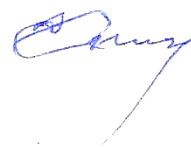


На правах рукописи



**ЧЕРЕМНЫХ Олег Яковлевич**

**СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТИРОВКИ,  
ХРАНЕНИЯ, ГАЗИФИКАЦИИ И ЗАПРАВКИ КРИОГЕННЫХ  
ЖИДКОСТЕЙ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.04.03 – Машины и аппараты, процессы холодильной  
и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

Москва, 2019

Работа выполнена в Нижнетагильском технологическом институте (филиал)  
Уральского федерального университета им. Б.Н. Ельцина

Официальные оппоненты:

**Гречко Александр Георгиевич** доктор технических наук, главный технолог ПАО  
«Газпром».

**Борзенко Евгений Иванович** доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

**Семенов Виктор Юрьевич** доктор технических наук, профессор, начальник лаборатории прогнозирования использования и экономии газомоторного топлива ООО «ГазпромВНИИГАЗ».

Ведущая организация: ФГУП «Центр эксплуатации наземной космической инфраструктуры».

Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ на заседании диссертационного совета Д 212.141.16 при ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» по адресу: 105005, Москва, Лефортовская набережная, д. 1, корпус «Энергомашиностроение».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» и на сайте университета [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.141.16  
кандидат технических наук, доцент

Белова О. В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Концепция федеральной целевой программы «Развитие космодромов на период 2016–2025 годов в обеспечение космической деятельности Российской Федерации» предусматривает строительство и ввод в эксплуатацию на космодроме Восточный ракетно-космического комплекса для выведения ракеты-носителя «Ангара» со средствами выведения космических аппаратов посредством разгонных блоков, работающих на криогенных компонентах: жидком водороде и жидком кислороде.

Поиски эффективных ракетных топлив с меньшим экологическим воздействием на окружающую среду и меньшим стоимостным затратам, выполненных ведущими институтами и предприятиями космической отрасли, привели к решению о возможности и целесообразности использования в ракетно-космической технике топливной пары кислород–метан, как для двигательной установки ракеты-носителя, так и для работы электрохимического генератора системы энергоснабжения космического аппарата.

Топливные элементы на природном газе относят к водородным, исходя из их химических характеристик, так как природный газ предварительно подвергают конверсии в отдельном реакторе или непосредственно в топливном элементе (внутренняя конверсия).

На созданных в Советском Союзе в 1960–1970-х годах водородно-кислородных ЭХГ, практический КПД достигает 70–75 %. От других устройств, реализующих схему непосредственного преобразования химической энергии в электрическую (гальванических элементов и аккумуляторов), ЭХГ существенно отличается тем, что в них реагенты (окислитель и горючее) содержатся не в самой конструкции, как у первых, что ограничивает запас их энергосодержания, а отдельно в резервуарах и подаются в генератор в момент работы.

Разработкой и производством топливных элементов для космических программ занимается большое количество исследовательских центров, университетов и компаний за рубежом, таких как фирма «Пратт энд Уитни» (США) для корабля «Апполон», «Юнайтед технолоджиз корпорейшн» (США), «Дженерал электрик» (США) для программы НАСА «Шаттл», «Аллис-Чалморс» (США).

Система энергоснабжения лунного орбитального корабля по программе «Н1-ЛЗ» и орбитального корабля «Буран» по программе «Энергия – Буран» была построена на базе электрохимических генераторов (ЭХГ) с водородно-кислородными топливными элементами с матричным электролитом, обеспечивающими прямое преобразование химической энергии топлива в электроэнергию и воду. В качестве топливных реагентов в электрохимических генераторах «Волна» и «Фотон» использовались криогенные компоненты: водород высокой чистоты (марки А) и кислород особой чистоты (марки ОЧ), что объяснялось поддержанием необходимого энергоресурса электрохимического генератора системы энергоснабжения орбитального корабля, что делает результаты исследований, полученные при проведении ранее и в наши дни, комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ актуальными, приоритетными и востребованными.

