

Создание, совершенствование конструкции, перспектива развития транспортных средств для жидкого водорода

© О.Я. Черемных

АО «Уралкриомаш», г. Нижний Тагил, 622051, Россия

На основе анализа ранее созданных конструкций для транспортировки жидкого водорода рассмотрены разработки транспортных изделий для реализации современных перспективных водородных технологий, используемых в ракетно-космической, морской и других отраслях промышленности. Проведен поиск оптимальных решений и дано обоснование выбора теплоизоляции транспортных изделий для жидкого водорода. Анализ чистоты жидкого продукта при транспортировке позволил выявить основные примеси и оценить изменение их концентрации в водороде в процессе перевозки. Обоснован выбор критериев технологических операций, обеспечивающих сохранение качества жидкого водорода в транспортной цистерне. На основе исследований предложена технологическая операция «слива» водорода на ракетно-космическом комплексе без наддува емкости от стороннего источника газа наддува с использованием только собственных «чистых» паров водорода. Впервые представлены результаты экспериментальных исследований по изучению последствий потери вакуума в емкости на натурном образце водородной цистерны модели ЖВЦ-100М в случае возникновения аварийной ситуации. На основе этих исследований сделан выбор материала и определена конструкция оболочки криогенной транспортной цистерны, а также выработаны меры защиты от повреждения экипажной части цистерны в случае потери вакуума при аварии. Представленные рекомендации использованы при проектировании большинства транспортных криогенных изделий для перевозки сжиженных (криогенных) газов: кислорода, азота, аргона, сжиженного природного газа. Впервые приведены технические характеристики перспективного транспортного изделия — контейнера-цистерны для жидкого водорода при мультимодальных перевозках.

Ключевые слова: жидкий водород, железнодорожная цистерна, контейнер-цистерна, автомобильная цистерна, теплоизоляция, испаряемость, безопасно-дренажное устройство, бездренажная транспортировка, чистота водорода, платформа контейнеров, железнодорожная платформа

Введение. В СССР 50 лет тому назад по инициативе С.П. Королёва были начаты широкомасштабные работы по созданию оборудования и технологий для использования в ракетно-космической технике эффективного водородно-кислородного ракетного топлива [1]. Для решения поставленной задачи следовало создать транспортные средства для перевозки жидкого водорода [2], что требовало разработки конструкционных и теплоизоляционных материалов, работоспособных в условиях низких температур и нахождения конструкторских решений, обеспечивающих надежную работу комплекса [3].

Появилась необходимость решения задачи минимизации суточных потерь жидкого водорода при его транспортировке за счет применения

наиболее эффективной теплоизоляции емкости транспортного средства и создания глубокого вакуума в межстенном теплоизоляционном пространстве. Требования по восприятию транспортных ударных нагрузок в условиях железной дороги в совокупности с низкой температурой жидкого водорода следовало учитывать в конструкторских решениях силовых элементов (опор, узлов, подвесок) в схеме сосуд — оболочка — рама платформы.

Следующими важными вопросами, обуславливающими безопасную транспортировку жидкого водорода, стали создание безопасного дренирования паров водорода из емкости в пути следования и уровень (коэффициент) заполнения цистерны. При выборе коэффициента заполнения емкости с жидким водородом необходимо учитывать максимальное рабочее давление в ней при транспортировке и теплофизические свойства жидкого водорода.

Еще одной проблемой, решаемой при создании транспортного изделия, оказалось сохранение качества жидкого водорода, поскольку обогащение его примесями (твердыми или растворенными) в конечном итоге влияет на энергетическую характеристику двигательной установки космического аппарата [4].

При транспортировке жидкого водорода решение задачи разработки мероприятий в случае возникновения аварийной ситуации, такой, как потеря вакуума в теплоизоляционной полости емкости, является первоочередным и определяющим в выборе конструкции цистерны.

Решение проблемы создания транспортного средства, обеспечивающего перевозку жидкого водорода как по железной дороге, так автомобильным и морским транспортом (мультимодальные перевозки), связано с созданием контейнера-цистерны.

Первым агрегатом для транспортировки жидкого водорода была автоцистерна ТРЖВ-20, созданная в 1966 г. на шасси автомобильного прицепа для доставки жидкого водорода на испытательный стенд для отработки жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) с завода — производителя водорода по заказу Научно-исследовательского института химического машиностроения. Для доставки жидкого водорода к стенду и подачи его к ракетному двигателю потребовалась транспортная емкость объемом 20 м^3 и рабочим давлением 0,6 МПа (рис. 1).

Внутренний сосуд транспортного агрегата ТРЖВ-20 впервые был изготовлен из высокопрочного алюминиевого сплава АМГ-5 методом ручной сварки, оболочка — из стали 15. Крепили сосуд в оболочке традиционно — с помощью цепных растяжек и текстолитовых опор. Пакетами изоляции покрывали поверхность сосуда. После этого ракеты закрепляли стеклолентой и обтягивали «чулком» из стеклоткани. В соответствующие карманы на сосуде емкости засыпали гранулированный активированный древесный уголь. Изоляционное пространство емкости агрегата вакуумировали до максимально возможной в условиях предприятия степени.



Рис. 1. Транспортный резервуар модели ТРЖВ-20 для транспортировки жидкого водорода

Следующим агрегатом для перевозки жидкого водорода, созданным предприятием, стала железнодорожная цистерна 8Г514 (рис. 2), сконструированная в соответствии с Постановлением Совета Министров СССР. Технические характеристики железнодорожной цистерны модели 8Г514 для жидкого водорода приведены ниже:

Геометрический объем сосуда, м ³	33,0
Рабочее давление, МПа	0,25
Масса перевозимого водорода, т	2,1
Теплоизоляция	Экранно-порошково-вакуумная
Суточные потери продукта при транспортировке, %	2,4
Способ слива продукта	Наддув сторонним источником

Материалом внутреннего сосуда послужил алюминиевый сплав АМг, устойчивый при низких температурах сжиженного водорода.

