

УДК 621.59

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЁМКОСТИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ С КРИОГЕННОЙ ЗАПРАВКОЙ КАК ХРАНИЛИЩА-РЕГАЗИФИКАТОРА ДЛЯ АВТОНОМНЫХ КОМПЛЕКСОВ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

© 2011 Т. В. Ашихмина, Д. В. Сармин, Д. А. Угланов

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В статье проведён анализ возможных вариантов использования ёмкости с криогенной заправкой в составе автономного комплекса газоснабжения. Рассмотрены также особенности работы ёмкости с криогенной заправкой, описаны её достоинства и недостатки.

*Рабочее тело, криогенная заправка, процессы в баллоне, газификатор, топливный баллон.*

Всё более широкое распространение сжиженного природного газа (СПГ) стимулирует новые технические решения и технологии его использования, транспортировки, хранения, регазификации.

Наиболее доступными по реализации оказались разработки ёмкостей СПГ для большегрузных автомобилей, железнодорожного транспорта и автономных комплексов газоснабжения населённых пунктов и предприятий в случае нецелесообразности или невозможности их подключения к централизованным газопроводным сетям [1].

В настоящей публикации приводится оценка характеристик существующих ёмкостей и сопутствующего оборудования для СПГ и вновь предлагаемого баллона-регазификатора.

При отдельном рассмотрении использования СПГ для автомобилей, стационарных комплексов газоснабжения и железнодорожного транспорта можно отметить следующие особенности и проблемы.

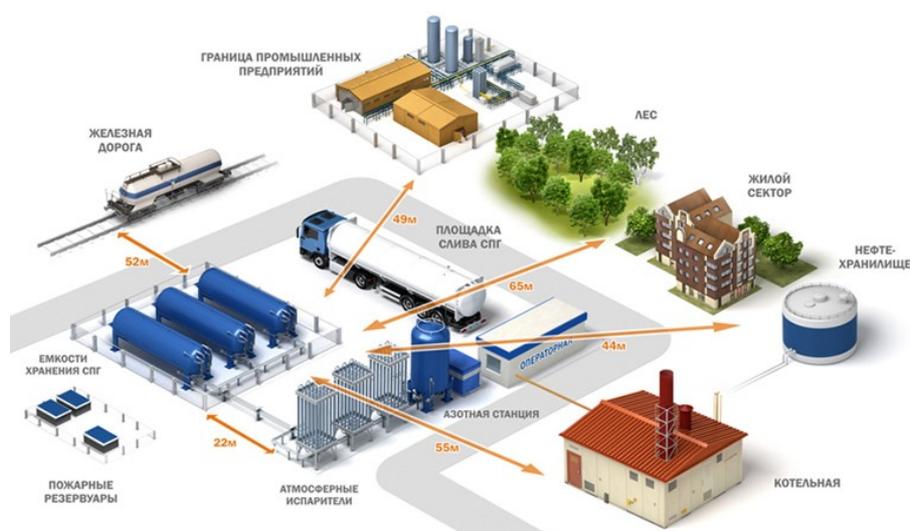


Рис. 1. Автономный комплекс газоснабжения с использованием СПГ

Таблица 1 - Технические характеристики стационарных ёмкостей хранения СПГ

Параметр	Объём, л	2	3	5	6	9	11	16	21	25	
Физический объём	л	2000	3400	4700	6100	8700	11200	15900	20700	25400	
Вместимость (90%)	л	1800	3060	4230	5490	7830	10080	14310	18630	22860	
Вместимость СПГ	кг	850	1440	1990	2590	3690	4740	6730	8760	10750	
Суточные потери СПГ	% сутки	0,45	0,39	0,29	0,28	0,25	0,24	0,22	0,21	0,19	
Масса ёмкости (19,6 МПа)	кг	2700	3400	4000	4700	6000	7000	8800	10600	12500	
Диаметр (D)	мм	1800					2200				
Ширина (A)	мм	2050					2200				
Глубина (H)	мм	2100					2240				
Высота (H)	мм	3140	3940	4960	5770	7600	6100	7930	9760	11590	

