

УДК 621.56

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ЦИСТЕРНЫ ДЛЯ ДОСТАВКИ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Медведева О.Н.¹, Фролов В.О.

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
г. Саратов, e-mail: ¹medvedeva-on@mail.ru*

Аннотация. *Сдерживающим фактором для организации газоснабжения всех регионов страны являются транспортные проблемы. Сжиженный природный газ (СПГ) является экологически чистым и безопасным видом топлива, что открывает широкие перспективы его использования в промышленности, на транспорте и в жилищно-коммунальном хозяйстве. В статье предлагается проект модернизации модели автомобильной криогенной цистерны для доставки природного газа потребителям в сжиженном виде. Данная модель имеет существенные отличия от используемых в настоящее время в системах транспорта природного газа.*

Ключевые слова: *сжиженный природный газ, криогенная цистерна, хладоноситель, децентрализованное газоснабжение, модернизация*

Сжиженный природный газ является высокотехнологичным и эффективным энергоносителем. Его транспортировка и хранение происходит при атмосферном или небольшом избыточном давлении в изотермических емкостях. Он имеет низкую температуру кипения, что обуславливает его газификацию за счет тепла окружающей среды и подачу в газораспределительную сеть потребителей в газообразной форме, сохраняя теплотворную способность исходного сырья – природного газа.

Как показывают исследования, газификацию населенных пунктов, находящихся на большом расстоянии от магистральных газопроводов (куда невозможно или экономически невыгодно тянуть газопроводы-отводы), целесообразней проводить с использованием СПГ. Традиционно в современных системах децентрализованного газоснабжения используется сжиженный углеводородный газ (СУГ), однако его производство является сопутствующим с нефтеперерабатывающим производством. Производство СУГ на НПЗ достаточно сложный, трудоемкий и дорогостоящий процесс, поэтому цена на сжиженный пропан-бутан, в отличие от сетевого природного газа, приближается к мировым ценам. СУГ практически не используется как топливо для котельных и промышленных установок из-за ограниченных объемов производства в России. Кроме этого, он является ценнейшим сырьем для химической промышленности, а использование газа с повышенным содержанием бутана в зимнее время влечет за собой ряд технических проблем (гидратообразование, конденсатообразование, снижение испарительной способности, затруднение в проведении сливо-наливных операций и т.д.). Наконец, наиболее веским доводом замены СУГ на СПГ является его большая сравнительная

себестоимость. По данным, приведенным в [1], в центральных районах России СУГ дороже СПГ (в сопоставляемых технологических условиях) в $1,3 \div 1,6$ раза, а в районах Урала и Сибири – в $2,5 \div 3$ раза. Таким образом, для решения социальной задачи – обеспечения населения газовым топливом – следует соединить преимущества природного газа с преимуществами его доставки в сжиженном виде на дальние расстояния, и такой альтернативой может стать сжиженный природный газ (СПГ).

Для оптимального функционирования всего комплекса СПГ необходимо наладить четкое взаимодействие между его основными составляющими. В состав комплексов СПГ входят: комплексы по сжижению природного газа, хранилища и средства выдачи сжиженного газа, средства для транспортировки СПГ, хранилища газа у потребителей, газификаторы, криогенная арматура, оборудование газораспределения.

Средства для транспортировки сжиженного газа потребителю являются важным и капиталоемким звеном в технологической цепи транспорта природного газа. В данной работе предлагается проект модернизации транспортной криогенной цистерны [2].

Наиболее близкой к предлагаемой разработке является автомобильная цистерна для хранения и транспортирования сжиженного природного газа, разработанная ПК НПФ «ЭКИП». Цистерна для хранения и транспортирования сжиженного природного газа состоит из основной оболочки, которая крепится на автомобильной платформе, на внутренней поверхности основной оболочки подвешивается сосуд, предназначенный для перевозки сжиженного природного газа; пространство между основной оболочкой и сосудом заполнено изолирующим материалом. Цистерна также используется для приема, временного хранения, транспортировки и выдачи СПГ потребителям.

