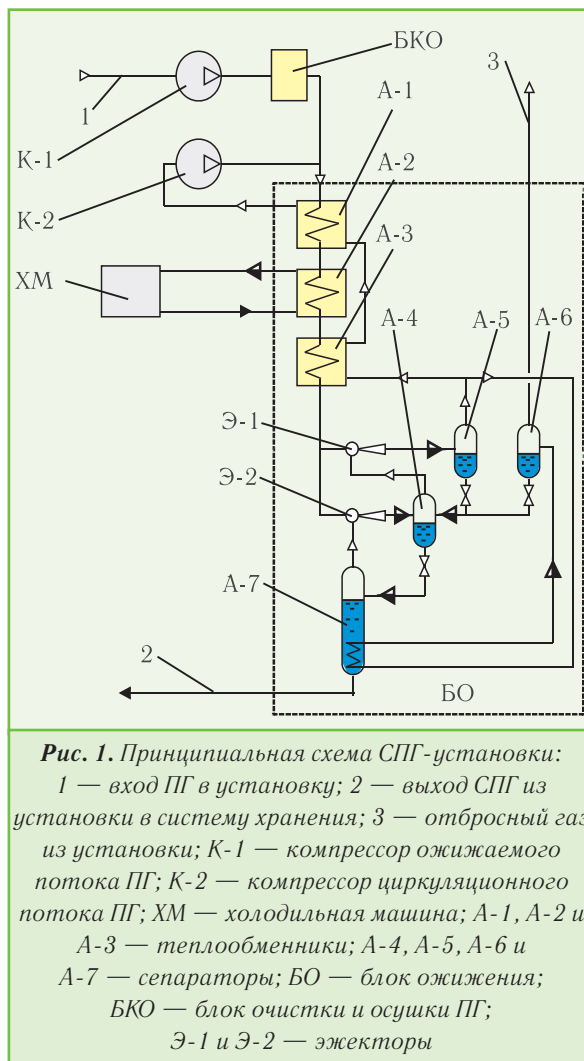
Концепция построения СПГ-установок малой производительности формировалась в процессе сотрудничества ОАО «Криогенмаш» с дочерними компаниями ОАО «Лентрансгаз» [6]. Впоследствии в процессе разработки ряда промышленных СПГ-установок для Китая концепция приобрела законченный вид и отличительные особенности стиля ОАО «Криогенмаш» [2,3]. В термодинамическом отношении эти особенности сводятся к следующему:

- установки базируются на достаточно эффективном и простом холодильном цикле высокого давления сжижаемого природного газа;
- для повышения термодинамической эффективности ожижения применяется внешнее предварительное охлаждение на температурном уровне минус 40 °С с помощью холодильной машины;
- для расширения газа высокого давления вместо дросселя применяются эжекторы, полезно использующие энергию давления газа для организации циркуляционного холодильного контура при повышенном давлении в обратном потоке;

– сочетание высокого давления прямого потока с повышенным давлением в обратном потоке снижает потери от необратимости в теплообменнике и удельный расход энергии на ожижение;

– трёхступенчатая сепарация двухфазного потока позволяет эффективно отделить и вывести из холодильного контура легкокипящие примеси водорода, гелия, азота без потерь метана.

Типовая принципиальная схема установки с учётом отмеченных отличий приведена на рис. 1.



Изложенные выше и отработанные в практике поставок технические решения обеспечивают достаточно высокую эффективность, соответствующую фактическому удельному расходу на уровне 0,62-0,68 кВтч/кг СПГ. Начиная с 2006 года, ОАО «Криогенмаш» поставляет компании «Chongqing Endurance Industry Stock Co. Ltd.» для различных китайских заказчиков ожижители природного газа серии ОП. Всего поставлено и пущено в эксплуатацию 6 установок; 5 других установок находятся в стадиях монтажа, изготовления или разработки по заключенным контрактам. Первая серия установок уже более 4-х лет нахо-

дится в эксплуатации. Номенклатура установок включает производительности: 1; 1,5; 2,5 и 3 т/ч. Основные технические характеристики установок представлены в табл. 1.

Как следует из табл. 1, по термодинамической эффективности установки превосходят характеристики ряда детандерных установок с одним детандером [4].

