

УДК 621.59

**И.Ф. Кузьменко, И.М. Морковкин, Г.И. Сайдаль, К.В. Безруков, Ю.Н. Румянцев**

ОАО «Криогенмаш», пр. Ленина, 67, г. Балашиха Московской области, РФ, 143907

e-mail: kuzmenko@cryogenmash.ru

## ОПЫТ СОЗДАНИЯ КРУПНОМАСШТАБНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ, ХРАНЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ЖИДКОГО ВОДОРОДА

*Крупнотоннажные производства жидкого водорода, а также соответствующую инфраструктуру его использования начали создавать с середины XX в. для реализации различных программ освоения космоса. В настоящее время водород рассматривается как идеальное экологически чистое топливо для наземных и авиационных транспортных средств и др. объектов. Для развития водородной энергетики необходимо создание совершенного оборудования для всего технологического цикла использования водорода: ожижение-хранение-транспортирование. На основе анализа опыта ОАО «Криогенмаш» и с учётом современных тенденций развития криогенной техники рассматриваются проблемы создания необходимого оборудования. Уделяется внимание разработке ряда эффективных ожижителей водорода с гелиевым криогенным циклом производительностью 600, 1500, 3000 и 10000 л/ч жидкого водорода. При использовании в гелиевом цикле вместо винтовых компрессоров их поршневых аналогов удельный расход энергии составит 10-12 кВт·ч/кг жидкого водорода. Приводятся характеристики резервуаров для хранения жидкого водорода, автомобильных и железнодорожных цистерн для его доставки потребителям. Сообщается о разработке нового поколения этих изделий для использования в современных перспективных водородных технологиях.*

**Ключевые слова:** Жидкий водород. Ожижители водорода. Гелиевый криогенный цикл. Водородный криогенный цикл. Удельные затраты энергии на получение жидкого водорода. Резервуары для жидкого водорода. Потери от испарения. Транспортные цистерны.

**I.F. Kuzmenko, I.M. Morokovkin, G.I. Saidal, K.V. Bezrukov, Yu.N. Rumyantsev**

## EXPERIENCE IN DEVELOPMENT OF LARGE-SCALE EQUIPMENT FOR LIQUID HYDROGEN PRODUCTION, STORAGE AND TRANSPORTATION

*Tonnage manufactures of liquid hydrogen and also corresponding infrastructure of its use have started to create with the middle of XX century for realization of various programs for an outer space exploration. Now hydrogen is considered as well as ideal pollution-free fuel for ground and aviation vehicles, etc. objects. For development of hydrogen power is necessary to creation the perfect equipment for all work cycle of hydrogen using: liquefaction-storage-transportation. On the basis of the analysis of experience of JSC «Cryogenmash» and in view of modern trends of cryogenic engineering development, the problems of creation are examined. Pays attention to development of some effective liquefiers for hydrogen with helium cryogenic cycle by productivity 600, 1500, 3000 and 10000 l/h of liquid hydrogen. At use in helium cycle instead the screw compressors of their piston analogues the specific power consumption will make 10-12 kW·h/kg of liquid hydrogen. The characteristics of liquefiers, liquid hydrogen storage tanks, road and railway tankers for its delivery to the consumer are given. It is informed on development of new generation of more perfect equipment for use in modern perspective hydrogen technologies.*

**Keywords:** Liquid hydrogen. Hydrogen liquefiers. Helium cryogenic cycle. Hydrogen cryogenic cycle. Specific power consumption for liquid hydrogen production. Liquid hydrogen tanks. Evaporation losses. Transport tanks.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Разработки систем промышленного использования жидкого водорода исторически были связаны с развитием ракетно-космической техники (РКТ). В предшествующей публикации [1] подробно изложены вопросы создания стартовых криогенных заправочных комплексов, в том числе и жидководородных. Отвечая сложным требованиям разработчиков РКТ, эти системы характеризуются рядом специфических и уникальных параметров.