Авторами статьи предлагается улучшить эксплуатационные возможности цистерны путем уменьшения теплопередачи к перевозимому сжиженному природному газу и более рационально использовать холод СПГ. Техническим результатом, достигаемым при решении поставленной задачи, является то, что объем сосуда используется для перевозки сжиженного природного газа при доставке его до потребителя, и для транспортировки жидкостей, имеющих высокую, относительно окружающего воздуха, температуру кипения и температуру плавления, сопоставимую с температурой кипения перевозимого сжиженного природного газа при криогенных температурах (хладоносителей) от пункта регазификации до пунктов сжижения.

Поставленная задача достигается тем, что в автомобильной цистерне для транспортирования сжиженного природного газа, содержащей основную оболочку, закрепленную на автомобильной платформе, внутри которой размещен сосуд для перевозки СПГ, а пространство между основной оболочкой и сосудом запол-

нено изолирующим материалом согласно предлагаемому решению, между основной оболочкой и сосудом для перевозки СПГ установлена и закреплена дополнительная оболочка, а пространство между основной и дополнительной оболочкой используют для перевозки жидкостей, имеющих температуру кипения выше температуры окружающего воздуха, и температуру плавления, сопоставимую с температурой кипения перевозимого сжиженного природного газа, а пространство между дополнительной оболочкой и сосудом заполнено изолирующим материалом [2]. Схема цистерны представлена на рис. 1.

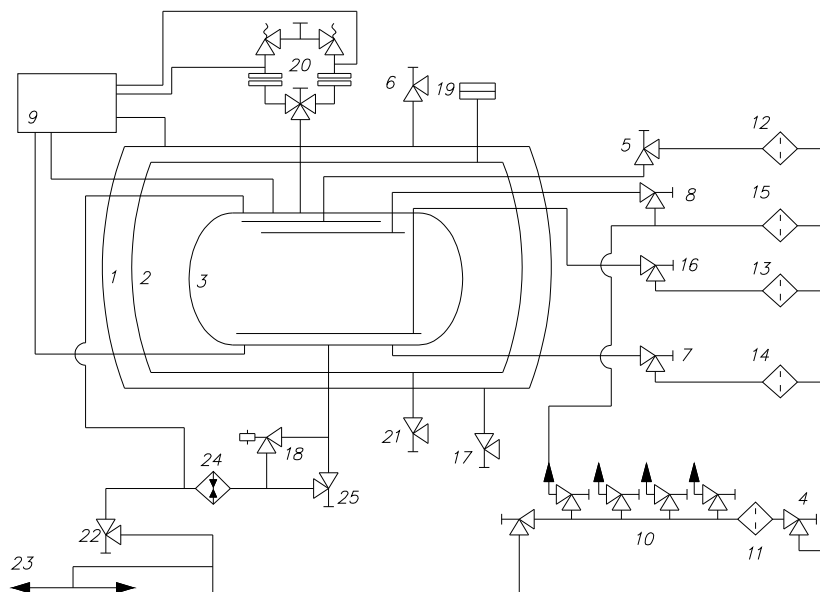


Рис. 1. Схема криогенной цистерны:

- 1 – наружная оболочка; 2 – дополнительная оболочка; 3 – сосуд;
- 4 – вентиль «наддув азотом»; 5 – вентиль «наддув-газосброс»;
- 6 – вентиль «газосброс»; 7 – вентиль «выдача в сторонний насос»;
- 8 – вентиль «байпас»; 9 – щит приборов; 10 – вентили «продувка-сброс»;
- 11 – фильтр для азота; 12, 13, 14, 15 – фильтры; 16 – вентиль «наполнение-слив СПГ»;
- 17 – вентиль «наполнение-слив хладоносителя»; 18 – электроклапан «СПГ в испаритель»;
- 19 – мембранный предохранитель дополнительной оболочки;
- 20 – предохранительное устройство сосуда; 21 – вентиль «вакуумирование»;
- 22 – вентиль «газосброс через безопасное дренажное устройство (БДУ)»;
- 23 – БДУ; 24 – испаритель; 25 – вентиль «СПГ в испаритель»

Цистерна включает в себя наружную оболочку, выполненную из стальных цилиндрических обечаек и эллиптических днищ, соединенных на сварке. Наружную оболочку крепят на автомобильной либо железнодорожной платформе. На внутренней поверхности наружной оболочки предусмотрены кронштейны для крепления цепей и опоры для подвешивания дополнительной оболочки.