Блок ожижения как основной технологический узел установки обладает высокими эксплуатационными качествами, подтвержденными успешной практикой длительной и непрерывной работы. Среди них необходимо отметить:

- простота пуска, которая по существу сводится к подаче в блок сжатого очищенного от примесей газа;
- быстрый выход на режим, что подтверждается установлением уровня СПГ в сепараторе в течение примерно 30 мин.;
- блок не требует ручного управления и постоянного присутствия оператора;
- управление осуществляется дистанционно с пульта ожижительного комплекса;
- автоматическая адаптация к параметрам сжимаемого газа по уровню давления, температуры и состава газа.

Конструкция блока отвечает высоким требованиям заказчиков как в отношении обеспечения удобства обслуживания так и логистики, монтажа и пусконаладки.

Отметим наиболее важные конструктивные особенности установок:

- модульная конструкция с транспортабельными габаритами как для автотранспорта, так и железной дороги;
- полная заводская сборка холодного блока с проведением всего комплекса заводских испытаний, предусмотренных документацией;
- 100%-ная готовность блока к монтажу, содержание которого ограничивается установкой на фундамент и подсоединением коммуникаций;
- отсутствие разъёмных соединений на газовых коммуникациях, что исключает утечки газа в зоне

обслуживания блока;

- изоляция холодных аппаратов и трубопроводов с последующим их заключением в алюминиевые кожухи для сохранности свойств, обеспечения целостности конструкции и эстетичного внешнего вида.

Основные характеристики конструкции блоков ожижения лимитируются транспортабельными габаритами по ширине (2900-3100 мм) и высоте (3400-3500 мм). Длина определяется компоновкой аппаратов на раме и их количеством в зависимости от состава газа. Внешний вид блоков в состоянии поставки показан на фото 2.



Фото 2. Внешний вид блоков СПГ-установок:
а — ОП-1,5; б — ОП-2,5

За последние 5 лет полностью решены задачи разработки, освоения технологии и производства, накоплен опыт поставок блоков ожижения производительностью от 0,6 до 3 т/ч в блочно-модульном ис-

Таблица 1. Характеристики СПГ-установок, поставленных в Китай

Год поставки	Обозначение	ПГ на входе		СПГ		Энергетика		Примечание
		Давление, МПа	Содержание СН ₄ , % об.	Давление, МПа	Расход, кг/ч	Мощность, кВт	Уд.расход энергии, кВтч/кг	
2007	ОП-1,5	3,0	92,189	0,3	1535	945	0,616	Бишан
2008	ОП-1,5 (2 шт.)	3,0	99,161	0,3	1549	1083	0,651	Хуаншуй
2010	ОП-1,5	2,6	97,910	0,3	1500	1029	0,686	Суо Ю
2011	ОП-2,5 (2 шт.)	2,3	93,579	0,52	2477	1666	0,672	Шитэй
2012	ОП-1,5 (2 шт.)	1,0	97,110	0,3	1530	1153	0,753	Хуабан
2012	ОП-3 (3 шт.)	2,8	94,095	0,3	3045	1875	0,616	Ли Сян

полнении. Практика монтажных, пусконаладочных работ и длительной эксплуатации полностью подтвердила правильность выбранной технологии сжижения, проектные показатели эффективности и высокие эксплуатационные качества созданных установок. С учётом этого руководством компании принято решение о разработке с привлечением проектного института ОАО «Гипрокислород» типовых проектов комплексов по производству СПГ производительностью 1,5 и 3 т/ч в полной комплектации, включая системы очистки газа, системы хранения СПГ, вспомогательное и общинженерное оборудование. Уже в текущем году эти проекты будут представлены на рассмотрение нашим заказчикам. На втором этапе граница производительностей подобных комплексов может быть расширена путём увеличения числа технологических линий ожижения при общем компрессорном хозяйстве, системах очистки и осушки газа и хранения СПГ. Уже в текущем году предприятие поставит 3 установки ОП-3 для подобного проекта в Китае. С вводом их в эксплуатацию годовая производительность установок ОАО «Криогенмаш» в Китае составит 200 тыс. т СПГ.