К концу XX-го века ситуация стала существенно изменяться. Загрязнение атмосферы и надвигающееся глобальное изменение климата способствовали росту научного и общественного интереса к водороду как к идеальному экологически чистому топливу. В США, Европейском Союзе, Японии и в других странах созданы правительственные структуры по развитию водородной энергетики. Ими осуществляется большой объём исследований и разработок при государственной финансовой поддержке. К водородной энергетике проявляют интерес не только авиация, автомобильный транспорт, но также нефтехимическая промышленность, технологии обработки металлов, очистки моторных топлив и масел и мн. др. Растёт производство жидкого водорода, вводятся в эксплуатацию новые мощности в США, Германии и Японии.

К сожалению, существовавшее в СССР довольно масштабное производство жидкого водорода практически уничтожено. Сейчас разработки по этой тематике поддерживаются в основном зарубежными заказчиками. В последнее время, однако, наблюдаются явные признаки возрождения практического интереса к водородной проблематике.

Принимая во внимание мировые тенденции и перспективы развития научно-технических программ в России, ОАО «Криогенмаш» представляет настоящую статью как исследование и обобщение собственного опыта создания комплексов жидководородного оборудования по всему технологическому циклу использования водорода: ожижение-хранение-транспортирование.

## 2. ОЖИЖИТЕЛИ ВОДОРОДА

Наше предприятие имеет давние традиции и опыт создания производств жидкого водорода и инфраструктуры его распределения и использования в РКТ [1-4]. Первый ожижитель водорода, получивший название агрегат 501М, был разработан и пущен в эксплуатацию в «НИИхиммаш» (г. Сергиев Посад) в 1967 г. Вслед за этим в 1970 г. были введены в эксплуатацию четыре установки 501М на Чирчикском ПО «Электрохимпром».

В установке 501М использовался дроссельный цикл высокого давле-

ния водорода с предварительным аммиачным охлаждением и внешним азотным детандерным циклом, в котором жидкий азот кипел на двух температурных уровнях. Производительность установки составляла 180 кг/ч (2500 л/ч). Удельный расход энергии был на уровне 40 кВт·ч/кг жидкого продукта. Введённые мощности обеспечили получение 5000 т/год жидкого водорода, что удовлетворяло потребности создаваемой РКТ.

Опыт сооружения первых достаточно крупных производств жидкого водорода выявил ряд конструктивных недостатков агрегата 501М, а, самое главное, необходимость повышения энергетической эффективности криогенной системы. С этой целью был сооружен агрегат 503 с водородным турбодетандерным циклом среднего давления, который характеризовался более низкими удельными энергозатратами, составлявшими 25,6 кВт·ч/кг жидкого водорода. Параллельно был разработан проект модернизации агрегатов 501М. В них, помимо конструктивных доработок в системе орто-параконверсии, дополнительно были внесены изменения в технологическую схему за счёт организации турбодетандерного криогенного цикла на водороде с давлением 12 МПа. Это позволило более, чем вдвое, повысить производительность установки и снизить удельные затраты энергии до 26 кВт·ч/кг. Модернизированная установка стала называться агрегатом 501М-1. К 1986 г. на ПО «Электрохимпром» два агрегата из четырёх были модернизированы, в результате чего суммарная производительность завода достигла 1160 кг/ч жидкого водорода. Структурная схема производства жидкого водорода на этом объекте представлена на рис. 1.

Разработки по этой тематике в ОАО «Криогенмаш» были продолжены. Для подтверждения укажем на созданные нашими специалистами проекты ожижителей ОВ-0,4 и ОВ-0,6 с производительностью 400 и 600 кг/ч, соответственно. Удельные затраты энергии в них достигли почти 22 кВт·ч/кг жидкого водорода. К сожалению, начавшийся период нестабильности в экономике не позволил реализовать эти проекты. К тому же отечественные потребности в жидком водороде снизились до минимума. Проявлялся лишь интерес к разработке ожижителей малой произ-