Дополнительная оболочка представляет собой сварную конструкцию из стальных обечаек и эллиптических днищ. Пространство между основной и дополнительной оболочками используют для перевозки жидкостей (хладоносителей)

имеющих высокую, относительно окружающего воздуха, температуру кипения, и температуру плавления, сопоставимую с температурой кипения перевозимого сжиженного природного газа. К внутренней поверхности дополнительной оболочки с помощью опор и кронштейнов крепят сосуд, предназначенный для перевозки сжиженного природного газа.

Сосуд выполнен в виде сварной конструкции из цилиндрических обечаек и эллиптических днищ, изготовленных из сталей с содержанием никеля или из алюминиевых сплавов. Пространство между дополнительной оболочкой и сосудом заполняют теплоизолирующим материалом, в качестве которого может выступать вакуумная слоистая изоляция или вакуумная порошковая изоляция. Цистерна снабжена запорно-регулирующей арматурой, предназначенной для управления процессами отключения, распределения, сброса потоков рабочих сред путем изменения площади проходного сечения, которая включает в себя вентиль «наддув азотом», вентиль «наддув-газосброс», вентиль «газосброс», вентиль «выдача в сторонний насос», вентиль «байпас»; контрольно-измерительными приборами для получения значений измеряемых величин в установленном диапазоне, которые расположены на щите приборов; оборудованием для очистки, которое включает в себя вентили «продувка-сброс», фильтры; оборудованием для проведения сливо-наливных операций, которое включает в себя вентиль «наполнение-слив СПГ» и вентиль «наполнение-слив хладоносителя». Для автоматического поддержания давления в контролируемом участке используют электроклапан «СПГ в испаритель». Цистерна оборудована средствами безопасности, такими как: мембранный предохранитель дополнительной оболочки и предохранительное устройство сосуда. Вентиль «вакуумирование» используют для создания вакуума в изолирующем материале. Безопасный сброс паров СПГ осуществляют через открытый вентиль «газосброс через БДУ» и безопасное дренажное устройство (БДУ). Также в цистерне установлено испарительное оборудование для нагрева и испарения природного газа: испаритель и вентиль «СПГ в испаритель». Заполнение цистерны производят на специально оборудованных площадках.

Цистерна работает следующим образом:

1 этап. *Подготовка цистерны к наливу.* На первом этапе проверяют техническое состояние составных частей цистерны, производят контроль газовой среды сосуда для установления залитой ранее жидкой фазы СПГ, затем цистерну отогревают. Через вентиль «наддув азотом» и фильтр для азота в цистерну подают газобразный азот при температуре выше температуры кипения хладоносителя. С помощью вентиля «продувка-сброс» осуществляют продувку азотом и сброс азота в окружающую среду. Сброс охлажденного газа производят через вентиль «наддув-газосброс» и фильтр 12, затем происходит стыковка с внешними коммуникациями, после чего цистерну подают на второй этап.

2 этап. *Налив жидкой фазы СПГ*. В сосуд через фильтр 13 и открытый вентиль «наполнение-слив СПГ» передавливанием из сторонней емкости подают сжиженный природный газ, при этом вентиль «наддув-газосброс» 5, через который осуществляют газосброс, открыт. Перед наполнением производят захлаживание сосуда и коммуникаций путем подачи небольшого количества СПГ. Количество СПГ и давление в сосуде контролируют с помощью приборов, расположенных на панели щита приборов. После наполнения сосуда вентили «наддув-газосброс» 5 и «наполнение-слив» 16 закрывают и производят выдержку для испарения СПГ в коммуникациях и сброса в них давления. После выдержки отстыковывают внешние коммуникации. Через вентиль «наполнение-слив хладоносителя» 17 проводят наполнение полости между наружной оболочкой и дополнительной оболочкой. Газосброс при наполнении осуществляют через открытый вентиль «газосброс» 6.