3. СПГ-УСТАНОВКИ СРЕДНЕЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Несмотря на то, что СПГ-установки высокого давления газа подтвердили свои превосходные эксплуатационные качества и достаточно высокую энергетическую эффективность, им свойственны некоторые недостатки, которые с ростом единичной производительности проявляются все более радикальным образом. Высокое давление газа в цикле (20 МПа) негативно влияет на конструкцию и массогабаритные характеристики теплообменных аппаратов и лимитирует применение поршневых компрессоров большой производительности. В совокупности эти обстоятельства ограничивают единичную производительность установок этого типа на уровне примерно 4...5 т/ч. К тому же, энергетическая эффективность установок высокого давления ограничена величиной удельных энергозатрат на ожижение на уровне примерно 0,6 кВтч/кг и практически почти не имеет перспектив к снижению без существенного усложнения схемы.

Развитие крупных СПГ-терминалов производительностью до 40-800 т/ч в основном базировалось на применении каскадных и смесевых холодильных циклов и их сочетаний. В термодинамическом плане на этом пути достигнуты большие успехи. Однако внедрение полученных результатов в СПГ-установки средней производительности оказывается проблематичным из-за очень высоких значений удельных инвестиций.

ОАО «Криогенмаш», базируясь на собственном многолетнем опыте создания крупных воздухоразделительных установок с детандерным холодильным циклом, с самого начала вхождения в проблематику СПГ объявил о своей приверженности применения в установках сжижения газа средней производитель-

ности внешнего азотного детандерного холодильного цикла [4,7].

Надо сказать, что сам по себе переход от дроссельного цикла высокого давления газа к детандерному на азоте не сулит термодинамических преимуществ. Напротив, как было показано нами в [4], почти все известные из публикаций установки с азотным циклом с одним детандером имеют удельный расход энергии на ожижение в диапазоне 0,7-1,1 кВтч/кг, что выше, чем достигнуто нами в более простых СПГ-установках с циклом высокого давления газа. Объяснить это можно характером изменения так называемых собственных потерь от необратимости теплообмена в основном теплообменнике. Сочетание S-образной кривой охлаждения природного газа, как правило, низкого давления с прямолинейной формой кривой нагрева обратного потока азота приводит к тому, что в зоне конденсации и переохлаждения газа в рекуперативном теплообменнике устанавливаются очень большие разности температур. Это вызывает высокие потери от необратимости, неустранимые снижением технических потерь от недорекуперации.

Для выхода из этого положения и с целью повышения термодинамической эффективности процесса сжижения различные авторы и фирмы предлагают свои решения и методы, которые в той или иной форме изменяют вид $Q-T$ -диаграммы основного теплообменника. Подробный анализ различных подходов и методов формирования более «благоприятной» $Q-T$ -диаграммы и достигнутых результатов приведен в [4].

Формируя свою концепцию СПГ-установок с азотным детандерным циклом, ОАО «Криогенмаш» исходит из того, что это решение содержит в себе большие возможности повышения их термодинамической эффективности. Известно, что в ожижителях водорода и, особенно, гелия, построенных по циклу Брайтона, для этих целей широко применяется многоступенчатое, иногда до 6-7 ступеней, включение турбодетандеров, теоретически обоснованное в классической работе П.Л. Капицы и теперь вошедшее во все учебники по криогенной технике [8]. В наших разработках ожижителей подробно исследовано влияние числа детандерных ступеней охлаждения на термодинамическую эффективность ожижителей природного газа. Это же касается влияния предварительного охлаждения как в виде фреоновой холодильной машины, так и многоступенчатого пропанового охлаждения. Количественно было исследовано влияние давления сжижаемого газа и определено, что в большинстве случаев выгодно дожимать газ источника до более высокого давления, что «выпрямляет» S-образную кривую охлаждения и априори уменьшает потери от необратимости теплообмена.