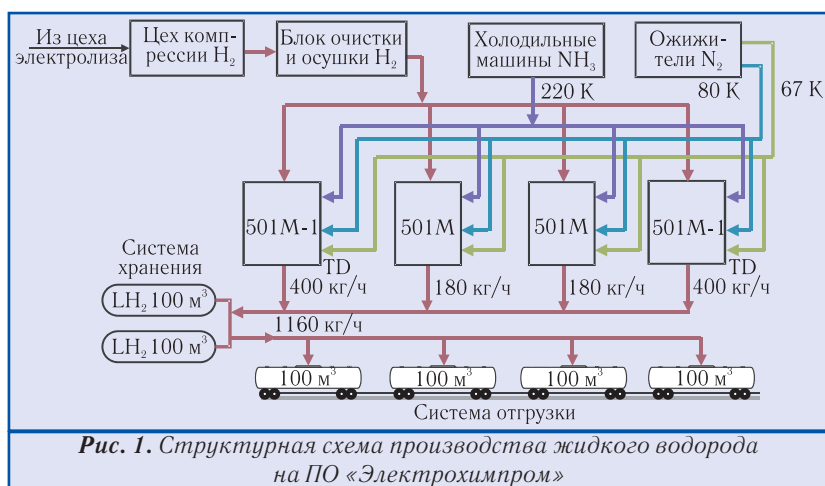


Рис. 1. Структурная схема производства жидкого водорода на ПО «Электрохимпром»

водительности (15 и 20 л/ч).

Между тем в передовых странах продолжали заниматься разработкой установок ожижения водорода не только более высокой производительности, но и повышенной энергетической эффективности. Так, фирма «Air Products & Chemical Inc.» создала ожижитель водорода производительностью 2900 кг/ч, а фирма «Prahaig» — производительностью 1250 кг/ч [5]. Среди европейских стран следует отметить фирму «Linde AG», которая выпускает ряд ожижителей средней производительности. В Ингольдштадте, например, работает установка этой фирмы производительностью 180 кг/ч [6], в Лейне и в Японии — по 210 кг/ч [7,8], в Магоге (Канада) — 565 кг/ч [9]. Расчётный удельный расход энергии для подобных установок находится в диапазоне 12-16 кВт·ч/кг жидкого водорода. Обеспечение низких энергетических затрат достигается, в основном, за счёт высокоэффективных поршневых компрессоров и организации многоступенчатого расширения в турбодетандерах.

В последние годы в связи с ожиданиями общепромышленного применения жидкого водорода для технологических целей и в качестве топлива требования к ожижителям водорода претерпели серьёзные изменения. Наряду с показателями энергетической эффективности, всё больше внимания уделяется безопасности и высоким эксплуатационным качествам: надёжности; обеспечению эффективности регулирования; глубокой очистке от примесей; ремонтпригодности. С этой точки зрения давняя идея об использовании гелиевого криогенного цикла для ожижения водорода оказалась весьма плодотворной и получила реальное развитие на нашем предприятии.



**Фото 2.** Криогенный блок установки ОГ-300 на платформе перед отправкой заказчику

Успеху способствовала разработка гелиевой рефрижераторной установки для водородной системы холодопроизводительностью 7,5 кВт на водородном уровне температур, что примерно равнозначно ожижителю водорода с производительностью 600 л/ч. Установка имеет обозначение ОГ-300. Спроектирована она на основе термодинамического цикла среднего давления с двумя детандерами. Отличительная особенность установки — наличие в ней системы регулирования производительности изменением абсолют-

ных давлений гелия на всасывании винтового компрессора фирмы «Mucot» (Япония) при сохранении постоянными степенями повышения давления в компрессоре и степени расширения в турбодетандерах. При этом массовый расход гелия изменяется в соответствии с требуемой холодопроизводительностью, тогда как объёмные расходы, КПД машин и следовательно удельный расход энергии остаются практически неизменными. На указанный способ криостатирования и устройство для его реализации был получен патент РФ [10]. Установка была изготовлена, смонтирована и пущена в эксплуатацию у заказчика в 2003 г. Она имеет блочно-модульное исполнение. Внешний вид криогенного блока представлен на фото 2. Блоки подготовки гелия, его маслоочистки и осушки имеют аналогичную конструкцию.

В процессе эксплуатации установки ОГ-300 были подтверждены как паспортные характеристики, так и, что более важно, идеи, заложенные в разработку принципиальной схемы [11,12]. На этой базе нами была сформулирована концепция построения водородных ожижителей. С учётом её основных положений разработаны установки производительностью 600, 1500, 3000 и 10000 л/ч жидкого водорода. При создании концепции принимались во внимание как вопросы термодинамической эффективности, так и схемно-конструктивные решения, направленные на обеспечение безопасности и эксплуатационной надёжности. В качестве основных отличительных особенностей и преимуществ концепция включает в себя следующие положения:

1. Для охлаждения и ожижения водорода используется гелиевый криогенный цикл с предварительным азотным охлаждением и двумя-тремя ступенями турбодетандеров, циркуляция в котором обеспечивается винтовым маслозаполненным компрессором «Mucot» с регулированием давления на всасывании.

