

УДК 621.59(075.8)

А.М. Домашенко, А.Г. Лапшин, А.Л. Довбиш, В.А. Передельский, М.А. Кузнецов
 ОАО «Криогенмаш», пр. Ленина, 67, г. Балашиха Московской области, РФ, 147907
 e-mail: otd215@cryogenmash.ru

КРИОГЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО СНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СЖИЖЕННЫМ ПРИРОДНЫМ ГАЗОМ

Растёт интерес к использованию сжиженного природного газа (СПГ) для децентрализованного снабжения им различных потребителей. Для развития этого направления необходимо разрабатывать и производить специализированное криогенное оборудование. Изготовлением такого оборудования в России занимается известная компания «Криогенмаш». На основе оборудования компании можно создавать надёжно работающие комплексы, в состав которых могут быть включены установки ожижения природного газа, резервуары для хранения СПГ на заводе и у потребителей, транспортные средства для доставки СПГ, системы газификации СПГ. Рассматриваются особенности и характеристики указанного оборудования. Приводятся примеры его эффективного использования при создании ряда комплексов различного назначения в России.

Ключевые слова: Криогенная техника. Сжиженный природный газ. СПГ-установка. Криогенные резервуары. Транспорт для СПГ. Газификатор СПГ.

A.M. Domashenko, A.G. Lapshin, A.L. Dovbish, V.A. Peredel'skiy, M.A. Kuznetsov

CRYOGENIC EQUIPMENT FOR DECENTRALIZED CONSUMER SUPPLY OF LIQUEFIED NATURAL GAS

The growing interest to the liquefied natural gas usage for decentralized consumer supply is observed. It is important to elaborate and produce a specialized cryogenic equipment for the development of this direction. «Cryogenmash», a well-known company, produces such equipment in Russia. On the base of such equipment, produced by the company, it is possible to create safe systems, combining natural gases liquefaction plants, LNG tanks at a plant and at consumers, transport vehicles for the LNG delivery to the consumers, LNG gasification system. The peculiarities and characteristics of the mentioned equipment are being examined. Its effective usage in the creation of quite a few complexes of different purpose in Russia has been exemplified.

Keywords: Cryogenic technology. Liquefied natural gas. LNG plant. Cryogenic tanks. Transport for LNG. LNG gasificator.

1. ВВЕДЕНИЕ

Создание инфраструктуры для обеспечения транспорта и теплоэнергетики, базирующихся на малых производствах СПГ (до 40 т/ч), находит в мировой практике достаточно серьёзное развитие. Только в США и Канаде эксплуатируются примерно 300 установок производительностью от 3 до 40 т/ч, поставляющих СПГ муниципальному транспорту, карьерным самосвалам, объектам теплоэнергетики. Динамика развития всех видов транспорта, а также теплоэнергетики позволяет надеяться, что и в РФ в ближайшие годы СПГ станет, учитывая при этом его стоимость и экологическую чистоту, одним из основных видов топлива, в том числе и для ракетно-космической и авиационной техники. Тем более, что уже в на-

чале 90-ых годов прошлого столетия ОАО «Туполев» совместно с организациями ОАО «Газпром» и др. работали самолет Ту-155 с двигателем НК-88, работающим на СПГ, и провели на нём около ста испытательных полётов.

Очевидно, что дальнейшее широкомасштабное использование СПГ потребует создания более эффективного и надёжного криогенного оборудования для комплектации им систем производства этого продукта. Структурная схема такого комплекса, представленная на рис. 1, традиционно включает в себя установку ожижения, базовое хранилище СПГ на заводе, хранилище у потребителя, транспортные средства доставки СПГ потребителю, средства газификации и основных потребителей жидкого и газообразного метана (транспортная техника, теплоэнергетика,



Рис. 1. Структурная схема газификации

жения метана производительностью 1,5 т/ч СПГ (УСПГ-1,5), построенных на указанном выше термодинамическом цикле. Схема установки представлена на рис. 2. Рассмотрим принцип её работы.