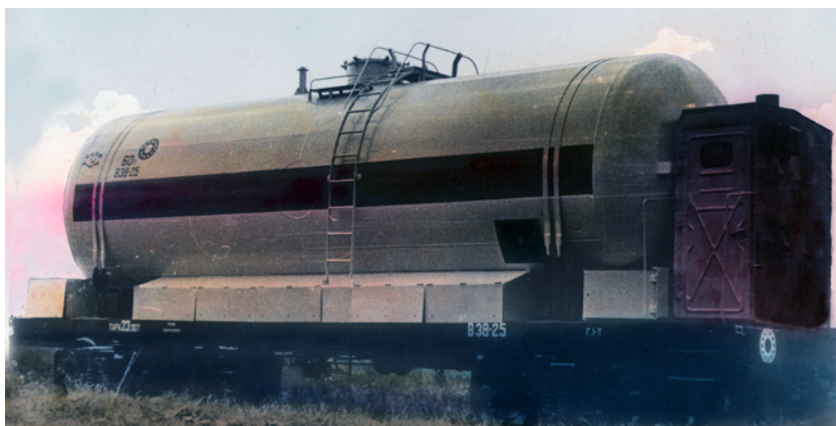


Рис. 2. Железнодорожная цистерна модели 8Г514 для транспортировки жидкого водорода

Арматуру проектировали специально, поскольку низкая температура сжижения и затвердевания жидкого водорода требовала наличия более совершенных тепловых мостов, чтобы исключить обмерзание органов управления сконденсировавшейся влагой атмосферного воздуха, а также соответствующего материала уплотнителя в узле седло — клапан для обеспечения герметичности в системе коммуникаций трубопроводов цистерны. Тепловые мосты арматуры газосброса выполняли с сильфонным уплотнением (компенсаторами), исключая утечку паров водорода в атмосферу.

Малые размеры арматурного шкафа цистерны натолкнули на решение выполнить трубы слива — налива водорода из нижней части днища оболочки в виде штыкового соединения Джонсона. В него вставляли соответствующий элемент вентиля слива — налива, изготовленного как одно целое с имеющим экранно-вакуумную теплоизоляцию коллектором слива — налива. Концевые элементы коллектора соединяли с приемными металлорукавами также штыковыми соединениями. В них тепловой мост между холодным и теплым участками был максимально удлинен и не допускал обмерзания соединения. Сосуд цистерны теплоизолировали матами многослойной изоляции из перемежающихся слоев алюминиевой фольги и стеклохолста. Из опасения сдвижки слоев экранов при железнодорожной транспортировке водорода при высоких динамических нагрузках теплоизоляционное пространство емкости дополнительно засыпали порошком — аэрогелем, что дало возможность увеличить время бездренажной транспортировки водорода.

Всего за период 1966–1968 гг. было изготовлено 60 цистерн модели 8Г514. В эксплуатации они находились недолго вследствие небольшого полезного объема сосуда емкости, низкого рабочего давления и недостаточно эффективной теплоизоляции, что требовало при эксплуатации частых остановок в пути следования для сброса паров в атмосферу из емкости цистерны.

Однако опыт эксплуатации этих цистерн подтвердил реальность безопасной транспортировки жидкого водорода в условиях железной дороги, и поэтому появилась возможность создать более совершенные, более эффективные железнодорожные цистерны и контейнеры-цистерны для мультимодальных перевозок жидкого водорода.

Создание конструкции, разработка технологии транспортировки жидкого водорода в железнодорожных цистернах модели ЖВЦ-100. При создании железнодорожной цистерны (рис. 3) для доставки жидкого водорода на космодром Байконур решали [5] следующие задачи:

- увеличение перевозимой массы жидкого водорода по сравнению с железнодорожной цистерной 8Г514 с 2,0 до 7,0 т за счет увеличения объема внутреннего сосуда с 33 до 119 м³;

- увеличение рабочего давления в емкости по сравнению с железнодорожной цистерной 8Г514 с 0,15 до 0,6 МПа;
- снижение потерь водорода при транспортировке по сравнению с железнодорожной цистерной 8Г514 с 2,4 % в сутки до 1,4...1,6 % в сутки.

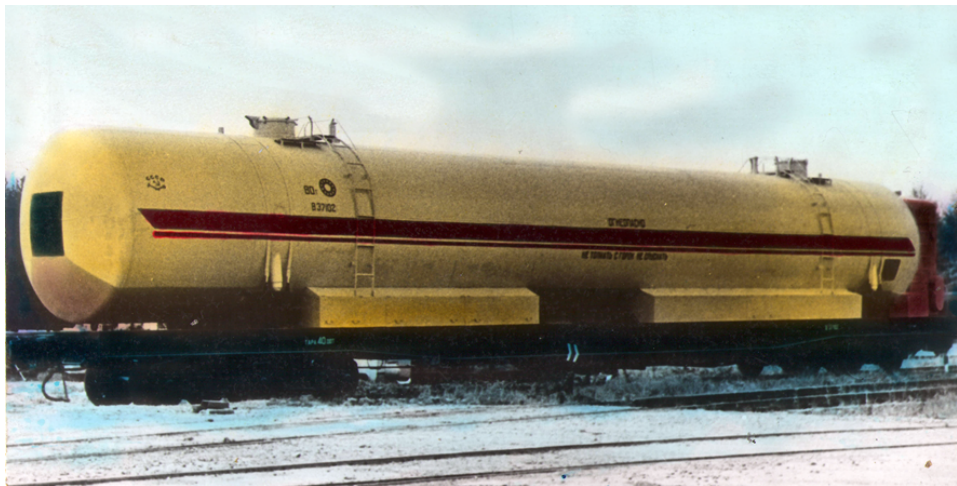


Рис. 3. Железнодорожная цистерна модели ЖВЦ-100 для транспортировки жидкого водорода