**Цель работы** состоит в исследовании внутрибаковых процессов в докритической и закритической областях с учетом теплофизических и транспортных свойств криогенных жидкостей и разработки средств транспортировки, длительного хранения, газификации и заправки в составе наземных комплексов космической инфраструктуры.

**Задачи работы:**

1. Исследование и разработка средств длительного (до пяти месяцев) хранения водорода высокой чистоты, кислорода особой чистоты при содержании основных примесей в жидком водороде не более  $2,5 \cdot 10^{-5}$  % об., по жидкому кислороду не более  $7,5 \cdot 10^{-4}$  % об.
2. Разработка метода и средств заправки баков жидким водородом высокой чистоты при многовариантности их количества (до восьми баков) и заправляемой массы компонента (до уровня 50, 75, 100 % заполнения баков).
3. Снижение потерь криогенного компонента при транспортировке по водороду до уровня 0,8 % в сутки, по кислороду до уровня 0,17 % в сутки, увеличение перевозимой массы компонента в цистерне на 3–5 т.
4. Разработка средств обеспечения чистоты криогенных компонентов в процессе их заправки в баки системы хранения и подготовки реагентов системы энергопитания космического объекта (СХПР СЭП КО).
5. Разработка способа и средств поддержания чистоты криогенных компонентов в процессе транспортировки на уровне не превышающем величину  $2 \cdot 10^{-5}$  % об. основных примесей в жидком водороде,  $7,5 \cdot 10^{-4}$  % об. в жидком кислороде.
6. Разработка средств хранения и выдачи из резервуара-хранилища жидкого водорода и жидкого кислорода при закритическом давлении до 22,0 МПа.
7. Исследование и разработка средств газификации жидкого водорода при закритических параметрах при давлении в емкости газификатора до 2,5 МПа с переменным расходом до 2,16 кг/ч.
8. Разработка средств и исследование чистоты водорода при его газификации, хранении в газообразном состоянии при закритическом давлении в газгольдерах до 2,5 МПа, в ресиверах до 40 МПа.
9. Создание новых, эффективных, универсальных (мультимодальных) средств транспортировки криогенных компонентов топлив для жидкого водорода, СПГ, кислорода.
10. Исследование и разработка мер безопасности транспортирования криогенных компонентов топлив за счет разработки и внедрения на транспортных агрегатах эффективных средств безопасно-дренажных устройств (БДУ) и предохранительных клапанов при сбросе паров водорода, СПГ в атмосферу.

**Методы исследования.** В работе использовались теоретические и экспериментальные методы исследования. Теоретические и модельные исследования проведены на АО «Уралкриомаш» и Нижнетагильском технологическом институте (филиале) Уральского федерального университета. Экспериментальные исследования проведены на предприятиях: НИИХиммаш (г. Сергиев Посад), НИИМаш (г. Нижняя Салда), Электрохимпром (г. Чирчик, Узбекистан). Достоверность по-

лученных результатов определяется применением: апробированных методик и методов измерений, сертифицированного измерительного оборудования, многократной проверкой повторяемости экспериментальных данных, сходимостью результатов исследований с данными зарубежных и отечественных авторов, опытом промышленной эксплуатации разработанных агрегатов и систем.

### **Научная новизна**

1. Установлено, что переходные процессы в емкостях оказывают существенное влияние на процессы хранения, газификации и выдачу при закритических параметрах криогенного компонента.

2. Получены новые данные по поэтапному изменению концентрации примесей в жидком и газообразном водороде высокой чистоты, кислороде особой чистоты. Сформулированы основные положения обеспечения чистоты водорода и кислорода при их транспортировании, длительном хранении, газификации при докритических и закритических параметрах компонентов и подаче в систему хранения и подготовки реагентов (СХПР) космического объекта.

3. Предложена методика оценки накопления примесей в жидком водороде в процессе его транспортировки на стартовый комплекс с завода-производителя компонента топлива, отличающаяся обоснованием необходимости учета накопления примесей на каждом из этапов доставки на ракетно-космический комплекс жидкого водорода (залива в цистерну, транспортировки, слива компонента).