Некоторые результаты этих работ нашли отражение в публикации [7]. За прошедшие годы их удалось существенно пополнить конкретными разработками по техническим заданиям потребителей. В основном они включают ожижители производительностью в диапазоне 4-20 т/ч для Иранской нефтегазовой компа-

нии, ОАО «Новатэк», ОАО «ГродноАзот», «Газпром Промгаз», «Газпром газэнергосеть», ОАО «Криогаз» и др. В зависимости от параметров газа (давление, состав), условий выдачи СПГ из установки в систему хранения и т.п. исследовались различные принципиальные схемы установок:

- схема с предварительным фреоновым охлаждением и одним детандером на азоте [7];
- то же, но с двумя детандерами на азоте;
- схема с предварительным 3-х ступенчатым пропановым охлаждением и двумя детандерами [7].

Установлено, что условия конкретного Заказчика существенно влияют на показатель термодинамической эффективности при прочих одинаковых условиях, и в этом смысле удельный расход энергии на ожижение не может носить абсолютного характера, как это часто понимают в обсуждениях. Тем не менее, для приближенных оценок можно считать, что для трёх исследованных схем с учётом оговоренных условий удельный расход энергии на ожижение находится в диапазоне 0,45-0,65 кВтч/кг, уменьшаясь с ростом содержания метана в газе, давления газа и давления выдачи СПГ.

Практическая реализация рассмотренных схемных решений только начинается. Сейчас по договору с одним из Заказчиков в структуре «Газпрома» разработан технический проект установки производительностью 7 т/ч на базе схемы с предварительным фреоновым охлаждением и одним детандером. В планы Заказчика входит строительство 3-х установок этого типа в Северо-Западном регионе России.

Получен первый опыт разработки на базе азотного детандерного холодильного цикла более производительных установок для компании «Samsung Techwin» (100 т/ч), иранской нефтегазовой компании (70 т/ч) и ОАО «Роснефть» (85 т/ч). Во всех проектах подобного масштаба принята схема с предварительным 3-х ступенчатым пропановым охлаждением и двумя детандерами. Изменения величин удельного расхода энергии лежат в диапазоне 0,45-0,49 кВтч/кг СПГ.

Вместе с тем существует актуальная и специфическая область применения СПГ-установок средней производительности, в которой крайне нежелательно по условиям пожаробезопасности применение предварительного пропанового охлаждения, равно как и смесевых хладагентов. Речь идёт о плавучих газодобывающих и газоперерабатывающих платформах. Создание подобных платформ поручено компании «Газпром добыча шельф», с которой у ОАО «Криогенмаш» существуют партнерские отношения сотрудничества по разработке технологии сжижения газа. Известны важные преимущества, которыми обладают азотные детандерные циклы в этих условиях применения [4]. Требуемые объемы производства СПГ здесь не слишком велики и составляют до 2 млн. т в год. На первом этапе они ограничены диапазоном от 400 до 600 тыс. т/год.

Для использования на первом этапе освоения месторождений арктического шельфа с помощью плавучих платформ нами предложена установка

УСПГ-70 с азотным холодильным циклом без предварительного охлаждения и с тремя детандерами, принципиальная схема которой приведена на рис. 3. На рис. 4 представлена $Q-T$ -диаграмма основного теплообменника установки, а в табл. 2 — основные технические характеристики ожижителя ОП-70. Процесс в холодной зоне $Q-T$ -диаграммы близок к идеальному, и данные табл. 2 по удельному расходу энергии (0,42 кВтч/кг при отсутствии предварительного охлаждения) свидетельствуют об этом.