Для решения этой проблемы следовало совместить конструктивное решение силовых элементов (опор, цепей, подвесок) в схеме сосуд — оболочка — рама платформы с выбором эффективной теплоизоляции емкости (многослойно-порошково-вакуумной), поскольку именно в условиях железной дороги предъявляются наиболее жесткие требования к изделию по ударным нагрузкам и минимизации испаряемости жидкого водорода при транспортировке;

- внедрение прогрессивной технологии нанесения слоисто-вакуумной теплоизоляции [6] и засыпки межстенного пространства емкости теплоизолирующим порошком — аэрогелем с последующим вакуумированием;
- отработка технологии безопасного дренирования паров водорода из емкости цистерны [7].

Сброс паров водорода из емкости цистерны ЖВЦ-100 первых выпусков производился на удаленных от жилых массивов пунктах через специально ввозимые дренажные коммуникации, подсоединяемые к газосбросу, сопровождающими цистерну специалистами. Перед сбросом давления водород из емкости коммуникации дренажа предварительно продували инертным газом (гелием или азотом) во избежание образования взрывоопасной смеси водорода с воздухом. С этой целью цистерны были оборудованы четырьмя 400-литровыми

баллонами со сжатым гелием и системой его подачи для продувки. В дальнейшем весь парк цистерн ЖВЦ-100 после проведения научно-исследовательских работ оснастили коммуникациями безопасных дренажных устройств (БДУ), в которых пары водорода после соответствующей продувки прогревали в теплообменнике и сбрасывали в атмосферу со скоростью, исключающей смешение водорода и воздуха. Стало возможным осуществление сброса давления из цистерн без удаления их в тупики;

- обоснование коэффициента заполнения емкости жидким водородом в процессе транспортировки.

Выбор коэффициента заполнения емкости ЖВЦ-100 ($K = 0,85$) тесно связан с обоснованием максимального рабочего давления в емкости при транспортировке с учетом теплофизических свойств жидкого водорода.

Совершенствование конструкции железнодорожной цистерны для транспортировки жидкого водорода ЖВЦ-100М. Постановлением Совета Министров СССР от 21 ноября 1977 г. о разработке и изготовлении МКС «Энергия — Буран», для которой требовалось значительно большее количество жидкого водорода как для стартового комплекса, так и для стендовой отработки ЖРД, было принято решение о совершенствовании железнодорожной цистерны ЖВЦ-100, получившей индекс ЖВЦ-100М (рис. 4).



Рис. 4. Железнодорожная цистерна модели ЖВЦ-100М для транспортировки жидкого водорода

На этом этапе предусматривалось решение принципиальных задач по совершенствованию конструкции ЖВЦ-100, и прежде всего по снижению потерь жидкого водорода при транспортировке до уровня 1,2 % в сутки и ниже вместо 1,6 % в сутки для ЖВЦ-100.

По статистическим данным (НИИМаш, г. Нижняя Салда, стендовая отработка ЖРД на водороде), за один из контрольных периодов эксплуатации железнодорожных цистерн ЖВЦ-100 при 10-суточной транспортировке от завода — производителя жидкого водорода (г. Чирчик, Узбекистан) до потребителя (НИИМаш) и 5-суточного ожидания слива в хранилище у потребителя из 3954 т водорода, заполнившие цистерны на заводе — изготовителе компонента ракетного топлива, потери при транспортировке составили 573 т, т. е. 14,5 %.

Поиск дальнейших путей снижения испаряемости водорода в цистернах ЖВЦ-100М осуществляли с применением следующих видов теплоизоляции:

- порошково-вакуумной;
- моногослойно-вакуумной;
- многослойно-порошково-вакуумной (при различном уровне засыпки аэрогелем теплоизоляционной полости емкости).

Результаты испытаний цистерн ЖВЦ-100М, емкости которых были выполнены со слоисто-вакуумной изоляцией (СВИ), показали, что суточная испаряемость жидкого водорода при транспортировке составила 1,4 %. Это объяснялось низкой эффективностью СВИ в районе силовых элементов цистерны (опор и цепей) в нижней части емкости.

Испытания цистерны ЖВЦ-100М с порошково-вакуумной теплоизоляцией емкости при ширине межстенного зазора в изоляционном пространстве 250...275 мм, засыпанного аэрогелем, определили испаряемость водорода в цистерне для данного класса изоляции на уровне 1,45...1,5 % в сутки. Это можно объяснить недостаточной шириной межстенного зазора, засыпаемого теплоизолирующим порошком, увеличение которого возможно только за счет уменьшения диаметра сосуда (внешний габарит цистерны 1Т строго определен ГОСТом), которое приведет к уменьшению перевозимой массы водорода.

Испытания цистерн ЖВЦ-100М со слоисто-порошково-вакуумной теплоизоляцией емкости (120 слоев СВИ на основе матов ЭФТИ-2В-25 и 5,5 т аэрогеля) при вакууме в межстенном пространстве емкости на уровне $5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. (133,322 Па) показали, что суточные потери водорода в цистерне составляют 1,15...1,2 %.