4. Выполнен анализ влияния схемного решения испарителя жидкого водорода на чистоту образующихся в емкости газификатора паров водорода при различной начальной концентрации примесей азота и кислорода в жидком водороде, в результате чего разработан способ заправки баков космического объекта или емкостей-накопителей наземной системы высокочистым водородом чистотой 99,9999 % об. при закритическом давлении.

5. Обобщены параметры и режимы сброса паров водорода в атмосферу в случае возникновения аварийной ситуации в условиях железнодорожной транспортировки криогенного компонента ракетного топлива (потери вакуума в теплоизоляционной полости транспортного резервуара), предложен новый подход к обеспечению безопасности.

### **Практическая значимость и реализация результатов работы:**

1. На основе исследования процессов газификации жидкого водорода в закритической области давлений показано, что чистота образующегося при этом газообразного компонента соответствует основополагающим требованиям, которые предъявляются к подаваемым в СЭП космического объекта реагентам по чистоте: по водороду и кислороду на уровне соответственно 99,9999 и 99,999 % об. подаваемым в баки СХПР СЭП, и на уровне 99,999 и 99,98 % об., подаваемым непосредственно на ЭХГ СЭП космического объекта, тем самым решена задача создания систем доставки, хранения и подачи водорода на электрохимический генератор системы энергоснабжения космического объекта:

- при длительном хранении водорода в криогенных емкостях-хранилищах при докритическом давлении и подачи его из газификатора при закритических параметрах с переменным во времени расходом в диапазоне от 0 до 2,16 кг/ч при давлении до 2,5 МПа;

- газификация жидкого водорода при докритическом давлении, заправка ресиверов при закритическом давлении до 2,5 МПа высокочистым водородом, длительное хранение газообразного водорода в ресиверах-хранилищах и подачи его на ЭХГ СЭП с переменным расходом при отработке на техническом комплексе;

- при газообразном хранении высокочистого водорода в ресиверах-хранилищах при закритическом давлении до 40,0 МПа и заправки из них шарбаллонов СХПР СЭП различных энергетических объектов высокочистым водородом с последующей подачей на ЭХГ.

2. На основе исследований процессов хранения жидкого водорода и кислорода в емкостях при закритических параметрах разработано и поставлено в интересах Индийского национально-космического агентства емкостное оборудование при рабочем давлении на 22,0 МПа для жидкого водорода и жидкого кислорода для стендовой отработки ракетной ступени на испытательном полигоне в Махендрагири.

3. Решена задача длительного хранения жидкого водорода в резервуарах-хранилищах с испаряемостью компонента не выше 0,30 % в сут. при допустимой концентрации примесей в жидком водороде не превышающей величину  $2 \cdot 10^{-5}$  % об. и бездренажного хранения особо чистого жидкого кислорода в хранилище стартового комплекса.

4. На основе анализа эффективности создания криогенного резервуара для жидкого водорода с экранно-вакуумной теплоизоляцией (азотным экраном) в интересах космодрома «Шарикотта» (ISRO, Индия) создано хранилище жидкого водорода объемом  $100 \text{ м}^3$  с более низкой испаряемостью по водороду не более 0,23 % в сут.

5. Разработаны и испытаны на натурных образцах в процессе эксплуатации различные типы теплоизоляции резервуаров транспортных средств (порошково-вакуумная, слоисто-вакуумная, слоисто-порошково-вакуумная) для транспортировки жидкого водорода, (порошково-вакуумная, волокнисто-вакуумная, слоисто-вакуумная) для транспортировки продуктов разделения воздуха (кислорода, азота, аргона) моделей 15-558С-03, 15-558С-04 с испаряемостью по кислороду не выше 0,17 % в сутки.

6. На основе полученных экспериментальных характеристик слоисто-вакуумной теплоизоляции емкости при потере вакуума в теплоизоляционном пространстве резервуара транспортной цистерны появилась возможность рассчитывать пропускную способность предохранительных устройств водородных емкостей с учетом реального максимального теплопритока к емкости.