Что касается стационарных пунктов газоснабжения, то это наиболее проработанные проекты, уже сейчас практически реализованные. На рис.1 представлена схема общего вида такого объекта. В его состав входят: устройство слива СПГ; ёмкость хранения СПГ (единично 8–50 м<sup>3</sup>), суммарно до 250 м<sup>3</sup>; атмосферный регазификатор производительностью 50–4000 м<sup>3</sup>/ч; подогреватель газа (опционально), электрический взрывозащищённый или атмосферный; блок газорегулирующий; блок одоризации; система общестанционной автоматики; системы пожарной, охранной сигнализации, контроля загазованности, другие системы. В табл. 1 приведены характеристики некоторых ёмкостей для хранения СПГ.

На автотранспорте производители большегрузных автомобилей (Mercedes,

Volvo, Iveco) уже сегодня серьезно занимаются разработками в области СПГ и выпускают адаптированные под него автомобили-тягачи.

В табл. 2 приведены краткие характеристики автомобильных топливных баков для СПГ. Здесь следует отметить, что по сравнению с автомобильными топливными баллонами высокого давления наблюдается соотношение как 3 к 1 по пробегу в пользу СПГ.

Несколько отстаёт в плане реализации проектов использования СПГ железнодорожный транспорт. Он является одним из крупнейших потребителей нефтяного топлива в стране. На осуществление тяги поездов тепловозами расходуется примерно 3 млн.т дизельного топлива в год. Использование СПГ на тепловозах весьма выгодно.

Таблица 2 - Автомобильные топливные баки для СПГ

Тип	Диаметр сосуда	Длина сосуда	Объём сосуда
	м	м	л
SEMI-FNL HLNG-150 26*90 TPED	0,66	2,286	570
SEMI-FNL HLNG-103 26*66 TPED	0,66	1,676	390
SEMI-FNL HLNG-100 26*64 TPED	0,66	1,626	380
SEMI-FNL HLNG-97 24*71 TPED	0,61	1,804	368
SEMI-FNL HLNG-65 26*46 TPED	0,66	1,169	247
SEMI-FNL HLNG-52 26*40 TPED	0,66	1,016	197

Однако на практике для сжиженного газа требуется газодводяной теплообменник с системой подачи в него горячей во-

ды из дизеля. В связи с тепловой инерционностью теплообменника при резко переменных режимах нагрузки тепловоза

необходимо устанавливать резервную ёмкость для сжатого газа, что не позволяет полностью реализовать его преимущество по плотности.

Таким образом, каждое из агрегатных состояний имеет свои недостатки и поэтому выбор одного из них должен соотноситься с условиями эксплуатации тепловозов. Для магистрального тепловоза – это свои особенности, а для маневрового – совершенно иные. Так, на маневровых тепловозах, где число изменений режимов работы достигает 100 в час, применять сжиженный газ затруднительно из-за инерционности газификатора и поэтому на газотепловозах ТЭМ18Г применен сжатый природный газ. Запас его, возимый на тепловозе, составляет  $850 \text{ м}^3$  при давлении 20 МПа, что обеспечивает межзаправочный срок 2,5–3,0 сут.

Простота и относительно малая стоимость переоборудования тепловозного дизеля для работы на природном газе, сохранение мощности и топливной экономичности, обеспечение надёжности и удобства эксплуатации позволяют сделать вывод о целесообразности применения на тепловозных двигателях газодизельного цикла.

Работы по созданию газотепловозов в нашей стране начались в конце 1980-х годов. На Луганском тепловозостроительном заводе были построены три магистральных газотепловоза: два на базе тепловоза 2ТЭ10 и один на базе тепловоза 2ТЭ116, соответственно 2ТЭ10Г и 2ТЭ116Г. Газотепловозы имели тендерные секции с двумя криогенными ёмкостями, вмещающими 17 тонн сжиженного природного газа. В 1991 г. были проведе-

ны теплотехнические испытания газотепловоза 2ТЭ10Г, которые выявили ряд недостатков газодизеля 10ГД100Б и регазификатора.