В дальнейшем было принято решение засыпку аэрогелем производить только в нижней части емкости в районе цепей и опор, что обеспечивало экранирование теплоизолирующим порошком труднодоступных мест для нанесения слоисто-вакуумной теплоизоляции [8].

Для создания более глубокого вакуума в межстенном пространстве емкости для эффективной работы СВИ вне засыпанного в нижней части емкости аэрогеля была предложена технология *горячего азотного полоскания* от остаточных газов и последующее вакуумирование межстенного пространства вакуумной полости до значения $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. в теплом состоянии.

Последующие испытания цистерны ЖВЦ-100М на жидком водороде показали, что при вакууме в межстенном пространстве емкости $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. потери водорода в ней в сутки составили 0,75...0,8 %. Дальнейшие работы в этом направлении были приостановлены ввиду прекращения программ «Энергия — Буран».

Следующим этапом совершенствования конструкции ЖВЦ-100М и технологии транспортировки стало решение проблемы повышения безопасности при транспортировке жидкого водорода в условиях железной дороги.

В условиях эксплуатации транспортной цистерны с жидким водородом могла возникнуть реальная опасность нарушения целостности оболочки емкости, например, из-за ее пробоя автосцепкой при перестроении состава в пути следования или схода с рельс экипажной части цистерны с последующим опрокидыванием (данный факт был зафиксирован на заводе — изготовителе компонента). Транспортировка жидкого водорода осуществлялась связкой из пяти цистерн с вагонами прикрытия и вагоном с сопровождающим персоналом в составе грузового поезда общего назначения. Общее количество одновременно перевозимого жидкого водорода составляло 36,7 т.

При такой его массе последствия потери вакуума в теплоизолирующей полости емкости цистерны могли быть непредсказуемыми. Поэтому было принято решение в условиях испытательного полигона провести исследовательские работы на штатной цистерне ЖВЦ-100М с экранно-вакуумной теплоизоляцией с имитацией потери вакуума через вакуумный вентиль, установленный на кожухе цистерны.

Предварительно были разработаны, изготовлены и испытаны на производительность на стендах предприятия предохранительные клапаны жидкости, обеспечивающие сброс давления паров водорода при полной потере вакуума в изоляционной полости емкости без превышения давления в сосуде выше допустимого. Сброс паров водорода из емкости через предохранительные устройства должен быть безопасным относительно окружающих предметов на железной дороге.

В ходе экспериментальных исследований нужно было установить:

- темп роста давления в сосуде емкости с жидким водородом;
- адекватность выполненных расчетов по проходным сечениям предохранительных клапанов;
- риск при возникновении аварийной ситуации вследствие разгерметизации емкости цистерны с жидким водородом;
- оценка теплопроводности экранно-вакуумной теплоизоляции при внезапной потере вакуума в изоляционной полости емкости.

В ходе экспериментальных исследований предохранительный клапан обеспечил полный сброс нарастающего давления паров водорода в сосуде емкости.

При проведении внешнего осмотра цистерны по окончании испытаний было установлено следующее:

- по всей длине оболочки цистерны образовались трещины различной конфигурации и длины (от 0,2 до 1,5 м) вследствие температурных воздействий сконденсировавшегося воздуха, нижний предел рабочей температуры кожуха из стали 09Г2С составил 70 °С, а самая низкая температура кожуха в ходе эксперимента достигала 74 К, что было зафиксировано температурными датчиками, установленными на кожухе емкости;

- в процессе эксперимента пожаровзрывоопасной ситуации не возникало; появившиеся трещины на оболочке и хребтовой балке рамы экипажной части цистерны образовались вследствие скапливания жидкого воздуха в нижней части теплоизоляционной полости; по окончании эксперимента были проведены восстановительные работы, и цистерна своим ходом была отправлена на предприятие-изготовитель.

В выводах комиссии по результатам эксперимента было предложено в дальнейшем оболочку цистерны изготавливать из низколегированной стали 12Х18Н10Т.

Результаты экспериментальных исследований показали, что даже при возникновении крайне аварийной ситуации с транспортной железнодорожной цистерной ЖВЦ-100М в условиях железной дороги можно обеспечить безопасность самой цистерны, а также предотвратить негативное воздействие на окружающую среду.

Это позволило при создании железнодорожных транспортных агрегатов нового поколения и особенно контейнеров-цистерн для жидкого водорода использовать результаты, полученные в процессе уникальных экспериментальных исследований.

Следующей решаемой задачей стало совершенствование запорной арматуры и контрольно-измерительных приборов.

Создание вакуумной запорной арматуры в гидравлической части вентиля обеспечило уменьшение теплопритока к жидкому водороду в процессе слива (у потребителя) и обмерзание корпуса запорного вентиля. Одновременно в узле клапан — седло запорного вентиля вместо поликарбонатного (применяемого на цистернах для жидкого кислорода) было внедрено дифлоновое уплотнение, что обеспечило полную герметичность в узле седло — клапан запорного устройства. Местный уровнемер жидкого водорода, используемый на цистерне ЖВЦ-100, был заменен дистанционным прибором типа ДМКВ, питающимся от автомобильного аккумулятора и устанавливаемом в шкафу цистерны. Это обеспечивало не только местное измерение уровня водорода, но и выдачу электрического сигнала на дистанционный пульт управления заправкой и сливом как на заводе — наполнителе водородом цистерны, так и при сливе у потребителя компонента ракетного топлива.

Одной из проблем, тесно связанной с повышением эффективности теплоизоляции емкости, является сохранение чистоты жидкого водорода при транспортировке и ожидании перелива в хранилище на площадках слива у потребителя.