7. Решена задача длительного транспортирования высокочистого водорода в железнодорожных цистернах моделей ЖВЦ-100М и ЖВЦ-100М2 как на космодроме, так и на предприятия для испытания ракетных двигателей с испаряемостью водорода не выше 0,8 % в сут. при содержании основных примесей в водороде (азота и кислорода) при сливе у потребителя не выше  $4 \cdot 10^{-6}$  % об.

8. Разработаны основные схемные и конструктивные решения силовых элементов узлов крепления «сосуд – оболочка – рама» криогенных транспортных изделий: вагонов-цистерн, контейнеров-цистерн для перевозки опасных грузов – водорода, СПГ.

9. На основе разработанных методов и средств транспортирования, длительного хранения, газификации и подачи высокочистых криогенных компонентов решена задача заправки баков СХПР СЭП космических и других энергетических объектов до заданного количества жидким водородом с чистотой не ниже 99,9999 % об. и жидким кислородом с чистотой не ниже 99,999 % об.

10. Сформулированы основные положения по разработке, созданию и эксплуатации новых транспортных средств – криогенных контейнеров-цистерн для мультимодальных перевозок жидкого водорода, кислорода и СПГ.

11. Результаты работы внедрены и были использованы на предприятиях и институтах, КБ при разработке конструкторской документации и изготовлении опытных агрегатов и систем: ОАО «Уралкриомаш», КБ общего машиностроения, Научно-исследовательском институте стартовых комплексов им. В.П. Бармина, Центр эксплуатации наземной космической инфраструктуры, Научно-исследовательском институте машиностроения (НИИМаш) в части транспортировки жидкого водорода для стендовых испытаний.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты исследований переходных процессов в емкостях при хранении, газификации и выдаче криогенных компонентов при закритических параметрах.
2. Экспериментальные и теоретическо-расчетные данные по поэтапному изменению концентрации примесей в жидком и газообразном водороде высокой чистоты и кислорода особой чистоты.
3. Методика оценки накопления примесей в жидком водороде в процессе его транспортировки.
4. Результаты анализа влияния схемных решений испарителя жидкого водорода на чистоту, образующихся в емкости газификатора паров водорода.
5. Обоснование нового подхода к обеспечению безопасности железнодорожной транспортировки жидкого водорода.
6. Апробированные схемные решения для транспортных агрегатов ЖВЦ-100М, ЖВЦ-100М2; контейнеров-цистерн моделей КЦМ-35/06, КЦМ-40/07, стационарных резервуаров-хранилищ для жидкого водорода объемом 100 м<sup>3</sup> с различными типами теплоизоляции; систем газификации водорода на докритических и закритических параметрах.

#### **Личный вклад автора:**

1. Непосредственно с участием автора выполнены серии экспериментальных исследований по определению испаряемости жидкого водорода на опытных общепромышленного назначения железнодорожных цистернах моделей ЖВЦ-100М, ЖВЦ-100М2; жидкого кислорода, азота, аргона моделей 15-558С-03, 15-558С-04; для сжиженного природного газа модели 15-5106; контейнеров-цистерн для жидкого водорода модели КЦВ-20/1,2; для сжиженного природного газа моделей КЦМ-35/0,6, КЦМ-40/0,7.

2. Получены экспериментальные данные, проведены их обработка, анализ и обобщения. Получены номограммы расчета испаряемости для кислорода, азота, аргона, СПГ, этилена в цистернах моделей 15-558С-04, 15-5106.

3. Проведены испытания, исследованы режимы безопасного сброса паров водорода в атмосферу в случае возникновения аварийной ситуации в условиях

железнодорожной транспортировки (потери вакуума в теплоизоляционной полости транспортного резервуара). Определены параметры безопасно-дренажного устройства при сбросе паров водорода, СПГ в атмосферу в условиях транспортировки опасных грузов.