Запуск газодизеля этих тепловозов и работа в режиме малых нагрузок осуществляются на дизельном топливе, после чего он переходит на газодизельный рабочий процесс. Запас газа обеспечивает беззаправочный пробег тепловоза в течение 2,5–3 сут. Удельный эквивалентный расход топлива на номинальной мощности на 3–5 % меньше соответствующего расхода при работе на дизельном топливе, токсичность выхлопных газов в 1,5–2 раза ниже. Эксплуатационные испытания на Московской железной дороге показали, что доля замещения дизельного топлива природным газом на этих газотепловозах в зависимости от рода маневровой работы составляет от 35 до 50%. На Свердловской дороге, где в настоящее время эксплуатируется газотепловоз ТЭМ18Г-001, доля замещения при работе тепловоза на газе в 2005 г. составила 44%. При этом расходы на приобретение моторного топлива снизились на 22%. Доходы от использования газотепловозов формируются в результате снижения эксплуатационных затрат на топливо и моторные масла, а также выплат за загрязнение окружающей среды.

В настоящее время в ОАО «Кузнецов» совместно с РЖД ведутся работы по созданию газотурбинного двигателя для силового блока газотурбовоза, работающего на сжиженном природном газе (СПГ), что позволит существенно повысить экономичность и снизить выбросы вредных веществ железнодорожных транспортных средств.

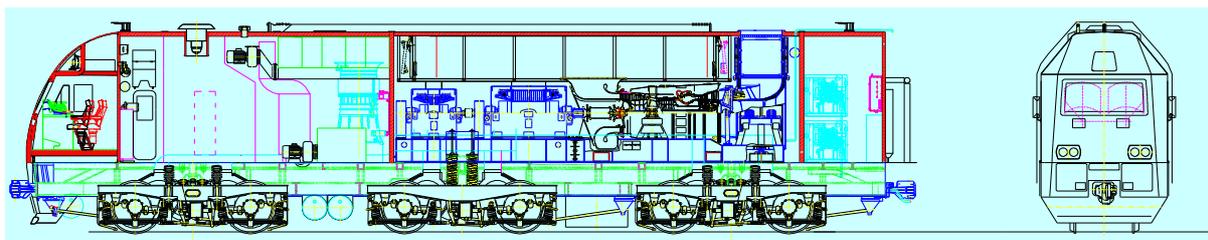


Рис.2. Газотурбовоз ГТ1-001

Газотурбовоз с газотурбинной установкой НК-361 должен снизить время движения в зависимости от профиля трассы на 10–20%, снизить суммарные эксплуатационные затраты в 1,8 раза и вредные выбросы с продуктами сгорания углеводородного топлива более, чем в 10 раз [5].

Газотурбовоз (рис. 2) состоит из двух секций. В одной размещаются турбина и силовой блок, в другой – ёмкость для криогенного топлива объемом 17 тонн. Одной заправки хватает на 750 км. Суммарная (максимальная) мощность газотурбовоза – 8300 кВт, общий вес – 300 тонн. Расход криогенного топлива составляет величину около 5160 кг/ч.

Анализ состава оборудования систем СПГ различного назначения свидетельствует о том, что для газотурбовоза и большегрузных автомобилей единственно приемлемым по запасу топлива является способ его использования из сжиженного состояния, т.е. из криогенных ёмкостей низкого давления.

Внутригородской грузовой автотранспорт вполне оправданно давно использует компримированный природный газ. Применение СПГ здесь пока невыгодно.

В стационарных автономных комплексах газоснабжения успешно используются известные системы транспортировки, хранения, газификации и выдачи топлива потребителю.