Исходный газ с давлением 3,0 МПа (абс.) и температурой +35 °С в количестве 2000 $\text{нм}^3/\text{ч}$ поступает на вход в компрессор К-2, где он смешивается с осушенным от капельной влаги газом регенерации блока осушки (200 $\text{нм}^3/\text{ч}$) и сжимается до ~20 МПа. Сжатый исходный газ направляется в

промышленные технологии и др.).

2. ОСОБЕННОСТИ СПГ-УСТАНОВОК

Установки ожижения не являются стандартным видом оборудования, поскольку принципиальная схема и состав оборудования определяются в зависимости от целого ряда параметров, характерных для конкретного объекта: давление газа, его состав, содержание ценных и вредных примесей, наличие влаги, твёрдых примесей и др.

Если попытаться классифицировать комплексы СПГ по главному параметру — производительности, то на современном уровне развития отечественного криогенного машиностроения с учётом требований потребителей установки ожижения малой производительности можно условно разделить на три группы по их производительности: до 1,5 т/ч, до 5 т/ч и до 10-12 т/ч.

Установки производительностью до 1,5 т/ч базируются на наиболее простом цикле высокого давления с дросселированием потока природного газа и возвратом несконденсированной части газа в сеть низкого давления. Схема ожижения в этом случае строится по дроссельному циклу с предварительным охлаждением на уровне -40 °С с помощью холодильной пароконденсаторной машины. Удельные затраты энергии при этом составляют 0,8 кВт·ч/кг. Подобные установки успешно работают в г. Санкт-Петербурге и п. Развилка (Московская обл.). Комплектующее оборудование для этих установок (теплообменники, арматура, ёмкости для хранения СПГ) изготовлено ОАО «Криогенмаш». В настоящее время предприятие по контракту с КНР разработало и ввело в эксплуатацию три установки ожи-

блок осушки, в котором осушается до точки росы по воде не выше -90 °С. Часть осушенного газа (~10 %) дросселируется до давления ~3,0 МПа и направляется на регенерацию блока осушки, после чего смешивается с новой порцией исходного газа и подаётся на вход компрессора К-2. Основная часть осушенного