2. Сжатый водород при давлении примерно 5 МПа и в количестве, равном производительности по жидкому водороду, охлаждается в однопоточном контуре жидким азотом и конденсируется холодным гелием, циркулирующим в криогенном цикле.

3. Контур ожижения водорода и гелиевый криогенный цикл конструктивно разделены: их связывают между собой гелиевые коммуникации, температурные уровни которых оптимизируются из условия минимизации потерь от необратимости процессов теплообмена в холодной зоне обоих контуров.

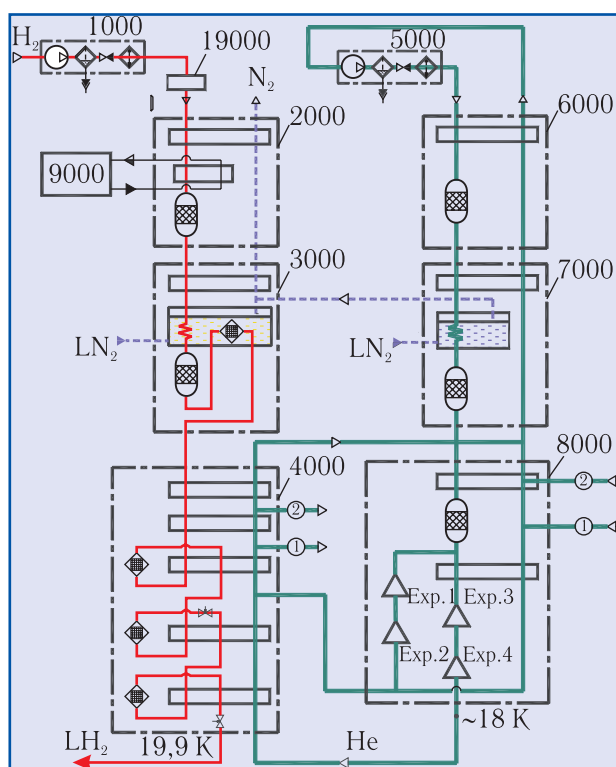
4. С учётом однопоточности контура водорода система очистки водорода от примесей и орто-параконверсии должна проектироваться на паспортную производительность ожижителя.

5. Система очистки гелия от примесей рассчитывается из условия компенсации потерь гелия и с учётом первоначального заполнения её гелием из системы хранения. Система очистки гелия от примесей воздуха построена по оригинальной двухступенчатой схеме включения адсорберов, отличающейся надёжностью работы и простотой эксплуатации.

6. При необходимости ожижитель может произ-

водить переохлажденный водород, что во многих случаях повышает гибкость эксплуатации при коммерциализации продукта.

Принципиальная схема ожижителя водорода, отвечающего изложенным концептуальным требованиям, представлена на рис. 3. Ожижитель водорода состоит из однопоточного контура охлаждения, ожижения и переохлаждения водорода, а также гелиевого рефрижератора. Водородный контур включает в себя компрессор и ряд блоков: каталитической очистки от примесей кислорода; осушки; низкотемпературной очистки от примесей азота; ожижения. Охлаждение водорода происходит за счёт работы холодильной машины, стороннего источника жидкого азота и холодного гелия из циркуляционного цикла. Очистка водорода от примесей производится с учётом качества водорода, поставляемого на ожижение. Орто-параконверсия осуществляется на 4-х температурных уровнях. Содержание пара-формы в производственном водороде — более 96 %.



