

Перспектива развития транспортных средств для сжиженного природного газа

© О.Я. Черемных

Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, Нижний Тагил, 622034, Россия

Разработано современное транспортное средство транспортировки сжиженного природного газа (СПГ) для реализации современных перспективных криогенных технологий, используемых в ракетно-космической, авиационной и других отраслях промышленности. Проведен поиск оптимальных решений при выборе конструкции силовых элементов узла сосуд — оболочка — рама вагона-цистерны и контейнера-цистерны, что обеспечило надежную работу транспортных средств при их эксплуатации. Обоснованы решения по выбору и разработке комплекса защитных запорно-предохранительных устройств и скоростных клапанов, предназначенных для предотвращения аварийных ситуаций при эксплуатации транспортных средств. На основе проведенных исследований предложен способ хранения сжиженного природного газа в емкости транспортного средства, обеспечивающий безопасный сброс паров СПГ из емкости в атмосферу в условиях железнодорожных и автомобильных транспортных путей. Представлена технология слива из емкости транспортного средства у потребителя СПГ, обеспечивающая минимальные сбросы паров СПГ в атмосферу. Впервые приведены описание и технические характеристики перспективных транспортных изделий — вагона-цистерны для СПГ и этилена объемом 40 м³.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, вагон-цистерна, автомобильная цистерна, контейнер-цистерна, транспортировка, система безопасных дренажных устройств, волокнисто-вакуумная, экранно-вакуумная теплоизоляция, платформа-контейнеровоз, железнодорожная платформа

Введение. В конце 1990-х годов на ряде предприятий космической отрасли был разработан коммерческий ракетно-космический комплекс «Рикша» на компонентах топлива кислород — сжиженный газ (СПГ) с выведением полезной нагрузки массой до 1,7 т на низкую околоземную орбиту [1].

Для транспортировки СПГ на стартовый комплекс используются автомобильные транспортировщики, железнодорожные вагоны-цистерны, специальные контейнеры-цистерны разработки ОАО «Уралкриомаш» [2, 3]. Технические характеристики транспортного средства в этом случае определяются инфраструктурой транспортного комплекса.

ОАО «Уралкриомаш» в период 1979–1981 гг. занималось разработкой железнодорожной цистерны для перевозки жидкого этилена, на базе которой в дальнейшем предполагалось создать вагон-цистерну для транспортировки СПГ модели 15-147У. На базе автоцис-

терны для транспортировки жидкого водорода была поставлена задача создать транспортное средство для доставки и заправки СПГ летающей лаборатории ТУ-155 в условиях аэродрома [4].

При решении этих задач приоритетными являлись следующие направления:

- выбор конструкции и теплоизоляции транспортных средств для обеспечения требования по совокупности параметров технического задания (габаритные размеры, масса перевозимого продукта, рабочее давление в сосуде, суточные потери СПГ от испарения, время бездренажной транспортировки продукта);

- определение конструктивного исполнения силовых элементов узлов цистерны (сосуд, оболочка, рама платформы), обеспечивающих восприятие ударных нагрузок в условиях эксплуатации на железнодорожных магистралях, автодорогах и морских перевозках;

- решение одного из проблемных вопросов — определение длительности бездренажной транспортировки в процессе перевозки СПГ, так как, во-первых, сброс паров метана из емкости цистерны можно осуществлять только на специально оборудованных площадках, железнодорожных тупиках или оборудованных автомобильных стоянках; во-вторых, сброс сопровождается потерей продукта. Решение этого вопроса связано как с выбором теплоизоляции, так и с разработкой технологии транспортировки СПГ от завода — производителя продукта до потребителя [5, 6].

Международный морской кодекс по опасным грузам, Международные правила перевозки опасных грузов по железным дорогам, Европейское соглашение о международной перевозке опасных грузов [7–9] при перевозке и сливе СПГ в транспортных средствах предусматривают наличие в их конструкции следующих защитных устройств:

- запорно-предохранительного устройства, предназначенного для отсечки магистрали слива посредством автоматического ее закрывания при случайном (несанкционированном) передвижении транспортного средства во время слива;

- запорно-предохранительное устройство совместно с противопожарным приводом, обеспечивающим перекрытие сливной магистрали в случае возникновения пожара в районе работ по сливу СПГ;

- скоростного клапана, используемого для перекрытия магистрали слива при разгерметизации коммуникаций слива у потребителя.

В связи с приведенными требованиями разработке и исследованию работоспособности этих средств, исключающих возникновение пожароопасной ситуации при сливе СПГ из транспортной цистерны, придается большое значение.

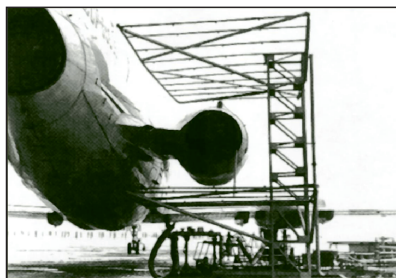
Цель настоящей работы — анализ конструктивных особенностей, технологии транспортировки и безопасной эксплуатации применяе-

мых транспортных средств для доставки потребителям СПГ и на основе полученных результатов разработка требований по улучшению технических характеристик новых транспортных средств для транспортировки СПГ.