Маневровые газодизельные тепловозы могут иметь потребность как в газобаллонных системах высокого давления, так и в топливных баках с СПГ. Причём следует подчеркнуть, что во всех случаях СПГ требует регазификации и потребляется при различных давлениях. Так, например, для газового дизеля и ГТД природный газ должен быть сжат до давления подачи в двигатель. Для газопоршневого ДВС его давление подачи будет меньше, а для бытовой сети или котельной – самым низким.

Анализ показывает, что интересным и полезным в составе стационарных ком-

плексов было бы получение газа высокого давления. Это позволило бы осуществлять заправку газобаллонных автомобилей и технологических баллонов, например, сварочного производства. В принципе это возможно за счёт применения криогенного насоса и газификатора высокого давления. Но это усложняет и удорожает систему и не оправданно энергетически, так как из криогенно-жидкого состояния можно получить газ высокого давления за счёт естественной регазификации и термокомпримирования в изохорном процессе.

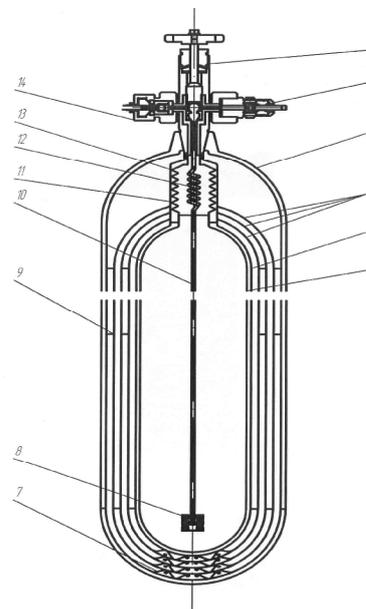


Рис. 3. Универсальный газовый баллон:  
 1 - вентиль запорный; 2 – клапан предохранительный; 3 – баллон; 4 – изоляция; 5 – изоляция внутренней ёмкости; 6 – внутренняя ёмкость; 7 - проставки опорные; 8 - фильтр; 9 – проставки радиальные; 10 – стакан; 11 - трубка заправочная; 12 – змеевик; 13 - сиффон; 14 – штуцер

Примером совмещения технологии и газификации является устройство, описанное в патенте «Топливный баллон» [3]. На рис.3 представлен эскиз баллона по этому патенту. Такое устройство позволит создать систему регазификации, которая содержит: ёмкость, заправляемую криогенным продуктом, и внешний испаритель атмосферного типа или с принудительным нагревом. Криогенный продукт, поступая из ёмкости в испаритель, газифицируется и поступает в саму ёмкость в газообразном виде. При этом давление и темпера-

тура в ёмкости достигают либо любых заранее заданных, либо номинальных значений, соответствующих параметрам в обычной заправочной ёмкости высокого давления.

В данной работе представлен сравнительный анализ работы стандартного газификатора (рис. 4) и газификатора на основе ёмкости с криогенной заправкой (рис. 5). Первый газификатор для прокачки жидкости использует погружной плунжерный насос. Для работы по такой схеме требуется обеспечивать насосом высокое давление, так как это необходимо для подачи газифицированного продукта в ёмкость высокого давления.

С другой стороны, представляется перспективным использование газификатора на основе ёмкости с криогенной заправкой в составе комплекса газоснабжения с использованием СПГ (см. рис.1). При этом он может обеспечивать как заправку баллонов газообразным продуктом, так и выполнять функции ёмкости высокого давления, обеспечивая постоянный расход газа в сеть, а также быть источником высокого давления газа для нужд самой станции. Существует возможность использования предлагаемой ёмкости в составе топливной системы маневрового тепловоза как ёмкости, которая обеспечивает универсальную заправку как компримированным газом, так и криогенной жидкостью. При этом в последнем случае такая система позволит переводить

криогенное топливо в газ и использовать его как топливо при требуемом давлении.