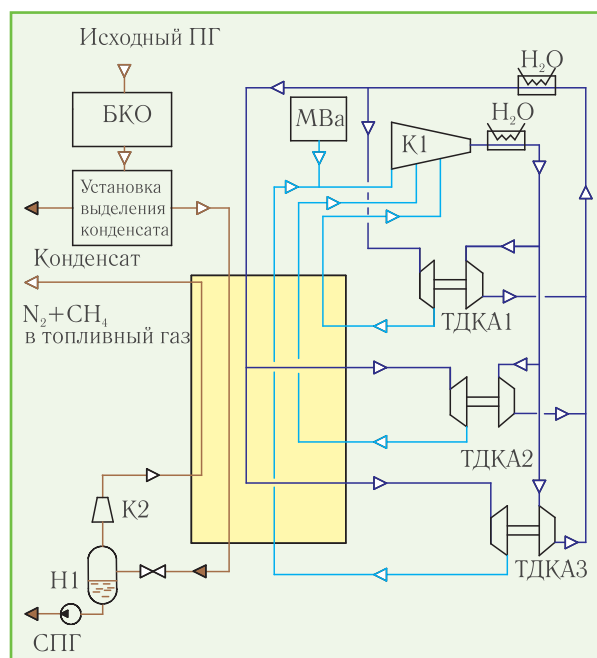


Рис. 3. Принципиальная схема ожижителя ОП-70 для плавучей платформы: К1 — азотный циркуляционный компрессор; К2 — компрессор для откачки газов; ТДКА1, ТДКА2, ТДКА3 — турбодетандер-компрессорные агрегаты; БКО — блок комплексной очистки природного газа; МВа — мембранная установка для извлечения азота из воздуха; Н1 — насос СПГ

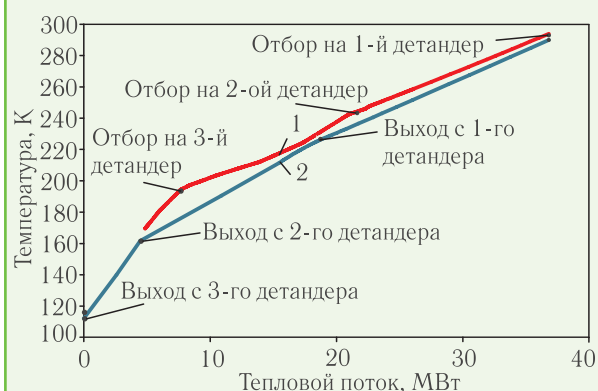


Рис. 4. $Q-T$ -диаграмма основного теплообменника ОП-70: 1 — кривая для потока ожижаемого природного газа; 2 — обобщенная кривая для потоков азота

Исчерпаны ли ресурсы повышения термодинами-

ческой эффективности многоступенчатых детандерных схем ожижения? Если оставаться на позиции сравнительно простых схем включения детандеров, то, вероятно, ответ — положительный. Но при этом не следует забывать об открывающемся и общепризнанном огромном ресурсе снижения инвестиционных затрат, а также ряда конструктивных и эксплуатационных преимуществ детандерных схем, вследствие чего в мире уже начата их практическая реализация на плавучих платформах.

№ п/п	Параметры	Единицы измерения	Величины
1.	Природный газ на входе: расход давление Состав: $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_3\text{H}_8/\text{N}_2$	$\text{нм}^3/\text{ч}$ МПа %	98800 6,5 94,4/2,0/1,0/2,0
2.	СПГ на выходе: расход давление Состав: $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_3\text{H}_8/\text{N}_2$	$\text{т}/\text{ч}$ МПа %	70 0,11 95,3/2,1/1,1/0,9
3.	Мощность турбодетандеров по ступеням Д1/Д2/Д3	кВт	3480/7120/4070
4.	Мощность циркуляционного компрессора	кВт	29640
5.	Тепловая нагрузка теплообменника	кВт	30500
6.	Удельный расход энергии на ожижение	кВтч/кг	0,42

Таблица 2. Основные технические характеристики ОП-70

Существует и термодинамический ресурс улучшения параметров цикла за счёт усложнения схемы и улучшения $Q-T$ -диаграммы. В частности, в нашей публикации [7] рассматривается принципиальная схема установки с четырьмя детандерами и гидравлической турбиной на СПГ производительностью 250 т/ч, в которой удельный расход энергии на получение СПГ уменьшен до 0,38 кВтч/кг за счет введения промежуточного уровня давления обратного потока для одной из ступеней детандера. В патенте [9] предложена схема установки с тремя детандерами и предварительным пропановым охлаждением, в которой поток из второго детандера после подогрева в двух теплообменниках возвращается на вход первого детандера, в результате кривые прямого и обратного потоков сближаются. Потенциально существует множество подобных тер-

модинамически эффективных схем, однако экономическая целесообразность их, как обычно, определяется путём технико-экономического обоснования с учётом условий конкретного объекта.

4. ИНФРАСТРУКТУРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПГ

Оборудование ОАО «Криогенмаш» для хранения СПГ и его газификации традиционно является наиболее эффективным с точки зрения потерь от испарения и охватывает номенклатуру резервуаров полной заводской сборки объёмами от 5 до 250 м³. Созданное с учётом высоких требований спецтехники для уровня температур жидкого азота и водорода, вероятно, для условий СПГ оно во многих случаях оказалось излишне затратным. С учётом этого обстоятельства была проведена конструкторско-технологическая переработка документации, упростившая и улучшившая ряд схемно-конструктивных решений. Обновленный ряд резервуаров и блочных систем хранения для СПГ включает объёмы: 5, 10, 25, 50, 75, 100, 250 м³.

Накоплен достаточный практический опыт применения ряда резервуаров, газификаторов и блочных систем хранения для комплексов СПГ [10]. Таким образом, что касается систем хранения и газификации СПГ, выпускаемое оборудование отличается высокими эксплуатационными качествами, полностью удовлетворяет потребности отечественного рынка и с учётом модернизации доступно по цене.

Располагая существенными достижениями в создании транспортных цистерн как для жидких продуктов разделения воздуха, так и водорода [11], предприятие завершило разработку цистерны-полуприцепа для СПГ вместимостью 30 м³. Основные характеристики цистерны приведены в табл. 3, а внешний вид — на рис. 5.

Наименование параметра	Значения величин
Рабочее давление (максимальное), МПа	0,8
Масса перевозимого СПГ, кг	11000
Суточная испаряемость при нормальных условиях среды, %	0,35
Масса полностью заправленной цистерны, кг	26000
Габариты (длина/ширина/высота), мм	11274/2495/3613

Таблица 3. Технические характеристики полуприцепа-цистерны ППЦ-30/0,8

Предстоящее строительство производств СПГ в Северо-Западном регионе с ориентацией на экспорт в сопредельные страны потребовало разработки специального транспортного средства максимальной вместимости с учётом дорожных ограничений, но с более