Транспортировка СПГ в автоцистернах. Одними из первых в СССР на возможность использования СПГ в качестве моторного топлива обратили внимание специалисты авиационной промышленности. 27 марта 1979 г. вышло Постановление Совета министров СССР о создании летающей лаборатории ТУ-155, один из трех двигателей которой должен был работать на жидком водороде или авиационно-метановом топливе (АМТ) [10]. Разработать наземную систему заправки на базе автомобильных транспортировщиков жидкого водорода модели 11Г729 производства ОАО «Уралкриомаш» и бортовой бак самолета было поручено АНТК им. А.Н. Туполева. Автомобильные транспортировщики-заправщики успешно использовались при отработке системы заправки водородом ракеты-носителя Н1 для Лунной программы. После доработки отдельных узлов транспортировщика (безопасного дренажного устройства, блока контроля параметров криогенного АМТ) агрегат 11Г729 был допущен к транспортировке СПГ с завода — поставщика продукта (г. Видное, Московская обл.) до летно-испытательной базы в г. Жуковский Московской обл. (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Автомобильная цистерна модели 11Г729 для транспортировки СПГ (*а*) и заправки летающей лаборатории ТУ-155 (*б*)

Успешная заправка летающей лаборатории и последующий испытательный полет самолета ТУ-155 на СПГ (АМТ) впервые продемонстрировали возможность и преимущества использования СПГ в качестве моторного топлива в авиации [10, 11], ракетно-космической технике [12] и на железнодорожном транспорте. Опыт эксплуатации агрегата 11Г729 на АМТ был положен в основу проектирования и создания вновь разрабатываемых транспортных средств для хранения и перевозки СПГ.

Для заправки самолетов АМТ и разгонных блоков ракетно-космических систем СПГ на стартовом комплексе предпочтительно ис-

пользовать автомобильные заправщики. При этом следует учитывать, что завод по производству СПГ должен находиться в пределах космического (авиационного) комплекса, а заправка горючего в летательный аппарат должна осуществляться небольшими объемами. Так, для летающей лаборатории ТУ-155 при объеме бака $17,5 \text{ м}^3$ масса заправляемого СПГ составляла 6,5 т, что обеспечивалось тремя транспортировщиками-заправщиками 11Т729 полезным объемом 8 м^3 каждый и массой СПГ 2640 кг.

По техническому заданию ООО «Криогаз» (Лентрансгаз, С.-Петербург) была разработана конструкторская документация на автомобильную цистерну для хранения и транспортировки СПГ объемом 30 м^3 с рабочим давлением 0,7 МПа (рис. 2).



Рис. 2. Автомобильная цистерна объемом 30 м^3 для транспортировки СПГ

Техническая характеристика автомобильной цистерны

Геометрический объем сосуда, м^3	30,0
Рабочее давление в сосуде, МПа	0,7
Перевозимая масса СПГ, кг	11 340
Тип изоляции	Волокнисто-вакуумная
Суточные потери СПГ	
при транспортировке, %	Не более 0,43
Время бездренажного хранения при транспортировке при давлении 0,03...0,65 МПа, сут.....	7
Способ слива продукта.....	Надув испарителем

Однако отсутствие в то время финансирования не позволило запустить данную модель транспортного средства в серийное производство.

Испанская фирма Ros Roca Indox изготавливает автоцистерны для транспортировки СПГ объемом $54...56 \text{ м}^3$ как с порошково-вакуумной теплоизоляцией сосуда емкости, так и с пенополиуретановой теплоизоляцией. Однако при бесспорном преимуществе по цене время бездренажной транспортировки для автоцистерн составляет не более 7 сут, что является существенным недостатком.

Транспортировка СПГ вагонами-цистернами. Впервые в СССР вопрос транспортировки СПГ вагонами-цистернами был поставлен в связи с попыткой перевести железнодорожные локомотивы (тепловозы) на СПГ в начале 1980-х годов. «Уралкриомаш» было поручено разработать два опытных образца вагона-цистерны и в дальнейшем перейти на их серийный выпуск.

В ОАО «Уралкриомаш» на базе существовавшего вагона-цистерны для перевозки этилена модели 15-147 была разработана конструкторская документация на универсальную цистерну 15-147У, изготовлены наиболее ответственные узлы цистерны (система безопасных дренажных устройств) и на специальном стенде проведены исследовательские работы по отработке режимов безопасного сброса паров СПГ в атмосферу (рис. 3). За основу была принята технология сброса паров СПГ из автоцистерны модели 11Г729, которая включала в себя нагрев в теплообменнике поступающих под избыточным давлением из емкости дренажируемых паров и последующий их сброс в атмосферу по трубке малого диаметра при скоростях истечения, соответствующих минимальному давлению в сосуде, обусловленному предотвращением диффузионного проникновения атмосферного воздуха внутрь трубы при сбросе.



Рис. 3. Вагон-цистерна модели 15-147У для транспортировки этилена и СПГ

Цель сброса через трубку малого диаметра — уменьшить зону воспламенения и зону пламени дренажируемого газа, что не исключает самоподдерживающегося горения при воспламенении потока. Это является недостатком при создании транспортных средств объемом 40...100 м³ и приводит к увеличению объема сбрасываемых паров.