**Рис. 3.** Принципиальная схема ожижителя водорода с гелиевым криогенным циклом: 1000 — водородный компрессор; 2000 — блок осушки водорода; 3000 — блок низкотемпературной очистки водорода; 4000 — блок ожижения и конверсии; 5000 — циркуляционный гелиевый компрессор; 6000 — блок очистки от масла и осушки; 7000 — блок низкотемпературной очистки гелия; 8000 — рефрижераторный блок; 9000 — холодильная машина; Exp. 1...Exp. 4 — ступени гелиевых турбодетандеров; LN<sub>2</sub>, LH<sub>2</sub> — жидкие азот и водород

Гелиевый рефрижератор состоит из винтового маслозаполненного компрессора, системы очистки от

масла и осушки, системы низкотемпературной очистки от примесей воздуха и холодного блока, т.е. собственно рефрижератора. Холодопроизводительность рефрижератора создается двумя двухступенчатыми детандерами и расходуется на покрытие потерь холода в гелиевом криогенном цикле, а также на ожижение водорода. Температурные уровни подачи гелия в водородный контур и его возврата выбираются по результатам оптимизации процессов в  $Q-T$ -диаграмме ожижения водорода.

Поскольку ожижители водорода с гелиевым криогенным циклом пока ещё не получили широкого распространения, целесообразно сопоставить их характеристики с показателями ожижителей, использующих водородные криогенные циклы [5-8]. По термодинамической эффективности ожижители с гелиевым криогенным циклом должны быть лучше. Так, показатель адиабаты у гелия  $k=1,66$  существенно выше, чем у водорода, что при одинаковом уровне КПД циркуляционных компрессоров обуславливает более высокие значения работы сжатия водорода. По этой же причине расширение гелия в детандерах оказывается более эффективным. В ожижителе с гелиевым криогенным циклом, имеющем только тепловую связь с водородным контуром (рис. 3), как правило, легче обеспечить более низкие собственные потери от необратимости теплообмена в холодной зоне теплообменника. Однако, как показано в работах [8,9], при рассмотрении характеристик промышленных установок ожижения водорода их термодинамические показатели с учётом стоимостных ограничений имеют тенденцию к сближению. Несмотря на предложения ряда экзотических многоступенчатых и высокоэффективных циклов, можно утверждать, что реально для диапазона производительности 1000-3000 л/ч удельные затраты энергии на получение жидкого водорода должны составлять не менее 12-14 кВт·ч/кг.

Важную и существенную роль при сравнении различных ожижителей водорода играют такие эксплуатационные качества, как возможность регулирования производительности и параметров жидкого водорода при сохранении паспортной эффективности. В предложенном нами варианте ожижителя с гелиевым криогенным циклом при регулировании производительности удельные затраты энергии практически не изменяются, тогда как во всех других циклах они значительно возрастают вследствие необходимости отклонения в них от паспортных режимов работы компрессоров и турбодетандеров. Регулирование производительности в созданных на предприятии ожижителях производится простым изменением давления гелия на всасывании циркуляционного компрессора и на входе в турбодетандеры. Низкое принципиально давление водорода в обратном потоке традиционного криогенного цикла в существующих ожижителях приводит к подсасыванию воздуха, что вынуждает дублировать системы очистки водорода от примесей и часто их регенерировать как в производственном, так и в циркуляционном контурах. В противоположность этому в ожижителе водорода с гелиевым криогенным циклом



**Таблица 1.** Основные характеристики ряда ожижителей ОАО «Криогенмаш»

Показатели	Типы ожижителей		
	ОВ-600	ОВ-1500	ОВ-3000
Производительность по жидкому водороду, кг/ч	43	110	225
Тип гелиевого винтового компрессора «Mucot»	250VMD-H	320VMD-H	400VMD-H
Расход потоков в цикле, кг/ч:			
– водородном	45	110	225
– гелиевом	595	1500	2990
Давления сжатия в цикле, МПа:			
– водородном	5,5	5,5	5,5
– гелиевом	2,6	2,6	2,6
Потребность в жидком азоте, кг/ч	400	995	1980
Потребляемая мощность, кВт:			
– водородного компрессора	45	80	175
– гелиевого компрессора	395	1095	2260
– холодильной машины	1,5	8	20
Удельный расход энергии на ожижение кВт·ч/кг, включая затраты на жидкий азот 0,5 кВт·ч/кг	14,9	15,1	15,3

нет условий для подсосывания воздуха. Поэтому в ожижителях нашей конструкции система очистки обеспечивает их работу без регенерации в течение нескольких месяцев.