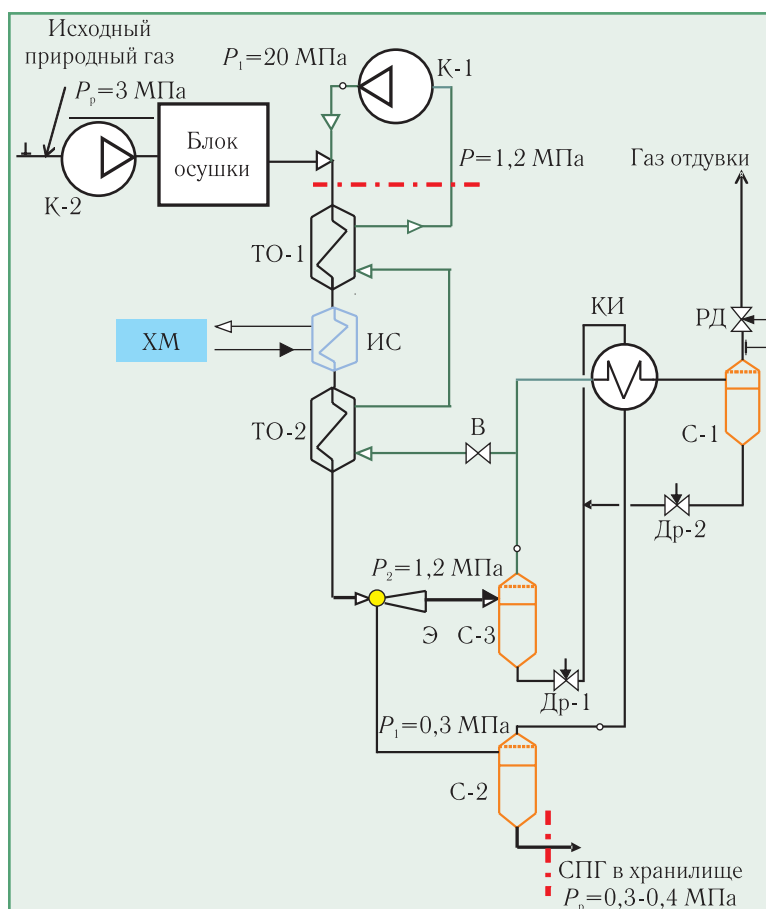


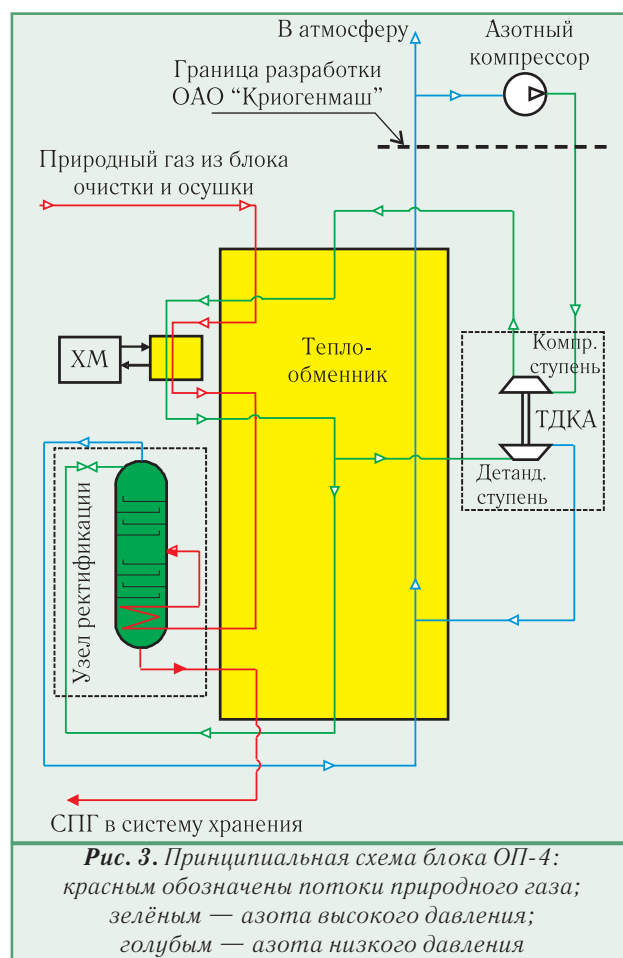
Рис. 2. Схема установки УСПГ-1,5 с дроссельным циклом на ПГ и фреоновым охлаждением: К-1, К-2 — компрессоры; ТО — теплообменник; КИ — конденсатор-испаритель; Др — дроссельный вентиль; С — сепаратор; ИС — испаритель холодильной машины; ХМ — холодильная машина; В — вентиль регулирующий; Э — эжектор; РД — регулятор давления

газа смешивается с циркуляционным потоком и затем поступает в блок ожижения. В нём газ высокого давления последовательно охлаждается в теплообменниках и испарителе холодильной машины и направляется на расширение в эжектор в качестве рабочего потока, в котором давление газа снижается до $\sim 1,2$ МПа. Расширенный в эжекторе газ подаётся в сепаратор С-3. Жидкая фракция, отделённая в сепараторе С-3, дросселируется до давления 0,3 МПа (абс.) и поступает в конденсатор-испаритель КИ для конденсации части паровой фракции, отводимой из сепаратора С-3. После конденсатора-испарителя жидкая фракция направляется в сепаратор С-2, из которого сжиженный природный газ выдаётся потребителю, а пар идёт на дожатие в эжектор за счёт энергии расширения рабочего потока. Часть паровой фракции после охлаждения в конденсаторе-испарителе подаётся в сепаратор С-1, в котором отделяются несконденсировавшиеся лёгкие компоненты, а сконденсировавшаяся часть смешивается с жидкой фракцией, выходящей из сепаратора С-3. Основная часть паровой фракции из сепаратора С-3 проходит через теплообменники в качестве обратного потока для рекуперации холода, после чего обратный поток дожимается циркуляционным компрессором К-1 до давления 20 МПа, смешивается с новой порцией осушенного исходного газа и снова направляется в блок ожижения.