Согласно разработанному и реализованному способу хранения СПГ в емкости цистерны 15-147У [13], необходимо отвод образующихся паров по дренажному трубопроводу малого диаметра, их нагрев

в теплообменнике и сброс в атмосферу проводить со скоростью ω , исключающей возможность самоподдерживающегося горения сбрасываемого в атмосферу газа. Диапазон изменения ω описывается эмпирической зависимостью

$$16\,000 d_0 \leq \omega \leq \omega_1,$$

где $d_0 = (4...6)10^{-3}$ — внутренний диаметр трубки, мм; ω_1 — скорость звука при температуре сбрасываемого газа, м/с.

При данном условии истечения газа реализуется процесс течения струи, при котором осевая скорость в любой точке области струи при любом составе газовой смеси в данной точке должна соответствовать значению скорости ω из приведенного диапазона ее изменений. Это обуславливает отсутствие самоподдерживающегося горения дренажируемого газа даже при наличии источника инициирования, что подтверждено экспериментально.

Выбранные диаметры трубок (4...16 мм) характеризуют дренажную трубку малого диаметра. Как показывают пневмогидравлические расчеты, эти диаметры являются оптимальными. За их пределами при диаметре трубки менее 4 мм значительно увеличивается время дренажа, а при диаметре более 16 мм не выполняются условия сброса газа, что может приводить к горению дренажируемого газа даже при случайном инициировании. Для проявления этого эффекта воздушное пространство, занимаемое истекающей газовой струей, должно быть свободным, т. е. из него следует исключить какие-либо предметы, тормозящие поток. Данное пространство, называемое свободным, представляет собой усеченный конус, размеры которого находят по известным зависимостям. Оно определяет ряд конструктивных параметров, например расположения патрубков сброса на транспортном средстве и непосредственно места сброса.

Экспериментальную отработку режимов сброса паров СПГ проводили на штатном блоке дистанционного управления (БДУ) вагона-цистерны модели 15-147У для транспортировки жидкого этилена и СПГ на специальном стенде. Установили, что условия сброса паров через четыре патрубка диаметром 9 мм с последующим переключением на два патрубка того же диаметра являются оптимальными для данного объема сосуда вагона-цистерны (65 м^3) и поддерживаемого рабочего давления (0,5 МПа). Время сброса паров в атмосферу составило 17 ч до давления 0,15 МПа. При этом следует обращать внимание на необходимость предотвращения диффузионного проникновения атмосферного воздуха в емкость. В других случаях, т. е. при концевых патрубках диаметром 10, 12 и 16 мм, время сброса уменьшается соответственно в 1,2; 1,4 и 2,2 раза, но это обуславливает значительное усложнение конструкции устройства.

Железнодорожная вагон-цистерна модели 15-5106. В начале 2000-х годов были созданы опытные образцы магистральных газотрубопроводов, в которых в качестве газомоторного топлива использовался СПГ. Для их эксплуатации потребовались транспортные средства для доставки СПГ в места их обслуживания как вагонами-цистернами, так и контейнерами-цистернами. Создание вагона-цистерны модели 15-5106 [4] (рис. 4) для транспортировки СПГ и этилена осуществлялось как на основе ее аналога вагона-цистерны модели 15-147У (в части системы безопасных дренажных устройств), так и новых разработок узла сосуд — оболочка — рама, частично отработанного на вагон-цистерне модели 15-559 для транспортировки сжиженной углекислоты.



Рис. 4. Вагон-цистерна модели 15-5106 для транспортировки СПГ и этилена

На железнодорожной цистерне модели 15-147У применялась порошково-вакуумная теплоизоляция на основе аэрогеля, что требовало значительного времени для ее охлаждения перед заполнением емкости вагона-цистерны СПГ. Использование порошково-вакуумной теплоизоляции эффективно для изоляции сосудов емкостей железнодорожных цистерн для жидкого азота, кислорода и аргона, у которых температура кипения криогенного компонента значительно ниже 77 К для азота по сравнению с 113 К для метана. Следовательно, появилась возможность использовать теплоизоляцию для емкости менее дорогую, но более эффективную с точки зрения сокращения временного охлаждения — волокнисто-вакуумную теплоизоляцию на основе базальтового волокна. Это обеспечило сокращение времени залива цистерны и отправки ее потребителю.

Цистерна модели 15-5106 состоит из криогенного резервуара с двойными стенками, установленного на железнодорожной платформе с серийными двухосными тележками модели 18-100 грузовых вагонов. На платформе с обеих сторон цистерны установлены защит-

ные устройства для предотвращения пробоя днища емкости автоцепкой соседнего вагона на сортировочных горках.

Внутренний сосуд цистерны выполнен из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т, наружный кожух — из углеродистой стали 09Г2С. На сосуд нанесена теплоизоляция — базальтовые маты, межстенное пространство между сосудами и оболочкой отвакуумировано до остаточного давления $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.

Цистерна снабжена приборами замера уровня жидкости и давления в сосуде, предохранительными устройствами (клапаны и мембраны) от превышения давления, дренажными устройствами для безопасного сброса паров в атмосферу.

Запорная арматура ручная, с сильфонным уплотнением по штоку. Заправка и выдача продукта проводится по обе стороны цистерны.