3 этап. *Транспортировка*. Транспортировку производят при открытом вентиле «наддув-газосброс» 5. Давление в сосуде при транспортировке поддерживают автоматически с помощью электроклапана «СПГ в испаритель» и испарителя. На линии так же предусмотрен ручной вентиль «СПГ в испаритель» 25, с помощью которого вручную регулируют давление в сосуде.

4 этап. *Слив СПГ*. Слив СПГ производят либо в стороннюю емкость, либо путем выдачи природного газа. Слив СПГ производят под избыточным давлением его газообразной фазы через открытый вентиль «наполнение-слив СПГ» 16. Избыточное давление создают либо с помощью паров СПГ, поступающих от испарителя, либо от стороннего источника, подключенного к линии наддува-газосброса через вентиль «наддув-газосброс» 5. В процессе слива СПГ по щиту приборов контролируют давление и количество СПГ. Хладоноситель из полости через открытый вентиль «наполнение-слив хладоносителя» сливают с помощью дополнительно подключенного стороннего насоса. При этом вентиль «газосброс» 6 открыт. Затем производят отогрев цистерны. Существует возможность выдачи СПГ с помощью дополнительно подключенного стороннего насоса через вентиль «выдача в сторонний насос» и фильтр, а также газосброс через открытый вентиль «байпас» и фильтр.

5 этап. *Налив, транспортировка и слив хладоносителя*. Налив, транспортировку и слив хладоносителя производят в той же последовательности, что и для жидкой фазы СПГ. После слива хладоносителя цистерну подают на отогрев.

Одной из важных задач для реализации предлагаемой схемы является подбор хладоносителя. Основными требованиями, предъявляемыми к хладоносителю, являются: низкая температура плавления, близкая к температуре сжиженного природного газа, и относительно высокая температура кипения, которая позволяла бы транспортировать хладоноситель в жидком состоянии без устройства дополнительной наружной тепловой изоляции. Так же хладоноситель должен

быть не агрессивен к материалу цистерны, и оставаться стабильным на весь период эксплуатации. Свойства проанализированных веществ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Свойства хладоносителей

Название вещества	Температура кипения, °С	Температура плавления, °С
Диэтиловый эфир	35,6	-116,3
Диметиловый эфир	-24,9	-138,5
Изопентан	28	-160,6
Изобутан	-11,7	-159,6

Из перечисленных веществ наиболее подходящим является изопентан (табл. 2).

Таблица 2. Основные физические свойства изопентана

Наименование величины	Значение
Химическая формула	$\text{CH}_3\text{-CH}(\text{CH}_3)\text{-CH}_2\text{-CH}_3$
Температура плавления, $T_{\text{пл}}$	-160,6 °С
Температура кипения, $T_{\text{кип}}$	28 °С
Плотность в жидком состоянии,	625 кг/м ³
Изобарная теплоемкость в газовом состоянии,	1450 Дж/(кг ³ К)
Фактор ацентричности Питцера,	0,208
Газовая постоянная, R	115 Дж/(кг ³ К)
Критическое давление, $P_{\text{кр}}$	461 К
Критическая температура, $T_{\text{кр}}$	3,3 МПа

Проведем расчет необходимого количества хладоносителя. Для определения теплоемкости хладоносителя в жидком состоянии воспользуемся уравнением Роулинсона-Бонди:

$$\frac{c_p - c_p^0}{R} = 2,56 + 0,436(1 - \tau)^{-1} + \omega \left[2,91 + \frac{4,28(1 - \tau)^{\frac{1}{3}}}{\tau} + 0,296(1 - \tau)^{-1} \right], \quad (1)$$

где $\tau = \frac{T}{T_{\text{кр}}}$ – приведенная температура.