4. Разработано свыше 20 схемных решений для транспортных агрегатов моделей ЖВЦ-100М, ЖВЦ-100М2, контейнеров-цистерн моделей КЦМ-35/0,6, КЦМ-40/0,7, стационарных резервуаров-хранилищ для жидкого водорода объемом 100 м<sup>3</sup> с различными типами теплоизоляции; систем газификации водорода на докритические и закритические параметры.

5. Предложены две методики расчета накопления примесей в жидком водороде в процессе его транспортировки в железнодорожных цистернах моделей ЖВЦ-100М, ЖВЦ-100М2; оценки состояния водорода, находящегося при закритическом давлении, при его сливе.

**Апробация работы.** Основные результаты работы были представлены в виде устных докладов на: 10-й Международной конференции «Cryogenics 2008» (Прага, 2008), 12-й Международной конференции «Cryogenics 2012» (Дрезден, 2012), 13-й Международной конференции «Cryogenics 2014» (Прага, 2014), Международной конференции «Водород 2013» CreonEnergy (Москва, 2013), Международной конференции «Водород 2014» CreonEnergy (Москва, 2014), Научно-практической конференции «Криоген-Экспо 2014» (Москва, 2014), Четвертом Петербургском международном годовом форуме «Подвижной состав XXI века: инновации в грузовом вагоностроении» (С-Петербург, 2014), Международной научно-технической конференции (С-Петербург, 2014, 2016), Третьей Международной конференции «Промышленные газы» (Москва, 2013), XX–XIV Международной научно-практической конференции «Криогенные технологии и оборудование. Перспективы развития» (Москва, 2013–2017), Третьей Международной конференции «СПГ–2014», CreonEnergy (Москва, 2014), Международном семинаре по проблемам производства и применения компримирования и сжиженного природного газа (Одесса 2010, 2012, 2014), Международном семинаре по проблемам производства и использования продуктов разделения воздуха (Одесса 2010–2014), Международной научно-практической конференции «Полимеризационные пластмассы» (С-Петербург, 2013, 2016), Международной конференции «СПГ» (Москва, 2017), Международной научно-практической конференции «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» (Москва, 2018), Международной научно-технической конференции «Наука – Образование – Производство» (Нижний Тагил, 2018).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 267 страницах текста, содержит 99 рисунков, 11 таблиц и список литературы из 153 наименований.



## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность, обозначена практическая значимость, сформулированы цель и приоритетные задачи работы.

**Глава 1** посвящена созданию, совершенствованию конструкции, перспективам развития транспортных средств для криогенных ракетных топлив, окислителей и инертных компонентов. Рассмотрены особенности криогенных заправочных комплексов, предназначенных для доставки, хранения, газификации и заправки криогенных компонентов в баки ракеты-носителя, разгонного блока или космического корабля с заданными параметрами, а также поддержания в них определенного количества компонента и необходимой температуры жидкости в течение заданного времени. При этом в процессе подготовки ракеты-носителя к пуску кроме заправки могут осуществляться подпитка баков компонентами топлива, термостатирование продукта в баке ракеты, обеспечение «стоянки ракеты на самоиспарении», слив продукта, повторная заправка. Основополагающими требованиями, которые предъявляются к подаваемым в СЭП космического объекта (КО) реагентам, являются чистота водорода и кислорода на уровне соответственно 99,9999 и 99,999 % об. подаваемым в баки СХПР СЭП, и на уровне 99,999 и 99,98 % об., подаваемым непосредственно на ЭХГ СЭП космического объекта.

Для обеспечения необходимого ресурса и надежности работы энерго модуля, качество водорода должно отвечать следующим требованиям:

- суммарное содержание инертных примесей  $N_2$ , Ar, He, Ne не должно превышать величину  $3 \cdot 10^{-5}$  % об.;
- суммарное содержание химически активных веществ CO,  $CO_2$ , NO,  $NO_2$ ,  $N_2O$ ,  $H_2S$ ,  $SO_2$  не должно превышать величину  $1 \cdot 10^{-6}$  % об.