Техническая характеристика железнодорожной цистерны модели 15-5106

Вместимость сосуда, м ³	65,4
Грузоподъемность, т:	
для сжиженного природного газа	Не более 23,5
сжиженного этилена	Не более 31,3
Максимально допустимое рабочее давление	
в сосуде, МПа	0,5
Суточные потери СПГ от испарения, %	Не более 0,43
Тип изоляции	Волокнисто-вакуумная
Габарит по ГОСТ 92-38–83	02-ВМ
Длина по осям сцепления автоцепок, мм	14 920
Конструкционная скорость, км/ч	120

Цистерна эксплуатируется в железнодорожных составах общего назначения и может находиться в пути следования без сброса паров СПГ в атмосферу до 42 сут. Для продувки дренажных коммуникаций цистерна укомплектована ресиверной с газообразным азотом. Назначенный срок службы цистерны составляет 20 лет.

Перспективы создания вагона-цистерны повышенной грузоподъемности. В настоящее время научно-исследовательские институты РЖД и ОКБ вагоностроительных корпораций внедряют в грузовой подвижной состав вагонные тележки с нагрузкой на ось 25...27 т. Это позволяет увеличить грузоподъемность перевозимого СПГ в вагоне-цистерне объемом до 100 м³ (рис. 5).

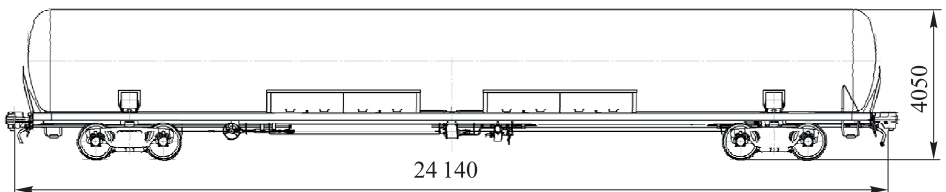


Рис. 5. Вагон-цистерна объемом 100 м³ для транспортировки СПГ

**Техническая характеристика цистерны объемом 100 м³
для транспортировки СПГ**

Вместимость сосуда, м ³	101
Масса перевозимого продукта (СПГ), т	36,5
Максимально допустимое рабочее давление в сосуде, МПа	0,5
Общее давление в изолирующем пространстве емкости при эксплуатации, мм рт. ст.	1·10 ⁻²
Тип изоляции	Волокнисто-вакуумная
Суточные потери от испарения, %	Не более 0,41
Время бездренажного хранения при подъеме давления от 0,15 до 0,6 МПа, сут	45
Масса тары, т	50
Длина по осям сцепления автосцепок, мм	24 140
Высота от головки рельса, мм	4050
Конструкционная скорость, км/ч	120

В настоящее время ведется разработка конструкторской документации и проводятся исследовательские работы по выбору материалов с низкой теплопроводностью.

Транспортировка СПГ контейнерами-цистернами. К преимуществам транспортировки СПГ контейнерами-цистернами относятся:

- возможность перевозки контейнеров-цистерн железнодорожным (фитинговые платформы-контейнеровозы) и автомобильным (автомобильные фитинговые платформы-контейнеровозы) транспортом;
- прямая доставка СПГ от производителя к потребителю;
- отсутствие необходимости в использовании дорогостоящих терминалов слива — налива;
- минимизация потерь сжиженного газа за счет испаряемости и количества при переливах продукта;
- возможность дозированной поставки криогенного компонента в контейнерах-цистернах различных габаритов (10, 20, 30, 40, 45 футов).

Задачи, решаемые разработчиком при создании контейнеров-цистерн для транспортировки криогенных продуктов:

- расширение номенклатуры перевозимого продукта в данном типе контейнера-цистерны или его модификациях;
- использование универсальности или индивидуальности конструктивных решений для близких по теплофизическим и химическим свойствам перевозимых продуктов (кислород — азот — аргон, СПГ — этилен, водород, гелий);
- увеличение грузоподъемности за счет создания 40- или 45-футовых контейнеров-цистерн в соответствии с международными нормами, определяющими как основные положения при проектировании и испытаниях прототипа контейнера, так и правила эксплуатации контейнеров-цистерн при транспортировке железнодорожным, автомобильным и морским транспортом;

- обеспечение максимального времени бездренажной транспортировки криогенного продукта или контрольного времени удержания;
- сохранение качества продукта в контейнере-цистерне в процессе заполнения, транспортировки и слива;
- соблюдение требований пожарной и экологической безопасности в случае возникновения аварийной ситуации (пожар в арматурном отсеке емкости, несанкционированное трогание с места стоянки при сливе — наливе, разгерметизация теплоизоляционной полости емкости).

Транспортировка СПГ в контейнере-цистерне модели КЦМ 35/0,6. Контейнер-цистерна модели КЦМ 35/0,6 (рис. 6) содержит оболочку и сосуд в ней, опертый на две пары низкотеплопроводных опор, расположенных под углом к вертикальной оси цистерны. Узел фиксации сосуда от транспортных нагрузок в продольном направлении выполнен в виде одного жесткого стержня, имеющего на концах пространственные шарниры, и установлен на центральной оси цистерны. Один пространственный шарнир закреплен на днище и размещен внутри сосуда в полости, сообщающейся с изолирующим пространством цистерны, а другой — на днище оболочки. Опорные узлы выполнены в виде переходных цилиндрических обечаек, приваренных к цистерне и торцевым рамам. С каждой стороны цистерны расположены четыре опорные балки, закрепленные на углах торцевых рам к цистерне. Такое конструктивное решение сосуда — оболочка — рама с размещением узла фиксации сосуда от транспортных нагрузок в продольном направлении вдоль центральной оси цистерны позволяет поместить жесткий стержень с минимально возможным зазором между сосудом и оболочкой и обеспечить максимально полезный объем сосуда в контейнере-цистерне [14].