Рассматривая применение такой ёмкости как газификатора, можно отметить следующее. Холодный газификатор (рис.4) для регазификации СПГ в атмосферных испарителях использует тепло окружающей среды и практически не потребляет дополнительного тепла. СПГ подается насосом высокого давления (20...25 МПа), после чего поступает в атмосферный теплообменник высокого давления и рампу-ресивер. Основные энергозатраты приходятся на насос высокого давления, потребляемая мощность которого составляет 25 кВт (при расходе 50 л/мин), среднее время работы – 10...16 ч в сутки.

Предварительные сравнительные расчёты показали, что для заправочной станции-газификатора на основе ёмкости с криогенной заправкой (представленная на рис.5 и имеющая расход криогенного продукта 50 л/мин) требуется насос, мощность которого должна составлять около 1 кВт. Относительно малая мощность обусловлена только гидравлическим сопротивлением теплообменника, так как давление в наполняемой газовой полости должно быть равно давлению в ёмкости.

Анализ и расчёты доказывают возможность и перспективность использования ёмкости с криогенной заправкой как в составе стационарного комплекса газоснабжения, так как и в качестве топливного баллона для энергетических установок.

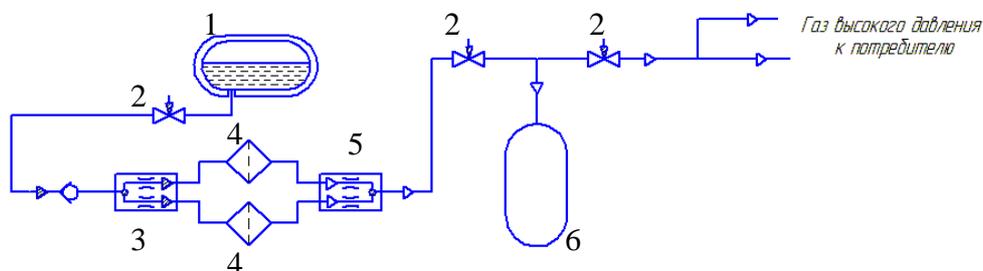


Рис. 4. Газозаправочная станция:

1 – ёмкость для хранения криогенной жидкости; 2 – вентиль; 3 - распределитель жидкости; 4 - теплообменники-испарители атмосферного типа; 5 - распределитель газа; 6 – заправочный баллон

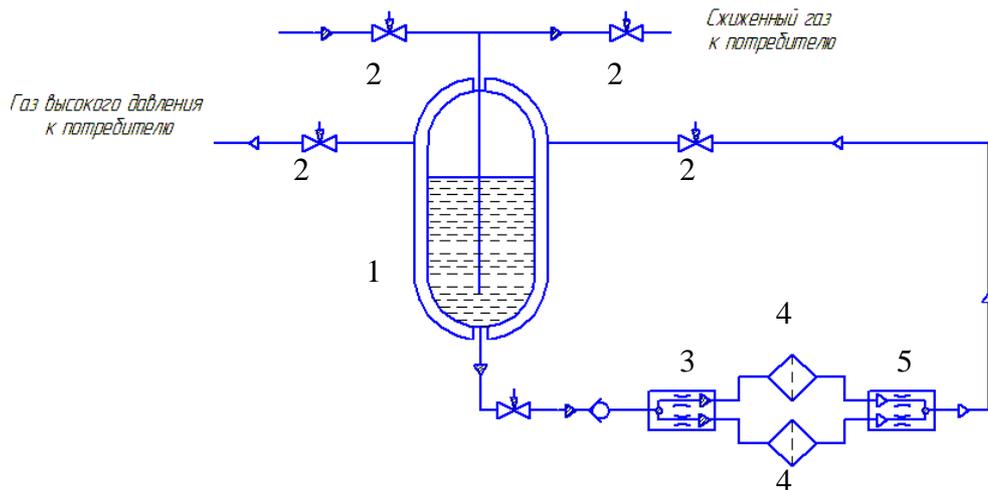


Рис. 5. Газозаправочная станция на основе универсального газового баллона:  
 1 – ёмкость для хранения криогенной жидкости; 2 – вентиль; 3 – распределитель жидкости;  
 4 – теплообменники-испарители атмосферного типа; 5 – распределитель газа

### Библиографический список

1. Микулин, Е.И. Криогенная техника [Текст] / Е.И. Микулин – М.: Машиностроение, 1969. – 512 с.