Взятая за основу схема позволяет производить очистку и осушку только той части природного газа, которая идёт на ожижение, поскольку обратный поток газа циркулирует в контуре с компрессором К-1. Следует также отметить, что введение в схему эжектора Э даёт возможность поддерживать давление в контуре циркуляции на уровне 1,2 МПа и обеспечивать тем самым вывод из контура лёгких фракций газа (азот, гелий) через сепаратор С-1. Расчётная суммарная потребляемая мощность установки 962 кВт, расчётные удельные энергозатраты 0,641 кВт·ч/кг СПГ, коэффициент ожижения несколько больше 30 %. Главные преимущества предложенной схемы — её простота, надёжность и солидный опыт эксплуатации установок, реализующих данную схему.

Следующую установку УСПГ-4, схема которой изображена на рис. 3, производительностью 4 т/ч СПГ, ОАО «Криогенмаш» разрабатывает также по контракту с КНР. Она принципиально отличается по своему схемному решению от установки УСПГ-1,5. Особенность схемы связана, прежде всего, с составом ПГ, в котором содержится 16 % азота, нуждающегося в отделении. Именно этим фактором обусловлено появление в схеме разделительной колонны и азотного холодильного цикла.

Работает установка следующим образом. Исходный газ с давлением 2,4 МПа (абс.) и температурой $+20$ °С в количестве $6250 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($150000 \text{ м}^3/\text{сут.}$) поступает в блок его очистки от диоксида углерода (CO_2). В нём содержание CO_2 снижают до $\sim 50 \text{ ppm}$ (0,00005 мольн. доли), затем газ осушается от влаги до точки росы по воде не выше -100 °С (при атмосферном давлении) и направляется в блок ожижения ОП-4, где ох-



лаждается в испарителе холодильной машины и рекуперативном теплообменнике. После чего в узле ректификации из газа удаляется азот до его конечного содержания не выше 1,5 % мольн. Удалённый из узла ректификации азот (примерный состав: азот — 97 % мольн., остальное — метан) направляется в качестве обратного потока в рекуперативный теплообменник для рекуперации холода. После узла ректификации газ охлаждается до температуры ~ 125 К, дросселируется до давления 0,4 МПа (абс.) и подаётся в систему хранения СПГ (при давлении 0,4 МПа температура насыщения СПГ равна ~ 129 К). Расчётная производительность по СПГ — 4100 кг/ч; содержание азота в СПГ — 1,4 % мольн., метана — 96 % мольн.

Для охлаждения природного газа используется внешний азотный детандерный цикл. Выходящий из блока ожижения азот (обратный поток) при давлении $\sim 1,6$ МПа сжимается в компрессоре до давления ~ 5 МПа, дожимается в компрессорной ступени ТДКА до давления ~ 6 МПа и направляется в блок ожижения. Там он охлаждается в испарителе холодильной машины и теплообменнике до температуры ~ 200 К, после чего часть его расширяется в детандерной ступени ТДКА, а оставшаяся часть охлаждается до температуры ~ 130 К, дросселируется, поступает в узел ректификации, затем смешивается с азотом, удалённым в узле ректификации из природного газа, и возвращается в качестве обратного потока в рекуперативный теплообменник.