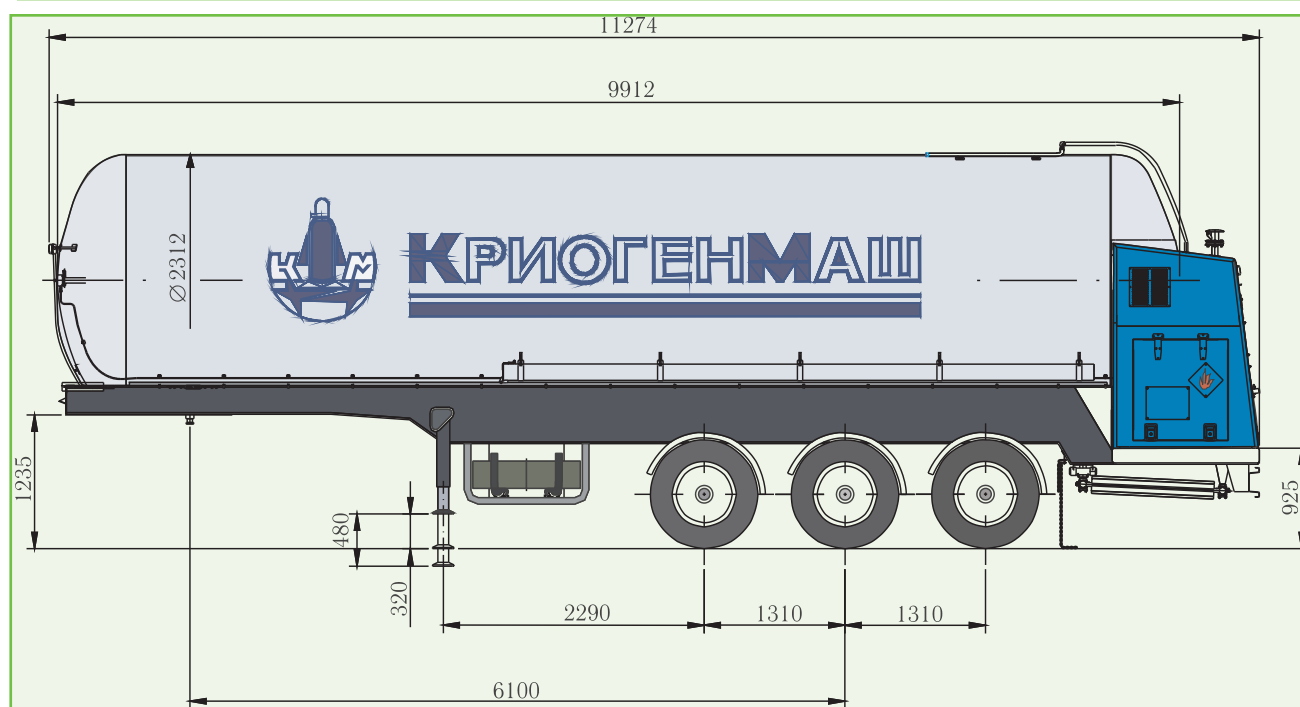


Рис. 5. Внешний вид полуприцепа-цистерны ППЦ-30/0,8 для СПГ

простыми функциями и оснащением, чем цистерны в традиционном понимании. Сейчас ведется разработка подобного перевозчика СПГ вместимостью 45 м³.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прошло более 30 лет с той поры, когда в стране директивно широким фронтом были начаты работы по внедрению СПГ. Ведущие НИИ, КБ, специализированные предприятия газовой промышленности, химического и криогенного машиностроения в короткий срок выполнили необходимые НИОКР и обеспечили создание смесевой установки СПГ производительностью 3 т/ч на МППЗ и криогенного комплекса производительностью 20 т/ч в г. Абовян (Армения). К сожалению, известные события 80-90 гг. приостановили эти работы и тем свели к нулю усилия тысяч специалистов. Только сейчас, когда технологии далеко ушли в своем развитии, у нас появились робкие возможности возрождения направления использования СПГ, хотя теперешние ресурсы, масштабы работ и возможности кооперации сильно сократились. Несмотря на это, можно утверждать, что в ОАО «Криогенмаш» сформирована научно-конструкторская и производственная база для реализации в современных условиях задач газификации на основе СПГ-технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Производство, транспортировка, хранение и использование сжиженного природного газа// Газовая промышленность — 2011. — № 668. — С. 2-93.
2. Безруков К.В., Довбиш А.Л., Передельский В.А. Блочная установка ожижения природного газа производи-

тельностью 1,5 т/ч// Технические газы. — 2008. — № 3. — С. 67-70.

3. Опыт создания блоков ожижения СПГ-установок малой производительности/ А.Л. Довбиш, В.А. Передельский, К.В. Безруков и др.// Технические газы. — 2012. — № 2. — С. 28-31.

4. Кузьменко И.Ф. Тенденции развития установок сжиженного природного газа средней производительности для распределительного газоснабжения// Технические газы. — 2008. — № 3. — С. 36-42.

5. Технология комплексной переработки шахтного газа с получением товарного сжиженного метана/ И.Ф. Кузьменко, А.И. Рубцов, А.Л. Довбиш, А.А. Мельниченко// Технические газы. — 2010. — № 3. — С. 31-35.

6. Кузьменко И.Ф., Довбиш А.Л., Передельский В.А. Повышение эффективности установок сжижения природного газа малой производительности// Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2002. — № 5. — С. 29-31.

7. Кузьменко И.Ф., Передельский В.А., Довбиш А.Л. Установки сжижения природного газа на базе детандерных азотных циклов// Технические газы. — 2010. — № 2. — С. 45-49.

8. Капица П.Л. Расчёт гелиевого ожижительного цикла с каскадным включением детандеров// Журнал технической физики. — 1950. — Вып. 4. — Т. XXIX. — С. 427-432.

9. Dubar C.A. Liquefaction Process // US Patent 5768912, Jun. 23, 1998.

10. Криогенный комплекс для накопления, хранения и технологического использования СПГ/ М.А. Кузнецов, Ю.В. Ластовский, М.А. Машканцев, В.А. Поляков// Технические газы. — 2008. — № 3. — С. 43-47.

11. Кузьменко И.Ф., Румянцев Ю.Н., Сайдадь Г.И. Современные тенденции в конструировании и изготовлении резервуаров для хранения и транспортирования жидкого водорода// Технические газы. — 2008. — № 1. — С. 53-58.