Содержание примесей в жидком водороде определяется ОСТ В-113-03-502-86 соответственно для марок А (особо чистый) и марки Б. В этом документе для электрохимического водорода регламентируется содержание примесей азота и кислорода в водороде как на ожигителе завода-поставщика, так и водорода в цистернах, отгружаемого с завода. По прибытии жидкого водорода к потребителю берется анализ на содержание примесей азота и кислорода в жидком водороде и принимается решение о его допуске в системы того или иного комплекса. В целях исследования возможности сохранения чистоты жидкого водорода, используемого как топливо для электрохимических генераторов космических объектов в течение длительного времени транспортировки и хранения жидкого водорода марки А (38 сут, из которых 8 сут составляет непосредственно транспортировка), были проведены исследовательские работы на партии цистерн ЖВЦ-100М с улучшенной теплоизоляцией, испаряемостью водорода в емкости от внешних теплопритоков 0,75...1,1 % в сутки как в стационарном, так и транспортном состоянии, что обеспечивало бездренажную транспортировку водорода с завода-поставщика до потребителя в течение 8–10 сут. В ходе эксперимента контролировалось содержание примесей азота и кислорода в жидком водороде при заливке цистерны и сливе у потребителя. Анализ чистоты жидкого водорода в цистернах при сливе у потребителя показал, что наибольшее содержание примесей азота в жидком водороде (концентрация $C_{N_2} = 3,0 \cdot 10^{-6}$ %, объемная доля) наблюдается в цистерне ЖВЦ-100М вследствие его высокой концентрации в водороде при заливке цистерны ($C_{N_2} = 1,4 \cdot 10^{-6}$ %, объемная доля), в остальных пяти цистернах — 1,2...1,75 $\cdot 10^{-6}$ % (объемная доля). Наименьшее содержание примеси азота ($C_{N_2} = 1,2 \cdot 10^{-6}$ %, объемная доля) в жидком водороде было в емкости с самым высоким содержанием примеси в водороде при отгрузке с завода ($C_{N_2} = 5,3 \cdot 10^{-7}$ %, объемная доля), что является следствием самой низкой испаряемости водорода (0,75 % в сутки) в этой цистерне.

Содержание (объемная доля) примеси кислорода в жидком водороде при сливе в четырех цистернах составило 0,69...1,7 $\cdot 10^{-7}$ %, в двух цистернах — 2,9...3,2 $\cdot 10^{-7}$ % при содержании кислорода в водороде при отгрузке с завода меньше 5...9 $\cdot 10^{-8}$ %.

Во всех случаях содержание примесей азота и кислорода в жидком водороде не превысило нормативную величину у потребителя.

Анализ примесей азота и кислорода в газообразном водороде в «подушке» емкости показал, что их концентрация значительно меньше, чем в жидкости.

Поэтому в качестве совершенствования технологии сохранения кондиции (качества) жидкого водорода при транспортировке и сливе у потребителя рекомендовано для особо чистого водорода (марки А):

- транспортировку компонента производить в цистернах с наименьшей испаряемостью жидкого водорода;
- транспортировку водорода осуществлять в бездренажном режиме (без газосброса);
- слив водорода у потребителя производить под давлением собственных паров водорода в емкости.

Создание железнодорожной цистерны ЖВЦ-100М2. Завершающим этапом научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ явилось создание железнодорожной цистерны на серийных двухосных тележках модели 18-100 (производство АО «Научно-производственная корпорация «Уралвагонзавод» имени Ф.Э. Дзержинского) взамен трехосных тележек (производство ПАО «Крюковский вагоностроительный завод, г. Кременчуг, Полтавская обл., Украина), ранее применяемых на цистернах ЖВЦ-100, ЖВЦ-100М. Это позволило обеспечить серийный выпуск данного изделия (АО «НПК «Уралвагонзавод»), не прибегая к кооперации с зарубежными партнерами, расширить сеть железных дорог, где можно эксплуатировать цистерну для жидкого водорода. Одновременно за счет снижения массы экипажной части (тележек, рамы, платформ) удалось уменьшить массу всей цистерны с 87,5 до 73,5 т (рис. 5).



Рис. 5. Железнодорожная цистерна модели ЖВЦ-100М2 для транспортировки жидкого водорода

Внутренний сосуд, изготавливаемый на цистернах ЖВЦ-100 и ЖВЦ-100М из алюминиевого сплава АМг-5, также претерпел изменение. Сосуд стал изготавливаться из нержавеющей стали 12Х18Н10Т,

что дало возможность исключить применение биметаллических переходников между алюминиевым сосудом и трубопроводами цистерны, изготавливаемых из нержавеющей стали, что часто было причиной негерметичности в этом соединении.

Снижение рабочего давления в сосуде при транспортировке жидкого водорода до 0,25 МПа позволило увеличить перевозимую массу водорода с 7000 до 7500 кг [9]. За счет применения более эффективного адсорбента — силикогеля и технологии его применения в процессе эксплуатации цистерны ЖВЦ-100М2 удалось уменьшить потери водорода до 0,7...0,8 % в сутки (таблица).