Рис. 6. Контейнер-цистерна модели КЦМ-35/06 для транспортировки СПГ

Техническая характеристика контейнера-цистерны модели КЦМ-35/06

Обозначение по кодексу ММОГ	UNT75
Обозначение типоразмера по ИСО1496-3:1995	1 AA
Габаритные размеры, мм:	
длина	12 192
ширина	2438
высота	2591
Максимальная масса брутто, т	30,48
Масса тары, т	14,95
Масса транспортируемого продукта, т	15,53
Вместимость, м ³	35,4
Максимально допустимое рабочее давление, МПа ...	0,6
Тип изоляции	Волокнисто-вакуумная
Суточные потери от испарения, %	0,54
Материал:	
сосуда	Сталь 12Х18Н10Т
оболочки	Сталь 09Г2С-14
Время бездренажного хранения при подъеме давления от 0,15 до 0,6 МПа, сут	35
Арматура	Фирма Herose
Управление рабочими операциями	Ручное
Температурный диапазон эксплуатации, °С	-40...+50
Назначенный срок службы, лет	20

Для проверки технических характеристик контейнера-цистерны и отработки технологии заправки — слива продукта проведена опытная транспортировка по параметру: г. С.-Петербург (Россия) — г. Хельсинки (Финляндия) — морской паром — г. Стокгольм (Швеция). Общая протяженность автомобильной трассы и морской паромной переправы составила 1100 км, время в пути — 48 ч [15].

Принятая у потребителя технология слива СПГ в хранилище из транспортной емкости предусматривает минимальные выбросы паров СПГ в атмосферу с точки зрения как экологической безопасности, так и минимизации потерь поставляемого СПГ. Внешний вид криогенного комплекса, а также его отдельных составляющих представлен на рис. 7.

Комплекс приема, хранения и газификации СПГ включает в себя:

- хранилище СПГ вертикального типа с вакуумной порошковой изоляцией (перлит) с нижним сливом продукта объемом 50 м³ и рабочим давлением 1,5 МПа;
- испарители-теплообменники вертикального типа для газификации поступающего из хранилища газа с последующей подачей его в компрессор;
- испаритель для создания избыточного давления в емкости контейнера-цистерны при сливе СПГ в хранилище;
- блок запорно-предохранительной арматуры и контрольно-измерительных приборов.

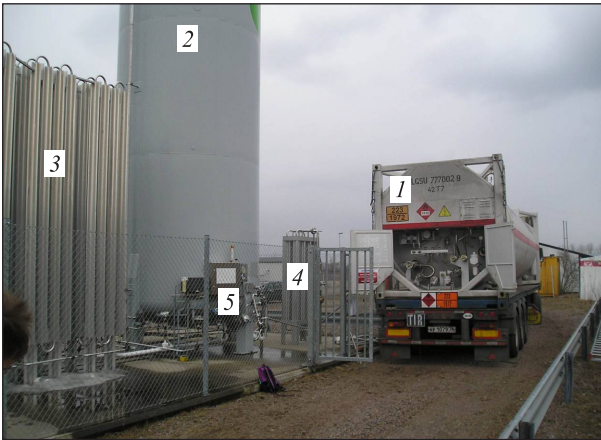


Рис. 7. Криогенный комплекс слива СПГ из контейнера-цистерны модели КМЦ-35/06:

1 — контейнер-цистерна; 2 — хранилище СПГ; 3 — испаритель-теплообменник; 4 — испаритель для создания избыточного давления в емкости контейнера; 5 — блок запорно-предохранительной арматуры и контрольно-измерительных приборов

На начальной стадии перелив СПГ в хранилище проводился при перепаде давления в стационарной и транспортной емкостях, равном 0,25 МПа. Поскольку дренаж паров из хранилища в соответствии с используемой технологией операторами криогенного комплекса не проводился, то после выравнивания давлений в емкостях процесс перелива был приостановлен. За счет подачи жидкости из хранилища в малый испаритель давление в емкости контейнера-цистерны было поднято до максимального рабочего 0,6 МПа. Это позволило осуществить отбор газа из хранилища через теплообменник на компрессорную станцию. При достижении в хранилище минимально допустимого давления для работы компрессора (0,3 МПа) перелив СПГ был возобновлен.

Для полного опорожнения емкости контейнера потребовалось выполнить четыре подобных технологических цикла в течение 4,5 ч.

Данная технология в отличие от принятой (поддержание постоянного давления в транспортной емкости и минимального давления в хранилище со сбросом паров в атмосферу в процессе перелива) более трудоемкая. Однако при этом обеспечивается экономия СПГ и не нарушаются экологические нормы.