Расчётная суммарная потребляемая мощность установки составляет 2980 кВт, а удельные энергозатраты 0,727 кВт·ч/кг СПГ. Выбор схемы с использованием внешнего детандерного цикла обусловлен также тем, что ОАО «Криогенмаш» имеет многолетний опыт создания ТДКА для воздухоразделительных установок.

На практике при разработке СПГ-установки часто встречаются с наличием природного газа под давлением, часть которого может быть полезно использована для производства холода в цикле посредством расширения газа в турбодетандере. Ещё большего эффекта можно достичь, если энергию расширения применить в компрессорной ступени для дополнительного сжатия исходного газа. На основе этого решения ОАО «Криогенмаш» разработало ряд установок ожижения природного газа, эффективность и ноу-хау которых определяются особенностями конструкции турбодетандер-компрессорных агрегатов.

Широкомасштабное внедрение СПГ потребует в перспективе создания крупнотоннажных установок производительностью до и более 10 т/ч СПГ. К установкам большой производительности предъявляются повышенные требования по удельным затратам энергии на ожижение. Оптимальными для установок являются дроссельные циклы на смешанном хладагенте (СХА — смесь азота с предельными углеводородами: метаном, этаном, пропаном и бутанами). Примером такой установки может служить ожижитель природного газа производительностью 3 т/ч, разработанный и изготовленный ОАО «Криогенмаш» в 90-ых годах для Московского газоперерабатывающего завода. Расчётные удельные затраты энергии на ожижение составили 0,5-0,7 кВт·ч/кг [1,2].

В настоящее время ОАО «Криогенмаш» совместно с ООО «Лентрансгаз» рассматривает вариант создания ожижителя производительностью 2,5 т/ч СПГ на основе цикла с СХА в качестве хладагента.

Вторая группа оборудования включает в себя хранилища, в которых применяются криогенные ре-

зервуары объёмом от 5 до 250 м³ и блочные системы хранения сжиженного природного газа (БСХП) объёмом от 5 до 100 м³ [3]. Основные их характеристики представлены в табл. 1.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ, ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ И ГАЗИФИКАЦИИ СПГ

Одной из важных характеристик этих систем являются потери продукта от испарения. Для БСХП эта величина составляет от 0,29 до 0,11 % в сутки. Нами традиционно строятся криогенные резервуары с высокоэффективной экранно-вакуумной тепловой изоляцией, что позволяет отечественному криогенному оборудованию превосходить по тепловым характеристикам зарубежные аналоги. В режиме эксплуатации такая изоляция возможно и не является технически обоснованной, но при остановках, связанных с профилактикой, ремонтом, технологическим циклом и т.п., представляется более целесообразным и обоснованным иметь изоляцию высокого уровня.

Весь ряд ёмкостного оборудования поставляется заказчику в состоянии полной заводской готовности. БСХП обеспечивает автоматическое поддержание давления на выходе из резервуара с помощью регулятора, что гарантирует постоянство давления метана в газообразном или жидком состоянии с заданной точностью в пределах установленных расходов. Принципиально важным схемным решением можно считать возможность дозаправки резервуара жидким метаном без сброса давления и без прекращения его выдачи потребителю. Реализация такой технологической операции производится при одновременной подаче жидкого метана вниз резервуара и в паровую фазу, обеспечивая тем самым её конденсацию и поддержание постоянного давления заправки. Система укомплектована также необходимыми средствами контроля и управления технологическими процессами.