Технические характеристики железнодорожных цистерн для жидкого водорода

Наименование параметра	Модель железнодорожной цистерны		
	ЖВЦ-100	ЖВЦ-100М	ЖВЦ-100М2
Геометрический объем, м ³	119	119	119
Рабочее давление в сосуде, МПа	0,25	0,25	0,25
Перевозимая масса водорода в емкости, кг	7000	7000	7500
Тип железнодорожной тележки	Трехосная	Трехосная	Двухосная
Тип теплоизоляции	Многослойно-порошково-вакуумная	Многослойно-порошково-вакуумная	Многослойно-вакуумная с частичной засыпкой порошком
Потери жидкого водорода от испарения, % в сутки	1,2	1,2	0,8
Масса цистерны, кг	87 800	87 800	73 500
Габарит емкости	1Т	1Т	1Т
Габаритные размеры емкости, мм:			
длина	23 600	23 600	23 600
ширина	3180	3180	3180
высота	3770	3770	3770
<i>Примечание.</i> Способ выдачи водорода из емкости верхний, с наддувом от стороннего источника; материал сосуда — алюминиевый сплав АМг-5; материал оболочки — сталь 09Г2С.			

Перспективы создания железнодорожной цистерны нового поколения ЖВЦ-100М3.

АО «Уралкриомаш» произвел в интересах госкорпорации «Роскосмос» в период 1967–1993 гг. более 100 единиц железнодорожных цистерн для транспортировки жидкого водорода:

1967–1972 гг. — 57 цистерн ЖВЦ-100 в целях выполнения советской программы лунных пилотируемых полетов для ракетно-космической системы «Н1-Л3»;

1985–1990 гг. — 54 цистерны ЖВЦ-100М2 для выполнения программы «Энергия-Буран»;

1990–1993 гг. — 5 цистерн ЖВЦ-100М2 для доставки жидкого водорода на испытательные стенды на космодром Байконур и на полигон «НИИМаш» (г. Нижняя Салда);

2016 г. – настоящее время — разработка конструкции цистерны нового поколения ЖВЦ-100М3 в интересах госкорпорации «Роскосмос».

Ввод в эксплуатацию нового российского космодрома «Восточный» в Сибири и расположение основных заводов — производителей жидкого водорода в дальнем зарубежье (г. Чирчик, Узбекистан, г. Днепродзержинск, Украина) и только один завод в России (г. Сергиев-Посад, Московская обл.), соответственно, выдвигает и новые дополнительные требования к техническим характеристикам цистерны:

- установку на экипажной части цистерны (платформе) «защиты» от возможной пробивки емкости автосцепкой соседней цистерны на сортировочных горках;

- снижение потерь водорода при транспортировке до уровня 0,5 % в сутки и увеличение времени бездренажной транспортировки до 15–20 сут;

- установление на цистернах датчиков, позволяющих отслеживать местонахождение цистерны.

Для решения этих задач необходимо осуществить следующие мероприятия:

- разработать усовершенствованный вид слоисто-вакуумной теплоизоляции за счет внедрения новых эффективных составляющих изоляции: металлизированной пленки и прокладочного материала; ввести перфорации и гофрирования пакетов изоляции;

- применить стеклопластиковые стержни, опоры с низкой теплопроводимостью и увеличенной прочностью;

- усовершенствовать вакуумирование теплоизоляционной полости цистерны за счет применения современных высокоэффективных вакуумных насосов.

Транспортировка жидкого водорода в контейнерах-цистернах.

В настоящее время большое внимание в России и за рубежом уделяется разработке и созданию криогенных контейнеров-цистерн для транспортировки сжиженных кислорода, азота, метана, этилена. Транспортировка их в контейнерах-цистернах обеспечивает эффективные мультимодальные (смешанные) перевозки криогенных жидкостей. Эти перевозки характеризуются следующими преимуществами:

- возможностью перевозки криогенных компонентов в контейнерах-цистернах автомобильным, железнодорожным и морским транспортом;

- прямой доставкой криогенного компонента от завода-изготовителя к потребителю;
- минимизацией потерь жидкого криогенного компонента вследствие сокращения количества переливов продукта;
- уменьшением снижения качества (насыщением примесями) продукта за счет сокращения переливов продукта;
- отсутствием необходимости в использовании дорогостоящих терминалов слива — налива продукта.

При создании контейнера-цистерны для транспортировки жидкого водорода одна из главных задач, решаемая разработчиком, — это обеспечение максимального времени бездренажного транспортирования и контрольного времени удержания (время между установлением первоначального состояния наполнения емкости с последующей выдержкой до отправки потребителю при давлении 0,13...0,15 МПа и повышением давления в результате теплопритока до давления открытия предохранительных клапанов).

Решение этой задачи продиктовано следующими соображениями. В отличие от транспортировки жидкого водорода в железнодорожных цистернах, когда в процессе транспортирования водорода сопровождающие специалисты могут осуществлять газосброс из емкости через БДУ по достижении предельно допустимого значения давления в емкости в специальных пунктах железнодорожной ветки, при транспортировке водорода в контейнерах-цистернах таможенными органами пломбируются двери арматурного шкафа и, следовательно, доступ к дренажным вентилям исключен. Осуществляется только визуальный контроль за давлением в емкости.

Имеется несколько факторов, влияющих на время бездренажной транспортировки жидкого водорода. Прежде всего это величина испаряемости водорода в емкости, зависящая от эффективности теплоизоляции. Другим фактором является максимально допустимая величина рабочего давления водорода в емкости, которая не должна превышать критического значения с учетом равновесной температуры жидкости и степени заполнения емкости. Ниже приведены технические характеристики контейнера-цистерны для жидкого водорода (типоразмер ISO 1496-3-1995 — 1 BB):

Геометрический объем, м ³	20,0
Рабочее давление в сосуде, МПа.....	1,2
Перевозимая масса водорода, кг	1270
Масса тары, кг.....	11,2
Время бездренажной транспортировки (0,11... 1,2 МПа), сут.....	53
Габаритные размеры контейнера-цистерны, мм:	
длина	9125

ширина	2438
высота	2591
Тип изоляции	Многослойно-вакуумная
Материал:	
сосуда.....	Сталь 12x18Н10Т
оболочки.....	Сталь 09Г2С
Способ выдачи водорода из емкости с наддувом от стороннего источника.....	Верхний

Контейнер-цистерна для жидкого водорода модели КЦВ-20/1,2 [10] представляет собой криогенную емкость, оснащенную арматурным отсеком, выполненную в виде контейнера типоразмера 1ВВ. В нижних боковых нишах смонтированы два баллона, которые вместе с коммуникациями и арматурой входят в газоснабжение, предназначенное для продувки дренажных и приборных коммуникаций газообразным гелием и для открытия — закрытия пневмоуправляемой арматуры (рис. 6).