Анализ опытной транспортировки СПГ в контейнере-цистерне и последующего его слива в хранилище у потребителя в целом подтвердил работоспособность всех узлов контейнера-цистерны и позволил выявить ряд требований и необходимых мероприятий для его усовершенствования, а именно:

- необходимо увеличить объем сосуда до 40 м^3 , так как потребители для приема СПГ используют емкости хранилища типовой номенклатуры: 50, 100, 150 и 250 м^3 ;
- рабочее давление в сосуде должно быть выше 0,6 МПа, что позволит сократить время слива СПГ из транспортной емкости у потребителя;
- отсутствие у транспортной цистерны испарителя для создания давления в емкости при сливе продукта или насоса;
- увеличить проходное сечение скоростного клапана с $D_y 32$ до $D_y 50$, что позволит в случае возникновения аварийной ситуации обеспечить слив СПГ из емкости за короткий промежуток времени;
- доработать конструкцию узла фиксации сосуда в оболочке контейнера от транспортных нагрузок, возникающих при более высоких скоростях движения транспортного средства с продуктом.

Приведенные замечания и рекомендации были учтены при создании контейнера-цистерны нового поколения модели КЦМ-40/0,7.

Транспортировка СПГ в контейнере-цистерне модели КЦМ-40/0,7. Концепция РЖД создания газотрубопровода с использованием в качестве емкости-хранилища СПГ контейнера-цистерны обусловила разработку и создание нового транспортного средства — контейнера-цистерны модели КЦМ-40/0,7 объемом 40 м^3 с рабочим давлением 0,7 МПа (рис. 8).



Рис. 8. Контейнер-цистерна модели КЦМ-40/0,7 для транспортировки СПГ и этилена

Техническая характеристика контейнера-цистерны модели КЦМ-40/0,7

Обозначение по кодексу ММОГ	UNT75
Обозначение типоразмера по ИСО1496-3:1995	1 AA
Габаритные размеры, мм:	
длина	12 192
ширина	2438
высота	2591

Максимальная масса брутто, т	30,48
Масса тары, т	12,57
Масса транспортируемого продукта, т	14,2
Вместимость, м ³	40
Максимально допустимое рабочее давление, МПа	0,7
Тип изоляции	Экранно-вакуумная
Суточные потери от испарения, %	0,54
Материал:	
сосуда	Сталь 12Х18Н10Т
оболочки	Сталь 09Г2С-14
Время бездренажного хранения при подъеме давления от 0,15 до 0,6 МПа, сут	60
Арматура	Фирма Herose
Управление рабочими операциями	Ручное
Температурный диапазон эксплуатации, °С	-40...+50
Назначенный срок службы, лет	20
Выдача продукта	Надув емкости посредством собственного испарителя

Для уменьшения продольных и поперечных нагрузок, приходящихся на емкость при движении контейнера-цистерны с продуктом, было принято решение выполнить узел сосуд — оболочка — рама в виде конуса, жестко прилегающего к сосуду и оболочке с одной стороны емкости и в виде цапфы с противоположной стороны, обеспечивающей компенсацию перемещений сосуда в оболочке контейнера.

Перенос арматурного шкафа с торца контейнера-цистерны на боковую поверхность емкости позволил увеличить полезный объем сосуда с 35 до 40 м³ и максимальную массу перевозимого продукта до 14,5 т.

Применение экранно-вакуумной теплоизоляции на сосуде емкости и создание в межстенном пространстве цистерны при эксплуатации вакуума в теплом состоянии на уровне $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. позволило обеспечить контрольное время удержания (время между установлением первоначального давления наполнения 0,05 МПа и повышением давления в результате притока теплоты до открытия предохранительных клапанов) не менее 60 сут.

Избыточное давление в газовой «подушке» емкости при сливе продукта в состав контейнера-цистерны достигается за счет испарителя наддува сосуда газообразным природным газом, что обеспечивает время слива в течение 2,5 ч.

Прочностные испытания прототипа контейнера-цистерны модели КЦМ-40/0,7 проводились в г. С.-Петербурге: статические испытания в ФГУП Крыловский государственный научный центр (рис. 9), динамические — в Санкт-Петербургском государственном университете путей сообщения имени Александра I под контролем представителя Регистра Судоходства. В результате испытаний была получена поло-

жительная оценка конструкции контейнера-цистерны модели КЦМ-40/0,7 для транспортировки СПГ и выдан Регистром Судоходства сертификат на контейнер-цистерну данной модели [16].



Рис. 9. Статические испытания контейнера-цистерны модели КЦМ-40/0,7

Практический интерес представляет транспортная система, в состав которой входят два контейнера:

- контейнер-цистерна 40-футовой модели КЦМ-40/0,7;
- контейнер-газификатор в размерах 40-футового контейнера (рис. 10).



Рис. 10. Криогенный транспортный комплекс контейнер-цистерна и газификатор

Задача обеспечения газообразным СПГ потребителя в течение продолжительного времени возникает в случае аварийной ситуации в системе подачи газообразного компонента на объект специального назначения.

Данная транспортная система [17] обеспечивает в течение 48 ч непрерывной работы с производительностью до $500 \text{ нм}^3/\text{ч}$ при полной выработке СПГ из контейнера-цистерны.

Закключение. Исследования применения теплоизоляции для транспортных средств для перевозки СПГ показали, что для вагона-цистерны при незначительной продолжительности доставки потребителю (одна-две недели) можно рекомендовать порошково-вакуумную (на основе аэрогеля) или волокнисто-вакуумную (на основе базальтовых матов) теплоизоляцию сосуда емкости.