В случае применения гелиевого криогенного цикла создаются также существенно более благоприятные условия обеспечения взрыво- и пожаробезопасности, чем в водородном цикле. К тому же, расходы водорода в нём, его масса в системе, её разветвлённость, количество машин, приборов и арматуры оказываются много больше, чем в ожижителе с гелиевым контуром. Все оборудование ожижителя водородного цикла относится к категории В1-А, равно как и все помещения для его размещения. В ожижителях с гелиевым циклом большая часть (около 80 %) самого сложного оборудования вообще не подвержена опасности взрыва или пожара и лишь примерно 20 % относится к категории В1-А. Аналогичное заключение может быть сделано о преимуществах ожижителя с гелиевым криогенным циклом и в отношении надёжности его конструкции, доступности и ремонтнопригодности оборудования. Классическая конструктивно-компоновочная схема рефрижераторно-ожижительного оборудования нашего производства, показанная на рис. 2, соответствует специфическим за-

дачам, которые ставятся перед разработчиками при создании ряда ожижителей водорода с раздельным гелиевым криогенным циклом.

Приведём основные характеристики ряда разработанных ожижителей водорода (см. табл. 1). Следует отметить, что нами пока не использованы резервы снижения удельного расхода энергии на получение

жидкого водорода, которые могут быть реализованы при переходе к современным поршневым компрессорам в гелиевом цикле, имеющим гораздо большие КПД по сравнению с винтовыми. В ожижителях предпочтение отдано винтовым компрессорам, исходя из соображений надёжности и специфики их применения при обеспечении жидким водородом РКТ. Принципиальных препятствий для использования поршневых компрессоров в сочетании с системой регулирования давления гелия на всасывании, что характерно для нашей концепции создания водородных ожижителей, не существует. При замене винтовых компрессоров поршневыми в гелиевом цикле следует ожидать снижения удельного расхода энергии на ожижение водорода до 10-12 кВт·ч/кг.

### 3. РЕЗЕРВУАРЫ ДЛЯ ЖИДКОГО ВОДОРОДА

Первый опыт ОАО «Криогенмаш» в области разработки крупного оборудования для хранения жидкого водорода связан с созданием в 1968-69 гг. стартовой системы хранения и заправки для реализации программы полёта на Луну. К сожалению, на этапе завершения поставки оборудования программа была приостановлена и в дальнейшем не имела продолже-

**Таблица 2.** Основные характеристики водородных резервуаров первого поколения

Наименование параметра	Тип резервуара				
	РЦГВ 250/1	РЦВ 63/0,5	РЦВ 16/1,6	РЦВВ 5/0,6	РСВ 1400/1
Вместимость, м <sup>3</sup>	245	66,3	16,3	5	1437
Рабочее давление, МПа	1	0,5	1,6	0,6	1,05
Масса изделия, кг	72000	22000	9200	4000	360000
Масса хранимого водорода, кг	15700	4250	1098	300	91700
Потери водорода от испарения, кг/ч (% в сутки)	1,96 (0,3)	0,92	0,34 (0,75)	0,05 (0,04)	(0,13)
Габаритные размеры, мм:					
– длина	36305	3870	2800	2100	16048
– ширина	3740	3860	2416	2100	16048
– высота	3940	12370	7730	5500	20100

**Таблица 3.** Основные характеристики водородных резервуаров второго поколения

Наименование параметра	Тип резервуара	
	РЦГВ-60 /1,1	РЦГВ-250/0,25
Вместимость, м <sup>3</sup>	60	248
Рабочее давление, МПа	1,1	0,25
Рабочая температура, К (°С)	20 (-253)	20 (-253)
Масса хранимого водорода, кг	3850	16680
Потери жидкого водорода от испарения, кг/ч	менее 0,6	0,2±0,02
Габаритные размеры, мм:		
— длина	14600	36642
— ширина	3900	3806
— высота	3610	3971

**Фото 4.** Водородные резервуары 2×250 м<sup>3</sup> на заводе «Linde AG» в Лейне (Германия)

ния. Однако опыт создания системы впоследствии был использован при строительстве ряда стендовых систем для испытаний жидкостных ракетных двигателей, работающих на водороде. Так, в 1980 г. была создана такая система из десяти водородных резервуаров, четыре из которых объёмом по 230 м<sup>3</sup> предназначались для хранения жидкого водорода, а шесть — объёмом по 63 м<sup>3</sup> использовались в качестве расходных при испытаниях двигателей.