Рис. 6. Контейнер-цистерна для перевозки жидкого водорода

С «переднего» торца емкости расположен арматурный отсек, обеспечивающий защиту коммуникаций, установки приборов и электрооборудования от внешних воздействий. В арматурном отсеке смонтированы коммуникации с запорно-предохранительной арматурой, контрольно-измерительными приборами, фланцы и штуцера для стыковки с внешним оборудованием.

К «заднему» днищу и «переднему» торцу арматурного отсека приварены рамы из сварных квадратных труб. По углам рам установлены два нижних и два верхних фитинга (элементы крепления КЦВ к средствам транспортировки).

К недостаткам транспортировки жидкого водорода в контейнерах-цистернах следует отнести следующие:

- ограничение нормативными документами массогабаритных размеров контейнеров-цистерн: по массе автопоезда (тягач плюс

фитинговая платформа, плюс масса брутто контейнера-цистерны) должны составлять не более 42...44 т;

- допустимая масса брутто 40- и 45-футового* контейнера-цистерны не должна превышать 36 т; при максимальном допускаемом габарите 45-футового контейнера-цистерны (объем емкости — 54 м³) перевозимая масса водорода составит 3,5 т, что вдвое меньше, чем цистерной ЖВЦ-100М2;

- отечественные железнодорожные погрузочно-разгрузочные терминалы, как правило, оборудованы кранами, позволяющими обслуживать 20-футовые, в исключительных случаях 40-футовые контейнеры-цистерны;

- транспортировка жидкого водорода связана с явлением температурного расслоения водорода в емкости, когда в стационарном состоянии цистерны темп роста в «подушке» емкости значительно превышает рост давления при движении цистерны, поэтому при эксплуатации водородных контейнеров-цистерн следует избегать длительных стационарных стоянок контейнера.

В настоящее время рассматривается вопрос создания 40-футового контейнера-цистерны объемом 40 м³ и перевозимой массой водорода 2,5 т и 45-футового контейнера-цистерны объемом 54 м³ и массой продукта 3,5 т. Это позволит решить вопросы доставки жидкого водорода на испытательные стенды как для отработки ЖРД, так и разгонных блоков ракет-носителей.

Заключение. Разработаны конструкционные и теплоизоляционные материалы, работоспособные при температуре жидкого водорода, и найдены конструкторские решения, обеспечивающие надежную работу транспортных конструкций при низких температурах и высоких динамических нагрузках в процессе эксплуатации.

В результате проведенных исследований различных типов теплоизоляции емкостей транспортных изделий (слоисто-вакуумной, порошково-вакуумная, слоисто-порошково-вакуумная) на натуральных образцах цистерн типа ЖВЦ-100М на заводе — изготовителе жидкого водорода удалось добиться снижения испаряемости жидкого водорода в транспортной цистерне в 1,5...2,0 раза.

Исследования в области обогащения примесями в жидком водороде в процессе его транспортировки решили проблему сохранения качества жидкого водорода при его доставке на испытательные комплексы ЖРД.

Впервые исследованы процессы возникновения аварийных ситуаций: вследствие разгерметизации теплоизоляционного пространства емкости железнодорожной транспортной цистерны для перевозки жидкого водорода. Рекомендованы конструктивные решения (введение

* По системе СИ: 1 фут = 30,48 см.

оболочки из нержавеющей стали, конструктивное исполнение предохранительных клапанов, «защиты» емкости от пробоя автосцепкой) и на других типах железнодорожных криогенных цистерн, в частности для кислорода, азота, аргона моделей 15-558С-03, 15-558С-04.

Накопленный опыт позволяет в настоящее время успешно создавать транспортное оборудование при реализации отечественных программ на период 2017–2025 гг.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева 1946–1996 гг.* Москва, Менонсовполиграф, 1996, 670 с.
- [2] *ОАО «Уралкриомаш» «Малая земля Вагонки».* Екатеринбург, СВ-96, 2001, 208 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] Козлов С.И., Фатеев В.Н. *Водородная энергетика: современное состояние, проблемы, перспективы.* Москва, Газпром-ВНИИГАЗ, 2009, 520 с.
- [5] Зашляпин Р.А., Павленко С.Т., Черемных О.Я. Создание транспортных и стационарных средств заправки жидким водородом лунного орбитального комплекса. *Технические газы*, 2007, № 4, с. 15–20.
- [6] Кузьменко И.Ф., Румянцев Ю.Н., Сайдадь Г.И. Современные тенденции в конструировании и изготовлении резервуаров для хранения и транспортирования жидкого водорода. *Технические газы*, 2008, № 1, с. 53–58.
- [7] Гельперин И.И., Ильинский А.А., Алмазов О.А., Адугин И.А. *Жидкий водород.* Москва, Химия, 1980, 228 с.
- [8] Черемных О.Я., Зашляпин Р.А., Чмель А.А. *Криогенная цистерна.* Пат. № 2059147 Российская Федерация, 1996, бюл. № 12, 7 с.
- [9] Черемных О.Я., Зашляпин Р.А., Карлов И.А., Чмель А.А. *Способ транспортировки жидкого водорода.* Пат. № 2064626 Российская Федерация, 1996, бюл. № 21, 6 с.
- [10] Черемных О.Я., Зашляпин Р.А., Насибулин И.К. *Контейнер-цистерна.* Пат. № 2259312 Российская Федерация, 2005, бюл. № 24, 7 с.