Введение в перечень нормируемых показателей качества водорода указанных примесей обусловлено следующими обстоятельствами. Электрохимические инертные примеси ( $N_2$ , Ar, He, Ne) при работе ЭХГ накапливаются в газовых полостях, снижая парциальные давления рабочих газов, и, как следствие, уменьшают напряжение генератора. Для восстановления напряжения эти примеси необходимо периодически удалять из энерго модуля, продувая его газовые полости; последнее сопровождается непроизводительным расходом рабочих компонентов. Химически активные микропримеси поглощаются содержащимся в топливных элементах электролитом с образованием соответствующих солей. Следствием этого процесса является снижение электропроводности электролита и изменение его теплофизических характеристик. В итоге не только уменьшается электрохимическая активность элементов, но и оказываются неоптимальными проектные величины параметров влагоудаления, что, в конечном счете, ограничивает ресурс работы ЭХГ. Качество жидкого кислорода, используемого как реагент для ЭХГ СЭП, определяется ТУ 6-21-29-77 «Кислород жидкий особой чистоты. Технические требования». Содержание основных примесей в кислороде марки ОЧ при отгрузке с завода не должно быть по азоту более  $2,5 \cdot 10^{-4}$  % об., по аргону –  $2,5 \cdot 10^{-4}$  % об., суммарное содержание примесей, включая примеси Ne, Ar, He,  $CH_4$ , CO, S,  $N_2O$ ,  $CO_2$ ,  $C_2N_2$  не должно превышать  $7,5 \cdot 10^{-4}$  % об. При подаче жидкого кислорода в баки СЭП суммарное содержание примесей должно быть не больше  $1 \cdot 10^{-3}$  % об., а при непосредственной подаче газообразного кислорода на ЭХГ не более  $2 \cdot 10^{-2}$  % об.

Существенное влияние на энергетическую характеристику ЭХГ оказывают давление, температура и расход подаваемых реагентов.

Вследствие ступенчатого изменения динамической нагрузки ЭХГ СЭП космического объекта расход реагентов, подаваемых на ЭХГ, при его отработке в монтажно-испытательном корпусе или при запуске на стартовой позиции также имеет сложно изменяющуюся во времени характеристику.

Влияние на вольт-амперную характеристику топливного элемента ЭХГ парциального давления реагентов привело к необходимости создания давления перед энергомодулем 1,1–2,5 МПа в течение длительного периода времени. Совокупность этих требований привела к необходимости создания системы хранения и газификации компонентов (водорода) при закритических параметрах как на борту космического объекта, так и на наземном стартовом и техническом комплексах.

Разработанные и созданные при непосредственном участии автора опытные транспортные вагон-цистерны и контейнеры-цистерны для транспортировки криогенных компонентов представлены на Рисунке 1.



Рисунок 1. Транспортные средства доставки криогенных компонентов топлив на ракетно-космический комплекс:

а, б) жидкого водорода моделей ЖВЦ-100М2, КЦВ-20/1,2;

в) жидкого кислорода, азота, аргона модели 15-558-04;

г, д, е) сжиженного природного газа (СПГ) моделей 15-5106, КЦМ-35/0,6, КЦМ-40/0,7

В первой главе также представлены результаты исследований и описание разработанных мероприятий по поддержанию чистоты жидкого водорода на исходном уровне в процессе транспортировки и разработанные меры безопасности при транспортировке жидкого водорода. Основные данные по увеличению концентрации примесей в водороде при транспортировании представлены в Таблице 1 и Таблице 2.

Результаты эксперимента по определению теплофизических параметров при потере вакуума в теплоизоляционной полости транспортной цистерны с жидким водородом модели ЖВЦ-100М представлены в Таблице 3. Иллюстрация процесса обмерзания оболочки в процессе потери вакуума в теплоизоляционной полости емкости цистерны показана на Рисунке 2.



*а)*



*б)*

Рисунок 2. Натурные испытания цистерны с жидким водородом при потере вакуума тепловой изоляции:  
*а)* сброс паров водорода в атмосферу через предохранительные устройства;  
*б)* обмерзание оболочки в процессе потери вакуума

Таблица 1.