С использованием созданных БСХП и криоген-

Таблица 1. Технические характеристики БСХП

Характеристики		Вертикальные резервуары				Горизонтальные резервуары	
		БСХП - 5/0,6	БСХП - 10/0,6	БСХП - 25/0,6	БСХП - 63/0,7	БСХП - 50/0,6	БСХП - 100/0,6
Вместимость	м ³	5,15	10,1	25,4	66,3	55	112
Кол-во хранимого продукта при коэф. заполнения 0,88	м ³	4,5	8,9	22,4	58,4	48,4	98,6
	кг	1900	3750	9400	24500	20400	41400
Суточные потери от испарения	% сут.	0,29	0,19	0,14	0,11	0,12	0,11
Производительность при рабочем давлении, не менее	кг/ч	400	500	500	500	1000	1000
Масса	кг	3100	4850	10050	23350	19000	33000
Длина	мм	1916	1916	3016	3620	10800	20160
Ширина		1916	1916	3016	3420	3228	3232
Высота		4950	7450	7400	12200	3615	3615
Диаметр		1916	1916	3016	3216	3216	3216
Рабочее давление	МПа	0,6					
Пределы регулирования давления	кгс/см ²	1-6					
Давление в вакуумной полости	мм рт.ст.	1·10 ⁻⁴					

ных резервуаров за последние годы были введены в эксплуатацию и подтвердили свою надёжность и работоспособность:

- система хранения и газификации СПГ СХП-25/0,6-0,2 в п. Красный Бор Ленинградской области;

- система хранения СХП-50/0,6 на ГРС «Никольское» в Ленинградской области;

- система хранения и газификации СПГ на базе БСХП-63/0,7, резервуаров РЦВ-63/0,7 и атмосферных испарителей для промышленного комплекса порта Приморск в Ленинградской области;

- система хранения и газификации объекта миниэнергетики спортивно-оздоровительного комплекса «Озон» в Ленинградской области;

- система хранения и газификации СПГ на базе двух БСХП-25/0,6 в г. Луга;
- комплекс СПГ в г. Видное Московской области. [3,4].

Всего для накопления, хранения криогенных продуктов и их газификации и использования в различных отраслях промышленности наше предприятие разработало и поставило потребителям около 500 единиц газификаторов низкого давления.

Для газификации СПГ и нагрева его паров при низком давлении применены испарители, которые используют для реализации процесса тепло окружающей среды. Многолетний опыт разработок и эксплуатации атмосферных испарителей криогенных продуктов показал, что достигаемая недорекуперация на выходе из теплообменных аппаратов на уровне 20 °С является вполне приемле-