2. Архаров, А.М. Криогенные заправочные системы стартовых ракетно-космических комплексов [Текст] / А.М. Архаров, И.Д. Кунис. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 252 с.

3. Пат. 2163699, Российская Федерация, МПК 7F17C9/02/. Топливный баллон [Текст] /Довгялло А. И., Лукачев С. В. [и др.]; заявитель и патентообладатель СГАУ. – №9911457706; заявл. 02.07.1997, опубл. 27.02.2001. Бюл. № 6.

4. Ашихмина, Т.В. Особенности постановки задачи расчёта процессов для универсального газового баллона как неклассической двухфазной системы и оценка его температурного состояния [Текст] / Т.В. Ашихмина, А. И. Довгялло. // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. - №1. - С. 133-137.

5. Федорченко, Д.Г. Газотурбинный двигатель НК-361 – основа силового блока первого отечественного локомотива на СПГ [Текст] / Д.Г. Федорченко, И. Н. Рыжинский // Марка НК на службе топливно-энергетического комплекса: сб. науч. статей. - Самара, 2011. - С. 117-147.

## USING A HIGH-PRESSURE VESSEL WITH CRYOGENIC REFUELLING AS A STORAGE REGASIFIER FOR AUTONOMOUS COMPLEXES OF GAS SUPPLYING AND RAILWAY TRANSPORT

© 2011 T. V. Ashikhmina, D. V. Sarmin, D. A. Uglanov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
 (National Research University)

The analysis of possible ways of using a vessel with cryogenic preparation incorporated into an autonomous gas supply complex is given in the paper. The peculiarities of operating the vessel with cryogenic refueling as well as its advantages and drawbacks are also discussed.

*Cryogenic refueling, processes in a cylinder, gasifier.*

### **Информация об авторах**

**Ашихмина Татьяна Витальевна**, ассистент кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [d.a.i@mail.ru](mailto:d.a.i@mail.ru). Область научных интересов: рабочие процессы тепловых и холодильных машин, бортовая энергетика, энергосбережение.

**Сармин Дмитрий Викторович**, аспирант кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [sarmin.d.v@mail.ru](mailto:sarmin.d.v@mail.ru). Область научных интересов: рабочие процессы тепловых и холодильных машин, бортовая энергетика, энергосбережение.

**Угланов Дмитрий Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [dmitry.uglanov@mail.ru](mailto:dmitry.uglanov@mail.ru). Область научных интересов: рабочие процессы тепловых и холодильных машин, бортовая энергетика, энергосбережение.

**Ashikhmina Tatyana Vitalyevna**, assistant of the department of aircraft engine production, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), e-mail: [d.a.i@mail.ru](mailto:d.a.i@mail.ru). Area of research: working processes of heat engines and refrigerators, airborne power engineering, energy saving.

**Sarmin Dmitriy Viktorovich**, post-graduate student of the department of heat engineering and heat engines, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), e-mail: [sarmin.d.v@mail.ru](mailto:sarmin.d.v@mail.ru). Area of research: working processes of heat engines and refrigerators, airborne power engineering, energy saving.

**Uglanov Dmitriy Aleksandrovich**, candidate of technical science, associate professor of the department of heat engineering and heat engines, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), e-mail: [dmitry.uglanov@mail.ru](mailto:dmitry.uglanov@mail.ru). Area of research: working processes of heat engines and refrigerators, airborne power engineering, energy saving.