В случае контейнера-цистерны для транспортировки СПГ смешанные — мультимодальные перевозки, связанные с длительной транспортировкой, приводят как к потере продукта вследствие его испарения, так и к необходимости газосброса паров в атмосферу. В этом случае эффективно применение экранно-вакуумной теплоизоляции (на основе металлизированной пленки и стеклохолста) при достаточной глубине вакуума ($1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.) в межстенном пространстве емкости в процессе эксплуатации. Именно при этих условиях обеспечивается максимальное время бездренажной транспортировки продукта потребителю.

Разработка и внедрение силовых элементов узла сосуд — оболочка — рама на контейнере-цистерне позволили решить проблему прочности конструкции при динамических нагрузках в процессе эксплуатации криогенной транспортной цистерны. Это обусловило применение данного решения на автомобильные, железнодорожные, мультимодальные криогенные транспортные средства и системы.

Разработка способа, технологии и создание конструкции системы безопасного дренирования паров СПГ в атмосферу при транспортировке создали возможности распространения результатов исследований и решений на криогенные транспортные изделия для перевозки горючих газов (метана, этилена, водорода).

Типовые решения наиболее проблемных вопросов обеспечили создание универсальных транспортных средств для перевозки близких по теплофизическим свойствам криогенных компонентов, например, СПГ и этилена.

Анализ опытной транспортировки, используемой технологии слива в хранилище потребителя СПГ из контейнера-цистерны модели КЦМ-35/06, подтвердил реальную осуществимость экспорта СПГ из европейской части России в страны Северной и Центральной Европы, такие как Швеция, Финляндия, Германия и др.

Рассматривая поставку СПГ в Европу в контейнерах-цистернах автомобильным и морским транспортом как составляющую мульти-модальных перевозок СПГ в целом, а также реальную возможность транспортировки этой модели по железной дороге, можно надеяться, что это вызовет интерес к экспорту СПГ из Западно-Сибирского региона РФ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Уманский С.П. *Ракеты-носители. Космодром*. Москва, Рестар+, 2001, 216 с.
- [2] Бармин И.В., Кунис И.Д. *Сжиженный природный газ вчера, сегодня, завтра*. А.М. Архаров, ред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 256 с.
- [3] Архаров А.М., Кунис И.Д. *Криогенные заправочные системы стартовых ракетно-космических комплексов*. И.В. Бармин, ред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 252 с.
- [4] ОАО «Уралкриомаши» — «малая земля Вагонки». Екатеринбург, СВ-96, 2004, 108 с.
- [5] *Оборудование для сжиженного природного газа (СПГ). Общие технологические требования при эксплуатации систем хранения, транспортирования и газификации*. ВРД 39-1.10-064-2002. Москва, ОАО «Газпром», 2002.
- [6] Фишер К. Производственный комплекс СПГ. *Автозаправочный комплекс + Альтернативное топливо*, 2005, № 3, с. 58–61.
- [7] *Международный морской кодекс по опасным грузам* (Кодекс ММОГ/IMDA Code).
- [8] *Европейское соглашение о международной перевозке опасных грузов* (ДОПОГ/ADR).
- [9] *Международные правила перевозки опасных грузов по железным дорогам* (ДОПОГ/ADR).
- [10] Андреев В.А., Борисов В.Д., Климов В.А. и др. *Криогенное топливо для авиации*. Москва, Московский рабочий, 2001.
- [11] Малышев В.В. Будет ли в России отечественная криогенная авиация? *Автозаправочный комплекс + Альтернативное топливо*, 2012, № 3, с. 85–88.
- [12] ТУ 021...00480689–96 «Газ горючий природный сжиженный. Топливо для ракетной техники». Санкт-Петербург, ГИПХ, 1996.
- [13] Черемных О.Я., Зашляпин Р.А., Бебелин И.Н. *Способ хранения сжиженного природного газа в транспортной емкости*. Патент 2002990 РФ, 1993, бюл. № 41–42, 7 с.
- [14] Черемных О.Я., Зашляпин Р.А., Андронов В. А. *Контейнер-цистерна*. Патент 2259312 РФ, 2005, бюл. № 24, 7 с.
- [15] Черемных О.Я. Анализ особенностей транспортирования на экспорт сжиженного природного газа в контейнерах-цистернах и технологии его слива в хранилище. *Технические газы*, 2007, № 7, с. 65–68.
- [16] Черемных О.Я., Рачевский Б.С. Целесообразность экспорта СПГ с малотоннажных заводов СПГ. *Газовая промышленность*, 2017, № 6, с. 82–84.
- [17] Черемных О.Я., Павлов Ю.В., Иванов К.А. Станция регазификации сжиженного природного газа в блочно-модульном исполнении. *Технические газы*, 2016, № 3, с. 63–68.