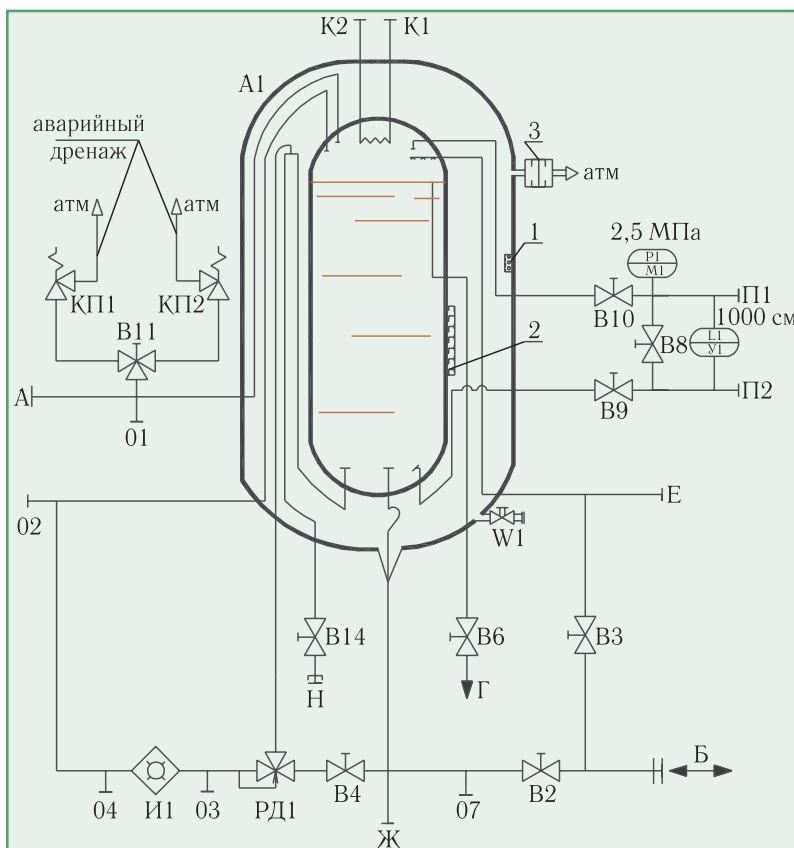


Рис. 4. Модифицированная пневмогидравлическая схема БСХ-26/1,7: 1 — кассета с химическим поглотителем водорода; 2 — крионасос; 3 — предохранительная мембрана ТИП резервуара Ду50; А — газосброс; Б — слив-заправка; Г — контроль максимального уровня; Е — заправка на уровень в стационарной системе; Ж — заправка-выдача в стационарной системе; Н — к производственному испарителю; П1 — дистанционный контроль давления уровня «верх»; П2 — дистанционный контроль давления уровня «низ»; К1 — вход в конденсатор; К2 — выход из конденсатора; 01 — автоматическое поддержание давления при хранении продуктов; 02 — поддержание давления в резервуаре А1 при заправке и подключение дополнительного регулятора наддува; 03, 04 — подключение добавочных испарителей наддува; 07 — заправка сосудов малой вместимости

Таблица 2. Технические данные испарителей

Марка испарителя	Рабочее давление, МПа	Производительность по газообразному природному газу (ном.), нм ³ /ч	Недогрев газа на выходе по сравнению с температурой окружающего воздуха, °С, не более
ИА-10/6,5	1,0	13,5	20
ИА-16/6,5	1,6	13,5	20
ИА-10/6,5	1,0	42	20
ИА-16/6,5	1,6	42	20
ИА-10/52	1,0	115	20
ИА-16/52	1,6	115	20
ИА-10/52	1,0	115	20
ИА-16/52	1,6	115	20
ИА-65/55	1,0	125	20
ИА-65/55	1,6	125	20

мой. Технические данные о некоторых серийно изготавливаемых ОАО «Криогенмаш» испарителях СПГ приведены в табл. 2.

Анализ многолетнего опыта эксплуатации газификационных установок позволил установить, что с практической точки зрения схема, реализующая все технологические режимы эксплуатации и поэтому насыщенная значительным количеством запорной, регулирующей и предохранительной арматуры, в ряде случаев не является необходимой и целесообразной, в том числе и с ценовой точки зрения. Выполненный специалистами анализ позволил разработать новую (модернизированную) пневмогидравлическую схему (рис. 4), в которой заложен иной принцип построения и подхода к технологии эксплуатации. Речь идет о схеме, которая имеет минимум технологических операций, в основном используемых заказчиками. Это заправка-слив жидкости, аварийный и технологический газосброс, система наддува с поддержанием заданного рабочего давления и с элементами, обеспечиваю-

щими сброс избытка газа из паровой полости в магистраль подачи жидкости в производственный испаритель. Следствием таких решений явилось значительное упрощение схемы и уменьшение количества элементов и, прежде всего, арматуры.

На рис. 5 изображены пять вариантов элементов, которые могут быть предложены заказчику дополнительно к основной схеме. Это элементы, обеспечивающие заправку газификатора без сброса давления и без прекращения подачи жидкости в производственный испаритель, бездренажное хранение СПГ, заправку маломемких сосудов, сменные панели газификатора, защиту заправочного трубопровода.