**Расчетное постадийное увеличение концентрации примесей в водороде при его транспортировании**

Заводской номер цистерны ЖВЦ-100М	Увеличение концентрации примесей за время хранения жидкости, об. %		Концентрация примесей в газе подготовки емкости к заливу, об. %		Увеличение концентрации примесей от газа наддува, об. %		Концентрация примесей при сливе жидкости, об. %	
	$\Delta C_{N_2} \cdot 10^{-7}$	$\Delta C_{O_2} \cdot 10^{-8}$	$C_{N_2} \cdot 10^{-5}$	$C_{O_2} \cdot 10^{-6}$	$\Delta C_{N_2} \cdot 10^{-7}$	$\Delta C_{O_2} \cdot 10^{-8}$	$C_{N_2} \cdot 10^{-6}$	$C_{O_2} \cdot 10^{-7}$
03-88	3,0	3,51	4,6	1,0	9,24	2,01	1,7	1,51
04-86	1,37	3,43	4,6	1,0	1,39	7,83	1,73	1,53
05-88	6,42	2,43	6,4	3,6	7,13	1,55	2,75	0,93
08-88	1,28	2,20	4,6	1,0	6,91	1,50	1,30	0,96
09-88	1,43	2,39	6,4	3,6	1,0	5,76	1,46	1,32
06-88	1,85	1,75	4,6	1,0	4,91	1,07	1,21	0,78

Таблица 2.

**Содержание примесей в жидком водороде в цистернах ЖВЦ–100М**

Заводской номер цистерны ЖВЦ-100М	Испаряемость % в сутки	Масса жид- кости при сливе, т	Концентрация примесей при заполнении емкости, об. %		Концентрация примесей при сливе, об. %			
					Расчет		Эксперимент	
			$C_{N_2} \cdot 10^{-7}$	$C_{O_2} \cdot 10^{-8}$	$C_{N_2} \cdot 10^{-6}$	$C_{O_2} \cdot 10^{-7}$	$C_{N_2} \cdot 10^{-6}$	$C_{O_2} \cdot 10^{-7}$
03-88	1,10	4,5	4,8	9,6	1,7	1,51	1,75	1,50
04-86	1,10	4,4	2,0	5,0	1,73	1,53	1,65	1,70
05-88	0,85	5,1	1,4	5,3	2,75	0,93	3,0	0,98
08-88	0,85	5,1	2,9	5,0	1,3	0,96	1,60	3,2
09-88	0,85	5,0	3,0	5,0	1,46	1,32	1,70	2,9
06-88	0,75	5,5	5,3	5,0	1,21	0,78	1,20	0,69

**Результаты эксперимента по определению теплофизических параметров при потере вакуума на цистерне ЖВЦ-100М**

№ п/п	Параметр	Величина
1	Первоначальная масса водорода в емкости, т	4,85
2	Начальное давление в емкости, МПа	0,178
3	Давление срабатывания предохранительного клапана, МПа	0,765
4	Время сброса давления предохранительного клапана с 0,765 до 0,70, сек	173
5	Время до первого срабатывания предохранительного клапана, мин	41
6	Время повышения давления в теплоизоляционной полости с $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. до атмосферного, ч	2,5
7	Время полного испарения водорода в емкости, ч	6
8	Минимальная температура оболочки емкости, К	75

**В главе 2** рассмотрены особенности создания систем хранения высокочистых криогенных компонентов при докритических и закритических параметрах, сформулированы требования к чистоте криогенных компонентов в процессе длительного хранения, представлены результаты аналитических исследований поэтапного изменения концентрации примесей в жидком водороде и кислороде при подаче в баки СХПР СЭП (Рисунок 3), проанализированы процессы в криогенных жидкостях при докритическом и закритическом давлениях в процессе хранения. Расчетная оценка изменения чистоты жидкого водорода и жидкого кислорода при длительном хранении компонентов в резервуарах-хранилищах показала: загрязнения примесями азота и кислорода жидкого водорода происходит преимущественно в процессе транспортировки в железнодорожной транспортной цистерне ЖВЦ-100М и при длительном хранении в стационарном хранилище до величины  $9 \cdot 10^{-5}$  % об. Как видно из графика (Рисунок 3, кривая 1) при месячном хранении жидкого водорода в стационарном резервуаре-хранилище с испаряемостью водорода 1,2 % в сутки концентрация примесей в компоненте увеличивается вдвое и превышает нормативную величину примесей в жидком водороде в баках СЭП –  $1 \cdot 10^{-4}$  % об.