Статья поступила в редакцию 24.11.2017

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на 14-й Международной научно-практической конференции «Сжиженный природный газ», состоявшейся 31.10–01.11.2017 г., Москва

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Черемных О.Я. Перспектива развития транспортных средств для сжиженного природного газа. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 1. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-1-1722>

Черемных Олег Яковлевич — канд. техн. наук, директор Центра научных исследований и инноваций филиала Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Область деятельности и научных интересов: криогенная техника. e-mail: nti@urfu.ru

Prospects of developing vehicles for liquefied natural gas transportation

© O.Ya. Cheremnykh

Yeltsin Ural Federal University, Nizhny Tagil, 622034, Russia

We developed a contemporary vehicle for transporting liquefied natural gas (LNG) used in implementing modern promising cryogenic technologies for airspace, aviation and other industries. We conducted a search for optimal solutions when selecting the design of load-bearing members in the assembly consisting of the vessel, the shell and the frame of the tank car and the tank container, ensuring reliable vehicle functioning during operation. The study validates design choices for a system of cut-off safety devices and high-speed valves for incident prevention during vehicle operation. Based on the investigations conducted, we suggest a means of storing liquefied natural gas in a vehicle tank, which ensures safe LNG vapour release from the tank into the atmosphere during railroad or road transportation. We present a technology of discharging LNG at the customer's site that ensures minimal LNG vapour release into the atmosphere. For the first time we supply a description and performance specifications for promising transportation devices, such as 40 cubic meter tank cars for LNG and ethylene.

Keywords: liquefied natural gas, tank car, tank truck, tank container, transportation, safe draining system, fibre vacuum insulation, vacuum shield insulation, container truck, flat-bed railcar

REFERENCES

- [1] Umanskiy S.P. *Rakety-nositeli. Kosmodrom* [Launch Vehicles. Spaceport]. Moscow, Restar+, 2001, 216 p.
- [2] Barmin I.V., Kunis I.D. *Szhizhennyy prirodnyy gaz vchera, segodnya, zavtra* [Liquefied natural gas yesterday, today and tomorrow]. A.M. Arkharov, ed. Moscow, BMSTU Publ., 2009, 256 p.
- [3] Arkharov A.M., Kunis I.D. *Kriogennye zapravochnye sistemy startovykh raketnokosmicheskikh kompleksov* [Cryogenic fuelling systems of aerospace launch pads]. I.V. Barmin, ed. Moscow, BMSTU Publ., 2006, 252 p.
- [4] *ОАО Уралкриомаш — "Malaya Zemlya Vagonki"* [JSC Uralcryomash: the "Malaya Zemlya" of the Ural Railroad Car Factory]. Yekaterinburg, SV-96 Publ., 2004, 108 p.
- [5] *Оборудование для сжиженного природного газа (СПГ). Общие технологические требования при эксплуатации систем хранения, транспортирования и газификации. ВРД 39-1.10-064-2002* [Equipment for liquefied natural gas (LNG). General technological requirements when operating storage, transportation and gasification systems. Departmental Regulatory Document 39-1.10-064-2002]. Moscow, Gazprom PJSC Publ., 2002.
- [6] Fisher K. *Avtozapravochnyy kompleks + Alternativnoe toplivo — AutoGas Filling Complex + Alternative Fuel*, 2005, no. 3, pp. 58–61.
- [7] *International Maritime Dangerous Goods Code* [In Russ.: *Mezhdunarodnyy morskoy kodeks po opasnym gruzam (Kodeks MMOG/IMDA Code)*].
- [8] *European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR)* [In Russ.: *Evropeyskoe soglasenie o mezhdunarodnoy perezovke opasnykh gruzov (DOPOG/ADR)*]. United Nations, 2010.

- [9] *Regulations concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail (RID)* [In Russ.: Mezhdunarodnye pravila perevozki opasnykh gruzov po zheleznym dorogam (DOPOG/ADR)].
- [10] Andreev V.A., Borisov V.D., Klimov V.A. et al. *Kriogennoe toplivo dlya aviatsii* [Cryogenic aviation fuel]. Moscow, Moskovskiy Rabochiy Publ., 2001.
- [11] Malyshev V.V. *Avtozapravochnyy kompleks + Alternativnoe toplivo — AutoGas Filling Complex + Alternative Fuel*, 2012, no. 3, pp. 85–88.
- [12] *TU 021...00480689-96. Gaz goryuchiy prirodnyy szhizhenyy. Toplivo dlya raketnoy tekhniki* [Technical Specifications 021...00480689-96. Combustible liquefied natural gas. Rocket propellant]. Saint Petersburg, State Institute of Applied Chemistry Publ., 1996.
- [13] Cheremnykh O.Ya., Zashlyapin R.A., Bebelin I.N. *Sposob khraneniya szhizhenogo prirodnogo gaza v transportnoy emkosti* [Method for storing liquefied natural gas in a shipping container]. Patent RU2002990, 1993, bulletin no. 41–42, 7 p.
- [14] Cheremnykh O.Ya., Zashlyapin R.A., Andronov V.A. *Konteyner-tsisterna* [Tank container]. Patent RU2259312, 2005, bulletin no. 24, 7 p.
- [15] Cheremnykh O.Ya. *Tekhnicheskie gazy — Industrial Gases*, 2007, no. 7, pp. 65–68.
- [16] Cheremnykh O.Ya., Pavlov Yu.V., Ivanov K.A. *Tekhnicheskie gazy — Industrial Gases*, 2016, no. 3, pp. 63–68.
- [17] Cheremnykh O.Ya., Rachevskiy B.S. *Gazovaya promyshlennost — Gas Industry Journal*, 2017, no. 6, pp. 82–84.

Cheremnykh O.Ya., Cand. Sc. (Eng.), Director, Scientific Research and Innovation Centre, subsidiary of Yeltsin Ural Federal University. Specialises in cryogenic engineering. e-mail: nti@urfu.ru