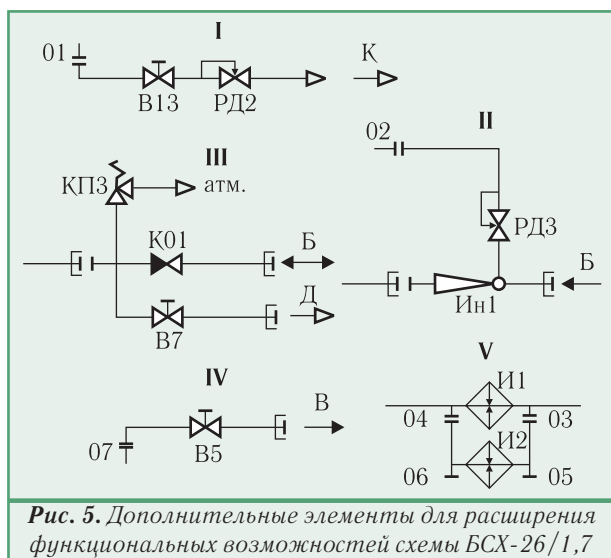


Рис. 5. Дополнительные элементы для расширения функциональных возможностей схемы БСХ-26/1,7

Одним из важнейших элементов инфраструктуры обеспечения СПГ потребителей являются автомобильные средства его доставки. В настоящее время предприятием разработаны и начинают поставляться транспортабельные цистерны объёмом 8 м³ с рабочим давлением 0,6 МПа, размещённые в кузове бортового автомобиля, автомобильные полуприцепы-цистерны объёмом 30 м³ с рабочим давлением 0,8 МПа для доставки потребителям криогенных продуктов, в том числе и СПГ.

Проблемой внедрения СПГ в транспортные, автомобильные и железнодорожные системы наши специалисты занимаются с 70-ых годов прошлого столетия. Были разработаны, изготовлены и поставлены заказчику криогенные газификаторы ПГХК-50-1,3/1,0 для магистрального тепловоза 2ТЭ116Г объёмом 50 м³, рабочим давлением 1,0 МПа, которые

обеспечивали требуемый для всех режимов эксплуатации расход метана в силовую установку тепловоза (максимальный расход — до 1300 м³/ч) [5].

Были также разработаны проекты автомобильных топливных баков для СПГ объёмом от 0,09 до 0,5 м³ [6].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как следует из вышеизложенного, нами может предлагаться заказчикам полный комплект технологического оборудования для получения, хранения, перевозки и газификации СПГ. Для этого имеются необходимый научно-технический потенциал, производственная база и предшествующий опыт создания и эксплуатации оборудования для СПГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технические средства криогенной инфраструктуры комплексов ожижения природного газа/ **Ю.В. Горбатский, А.М. Домашенко, А.Г. Лапшин и др.**// Труды 5-й научной конференции «Применение криогенных топлив в перспективных летательных аппаратах», Москва, РФ. — 2002. — С. 44-48.
2. Проблемы и перспективы создания инфраструктуры комплексов производства ожиженного природного газа/ **А.М. Домашенко, Ю.В. Горбатский, В.А. Передельский, Б.А. Скородумов**// Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2001. — № 12. — С. 17-19.
3. Оборудование для ожижения, хранения, транспортировки и газификации СПГ/ **А.М. Домашенко, М.А. Кузнецов, А.Г. Лапшин и др.**// Материалы конф. в рамках выставки «Газовая промышленность России. Актуальные аспекты-2006». — 2007. — С. 38-43
4. Системы и оборудование криогенных топлив/ **А.М. Домашенко, Ю.В. Горбатский, В.А. Передельский, Б.А. Скородумов**// Тяжелое машиностроение. — 2004. — № 12. — С. 24-27.
5. Разработка и исследование транспортных топливных систем сжиженного природного газа/ **А.М. Домашенко, Н.В. Филин, В.В. Костин, В.В. Нелидов**// Труды конф. по криогенной технике, Брно, Чешская республика. — 1992. — С. 81-83.
6. **Домашенко А.М., Дементьев А.Н., Костин В.В.** Дорожные испытания транспортной топливной системы сжижения природного газа// Сб. науч. трудов «Проблемы криогенной техники». — М.: НПО «Криогенмаш», 1988. — С. 99-105.