Вершиной деятельности предприятия принято считать создание к 1985 г. двух стартовых заправочных систем по проекту «Энергия-Буран» на базе криогенных резервуаров сферического типа объёмом 1400 м<sup>3</sup> [1,2]. Технические характеристики водородных резервуаров нашего производства 1960-80 гг. представлены в табл. 2.

Второй этап создания водородного оборудования в конце 1990-ых гг. и в последние годы связан с поставками на экспорт. Так, в 1998 г. нами были поставлены водородные системы для индийского космодрома «Shar», в 2002-2003 гг. — три водородные железнодорожные цистерны объёмом по 100 м<sup>3</sup> для Китая [13,14], а в 2006-2007 гг. — два резервуара по 250 м<sup>3</sup> для комплекса фирмы «Linde AG» по накоплению, хранению и отгрузке жидкого водорода потребителям в г. Лейне (Германия) [15]. Основные характеристики водородных резервуаров нового поколения приведены в табл. 3. Фото 4 даёт представление о внешнем виде резервуаров.

Как следует из сопоставления данных таблиц 2 и 3, резервуары нового поколения имеют существенно лучшие характеристики по испаряемости, что соответствует требованиям к системам хранения для обеспечения новых областей применения жидкого водорода. Столь значительного снижения потерь от испарения (примерно в 1,5 раза) удалось достичь проведением системной модернизации всех конструктивных элементов, влияющих на величину теплопритоков: экранно-вакуумной изоляции, крепёжных элементов, опорных конструкций, криоадсорбционных насосов и т.п. Повышение эффективности самой изоляционной системы было обеспе-

чено за счёт увеличения толщины слоя, оптимизации монтажной плотности и более высокого вакуума в слоях, применения пакетной технологии и специально разрабатываемых изоляционных элементов сопряжений поверхностей. Указанные технологические приёмы и оборудование для их реализации внедрены на созданном специализированном участке для изготовления теплоизоляционных систем. Интегральное подтверждение качества резервуаров производится при сдаточных испытаниях на жидком азоте в присутствии заказчика, а затем — на жидком водороде на конкретном объекте [14,15].

#### 4. ТРАНСПОРТНЫЕ ЦИСТЕРНЫ

При территориальной разобщённости потребителей жидкого водорода вопросы его транспортирования имели первостепенное значение. Они были решены в основном, благодаря организации серийного производства железнодорожных цистерн ЖВЦ-100 объёмом 100 м<sup>3</sup> на Уралвагонзаводе. Для транспортирования жидкого водорода на сравнительно небольшие расстояния и, в основном, для специальных целей ОАО «Криогенмаш» создал транспортную водородную цистерну ЦТВ-25/0,6 объёмом 25 м<sup>3</sup>. Эти цистерны являлись также составной частью комплекса для перевозки, заправки и газификации жидкого водорода.

В 90-х гг. в соответствии с контрактом на постав-

**Таблица 4.** Характеристики водородных цистерн второго поколения

Наименование параметра	Тип цистерны	
	ЦТВ-45/1М	РЦГВ-100/0,3
Вместимость, м <sup>3</sup>	45	100
Рабочее давление, МПа	1	0,3
Масса изделия, кг	21760	38030
Масса перевозимого водорода, кг	2740	6050
Потери водорода от испарения, кг/ч (% в сутки)	1,375 (0,7)	(0,6)
Габаритные размеры, мм:		
— длина	15700	25080
— ширина	2500	3100
— высота	3700	3450

ку криогенных систем для индийского космодрома «Shar» была разработана автомобильная цистерна ЦТВ-45/1 объёмом 45 м<sup>3</sup>. Несколько таких цистерн используются и в настоящее время для доставки жидкого водорода с ожижительного завода до стартовой площадки, а также в системе заправки ракеты жидким водородом.

Следует признать, что транспортные цистерны первого поколения (ЖВЦ-100, ЦТВ-25/0,6 и ЦТВ-45/1) с учётом современного уровня техники и производства нуждаются в усовершенствовании. Это получило своё воплощение при выполнении нами заказа одного из китайских предприятий на поставку трёх железнодорожных резервуаров РЦВГ-100/0,3 и автомобильной цистерны ЦТВ-45/1М [14,15]. Подобно тому, как это делалось при улучшении показателей стационарных криогенных резервуаров, в конструкциях цистерн были реализованы современные подходы к проектированию и производству, обеспечившие, например, снижение потерь от испаряемости. Основные технические характеристики цистерн приведены в табл. 4, а их внешний вид — на фото 5 и 6.