Статья поступила в редакцию 31.01.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Черемных О.Я. Создание, совершенствование конструкции, перспектива развития транспортных средств для жидкого водорода. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 3. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-3-1602>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на 13-й Международной научно-практической конференции «Криогенные технологии и оборудование. Перспективы развития», состоявшейся 1–2 ноября 2016 г., Москва

Черемных Олег Яковлевич — канд. техн. наук, генеральный конструктор АО «Уралкриомаш». Область деятельности и научных интересов — криогенная техника. e-mail: cryont@cryont.ru

Creation, design improvement, development prospect of vehicles for liquid hydrogen

© O.Ya. Cheremnykh

Uralcryomash JSC, Nizhniy Tagil, 622051, Russia

The study reports on the hydrogen transport products development on the basis of analysis of previously created structures for transporting liquid hydrogen to implement modern promising hydrogen technologies used in the rocket, space, marine and other industries. In the research we looked for optimal solutions in choosing thermal insulation of transport products for liquid hydrogen. We opted for screen-powder-vacuum heat insulation and justified this choice, as well as the amount of vacuum in the tank interstitial space per the amount of hydrogen losses in the transport product. The analysis of liquid hydrogen purity during transportation made it possible to identify the main impurities and to assess the change of their concentration in hydrogen during transportation. We also made the choice of criteria for technological operations ensuring the preservation of liquid hydrogen quality in a transport tank. According to findings of these studies, we suggest a technological operation of “draining off” hydrogen at the rocket-space complex without tank pressurizing from an extraneous source of pressurizing gas, using only its “pure” hydrogen vapor. The work is the first to present the results of experimental studies on the effects of vacuum loss in a tank on the full-scale sample of a hydrogen tank of the ZhVTS-100M model in the emergency situation. Based on these studies, it was possible to justify the choice of material and the construction of the cryogenic transport tank shell with respect to the tank itself, as well as to ensure the protection against the tank undercarriage damage in case of vacuum loss in the emergency situation. The presented recommendations formed the basis for designing the majority of transport cryogenic products for transportation of liquefied (cryogenic) gases: oxygen, nitrogen, argon, liquefied natural gas. The study is the first to give the description and technical characteristics of a prospective transport product — container-tank for liquid hydrogen for multimodal transportations.

Keywords: liquid hydrogen, railway tank, tank-container, automobile tank, thermal insulation, evaporability, safety-drainage device, drainless transportation, hydrogen purity, container platform, railway platform

REFERENCES

- [1] *Raketo-kosmicheskaya korporatsiya “Energiya“ im. S.P. Koroleva 1946–1996 gg.* [S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia in 1946–1996]. Moscow, Menonsovpoligraf Publ., 1996, 670 p.
- [2] *ОАО “Uralkriomash” “Malaya zemlya Vagonki”* [Uralcryomash JSC. Small land of Vagonki]. Ekaterinburg, SV-96, 2001, 208 p.
- [3] Arkharov A.M., Kunis I.D. *Kriogennye zapravochnyye sistemy startovykh raketno-kosmicheskikh kompleksov* [Cryogenic refueling systems of launch rocket and space complexes]. Barmin I.V., ed. Moscow, BMSTU Publ., 2006, 252 p.
- [4] Kozlov S.I., Fateev V.N. *Vodorodnaya energetika: sovremennoe sostoyanie, problemy, perspektivy* [Hydrogen energy: current state, problems, prospects]. Moscow, Gazprom-VNIIGAZ Publ., 2009, 520 p.
- [5] Zashlyapin R.A., Pavlenko S.T., Cheremnykh O.Ya. *Tekhnicheskie gazy — Technical Gases*, 2007, no. 4, pp. 15–20.

- [6] Kuzmenko I.F., Rumyantsev Yu.N., Saydal G.I. *Tekhnicheskie gazy — Technical Gases*, 2008, no. 1, pp. 53–58.
- [7] Gelperin I.I., Ilinskiy A.A., Almazov O.A., Adugin I.A. *Zhidkiy vodorod* [Liquid hydrogen]. Moscow, Khimiya Publ., 1980, 228 p.
- [8] Cheremnykh O.Ya., Zashlyapin R.A., Chmel A.A. *Kriogennaya tsisterna* [Cryogenic tank]. Patent RF no. 2059147, 1996, bul. no. 12, 7 p.
- [9] Cheremnykh O.Ya., Zashlyapin R.A., Karlov I.A., Chmel A.A. *Sposob transportirovki zhidkogo vodoroda* [The method of transporting liquid hydrogen]. Patent RF no. 2064626, 1996, bul. no. 21, 6 p.
- [10] Cheremnykh O.Ya., Zashlyapin R.A., Nasibulin I.K. *Konteyner-tsisterna* [Tank-container]. Patent RF no. 2259312, 2005, bul. no. 24, 7 p.

Cheremnykh O.Ya. (b. 1950) graduated from Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev in 1973. Cand. Sc. (Eng.), general designer of Ural-cryomash JSC. Research interests include cryogenic engineering.
e-mail: cryont@cryont.ru