В результате расчетов получим значение ориентировочной средней теплоемкости $c_p = 2,14 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$. Количество тепла необходимое для испарения 16 м³ СПГ составляет 3486 МДж. Следовательно, для испарения 16 м³ СПГ потребуется хладоноситель в количестве:

$$m = \frac{Q_{\text{исп}}^{\text{СПГ}}}{c_p (T_2 - T_1)} = \frac{3486037}{2,14(298 - 115)} = 8901,6 \text{ кг}.$$

На рис. 2 представлен разрез криогенной цистерны.

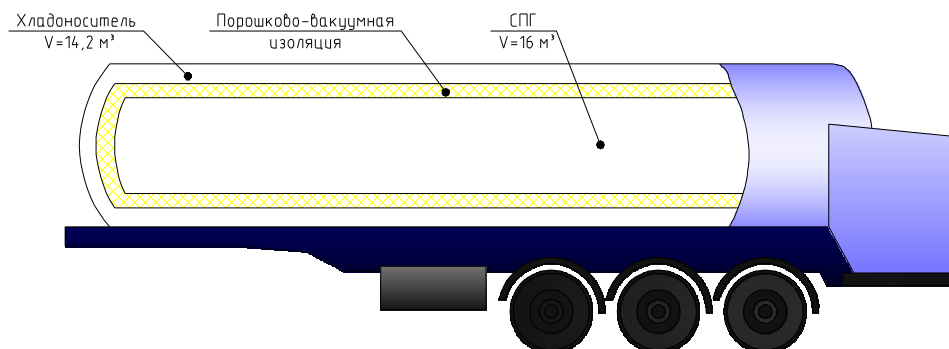


Рис. 2. Разрез криогенной цистерны

Преимущества предлагаемой модернизации криогенной цистерны:

1. Цистерна осуществляет прием, хранение, выдачу и транспортировку сжиженного природного газа различными видами транспорта и обеспечивает полную сохранность продукции, минимальные потери при испарении при многократном использовании в различных погодных условиях. Так как при получении даже не-большого количества теплоты от окружающей среды, жидкая фаза СПГ частично переходит в газообразную форму, это приводит к утечкам газа. Предлагаемая конструкция цистерны снижает подобные потери до минимума.

2. Применение предлагаемой цистерны позволяет наладить бесперебойное снабжение СПГ потребителей, расположенных в отдаленных регионах РФ.

3. При работе установки не происходит никаких химических реакций и не выделяются ни вредные вещества, ни тепло.

Литература

1. Крылов Е.В. Газоснабжение сжиженным природным газом. Саратов: СГАУ, 2003. 156 с.

2. Патент № 115309 РФ. Цистерна для транспортировки сжиженного природного газа / Медведева О.Н., Фролов В.О. Заявл.: 21.07.2011. Публ.: 27.04.2012.

DEVELOPMENT OF THE CONSTRUCTION OF AUTOMOBILE CISTERN FOR THE DELIVERY OF THE LIQUEFIED NATURAL GAS

O.N. Medvedeva¹, V.O. Frolov

Gagarin Saratov State Technical University, Saratov, Russia

e-mail: ¹medvedeva-on@mail.ru

Abstract. *Transport problems are deterrent factor for organizing the gas supply of all regions of the country. Liquefied natural gas (LPG) is the ecologically pure and safe form of fuel, which opens the wide prospects for its use in the industry, in the field of transportation and in the housing and utilities economy. In the article the design of the modernization of the model of automobile cryogenic cistern is proposed for the delivery of natural gas to users in the liquified form. This model has essential differences from those utilized at present in the systems of the transport of natural gas.*

Keywords: *liquefied natural gas, cryogenic cistern, coolant, decentralized gas supply, modernization*

References

Krylov E.V. Gazosnabzhenie szhizhennym prirodnyim gazom (Gas supply by the liquefied natural gas). Saratov, SGAU, 2003. 156p.

3. Patent № 115309 RU. Tsisterna dlya transportirovki szhizhennogo prirodnogo gaza (Cistern for the transport of the liquefied natural gas). Medvedeva O.N., Frolov V.O. Appl.: 21.07.2011. Publ.: 27.04.2012.