**Фото 5.** Железнодорожные цистерны объёмом 100 м<sup>3</sup> перед отправкой в Китай



**Фото 6.** Автомобильная цистерна для жидкого водорода ЦТВ-45/1М

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетний опыт ОАО «Криогенмаш» в области создания производств жидкого водорода, систем его хранения, транспортирования и заправки в последние годы получил дальнейшее развитие. Можно констатировать, что, благодаря этому, при создании инфраструктуры жидкого водорода для водородной энергетики, РКТ и авиации будут использоваться наши современные разработки и отечественный уникальный производственно-технологический потенциал.

Авторы с глубоким почтением посвящают настоящий обзор самоотверженному труду, таланту и достижениям предшествующих поколений конструкторов, исследователей и производственников ОАО «Криогенмаш».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Этапы развития и опыт создания криогенных заправочных и стендовых комплексов ракетно-космической техники/ **А.М. Домашенко, В.Н. Криштал, М.В. Красовицкий и др.**// Технические газы. — 2009. — № 1. — С. 27-33.
2. **Беляков В.П.** Криогенная техника и технология. — М. Энергоиздат, 1982. — 272 с.
3. Опыт создания и эксплуатации инфраструктуры производства, хранения и транспортирования жидкого водорода/ **А.К. Головченко, Ю.В. Горбатский, А.М. Домашенко и др.**// Труды 3-ей межд. конф. «Водородная обработка материалов», Донецк-Мариуполь, 2001. — С. 65-67.
4. **Филин Н.В., Буланов А.Б.** Жидкостные криогенные системы. — Л.: Машиностроение, 1985. — 247 с.
5. **Kinard O.E.** The commercial use of liquid hydrogen over the last 40 years// Proc. of ICEC-17, Bournemouth, 1998. — P. 39-44.
6. Liquid hydrogen for Europe - the Linde plant at Ingolstadt/ **R. Gross, W. Otto, A. Patzelt, M. Wanner**// Reports on Science and Technology. — 1994. — N 54. — P. 37-42.
7. Efficiency of hydrogen liquefaction plants/ **T. Fukano, U. Fitz, K. Lohlein, I. Vinage**// [www.linde-kryotechnik.netrics.ch/public/fachberichte/efficiency\\_of\\_hydrogen\\_liquefaction\\_plants.pdf](http://www.linde-kryotechnik.netrics.ch/public/fachberichte/efficiency_of_hydrogen_liquefaction_plants.pdf).
8. **Bossel U., Eliasson B., Taylor G.** The future of the hydrogen economy: bright or bleak// Final Report, Updated 26 February. — 2005. — P.36.
9. **Matsuda H., Nagami M.** Study of large hydrogen liquefaction process// [www.ena.or.jp/WE-NET/ronbun/1997/e5/sanso1997.html](http://www.ena.or.jp/WE-NET/ronbun/1997/e5/sanso1997.html).
10. Патент № 2238487 РФ, МКИ F25B9/06. Способ криостатирования объекта с переменной тепловой нагрузкой и устройство для его осуществления.
11. **Кузьменко И.Ф., Морковкин И.М., Гуров Е.И.** Концепция создания ожижителей водорода средней производительности с гелиевым холодильным циклом// Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2004. — № 2. — С. 22-24.
12. Патент № 2309342 РФ, МКИ F25J1/02. Способ ожижения водорода с гелиевым холодильным циклом и устройство для его осуществления.
13. **Горбатский Ю.В., Кузьменко И.Ф.** Криогенмаш на этапе реформирования экономики России// Холодильный бизнес. — 2003. — № 4. — С. 34-38.
14. **Сайдадь Г.И., Горбатский Ю.В., Куприянов В.И.** Испытания жидководородных криогенных резервуаров на потери водорода от испарения// Альтернативная энергетика и экология. — 2005. — № 1(21). — С. 30-33.
15. **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.