Изменение состава жидкого кислорода ОЧ происходит за счет выпаривания компонента при выполнении операций по заправке баков СХПР СЭП. Обеспечение чистоты жидкого кислорода обеспечивается применением системы бездренажного хранения кислорода особой чистоты как при его транспортировке с завода-производителя компонента модели в цистерне 15-558С-04, так и в стационарном хранилище с использованием технического кислорода с более низкой температурой в качестве хладагента для обратной конденсации паров высокочистого кислорода (Рисунок 4).

Поддержание состава примесей в жидком водороде высокой чистоты в баках СХПР СЭП достигается совершенствованием технологии транспортировки и хранения, снижением испаряемости в транспортной цистерне ЖВЦ-100М до 0,85 % в сутки и стационарном хранилище до 0,3 % в сутки (Рисунок 5). В резуль-



тате этих мероприятий концентрация примесей в жидком водороде, заправляемом в баки СХПР СЭП, с учетом пятимесячного хранения в стационарном резервуаре-хранилище снижается до уровня  $4,45 \cdot 10^{-5} \% \text{ об.}$ , а при подаче на ЭХГ газообразного водорода уровень загрязнений не превысит величину  $4,4 \cdot 10^{-5} \% \text{ об.}$ , что обеспечивает необходимую нормативную величину качества водорода.

Впервые представлены описания конструктивных решений и результаты испытаний резервуаров-хранилищ для жидких компонентов – водорода и кислорода на закритическое рабочее давление 22,0 МПа для стендовой отработки ЖРД (Рисунок 6).

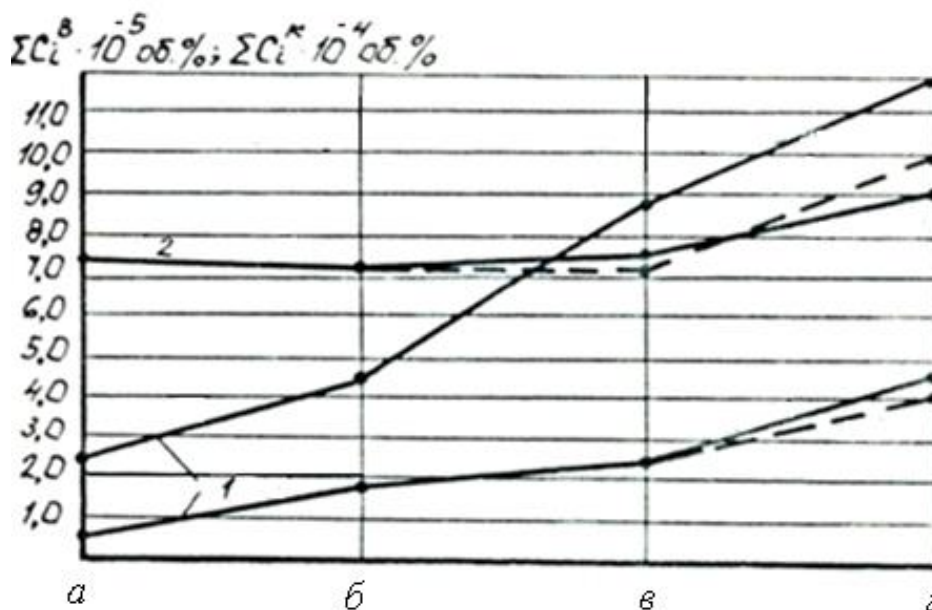
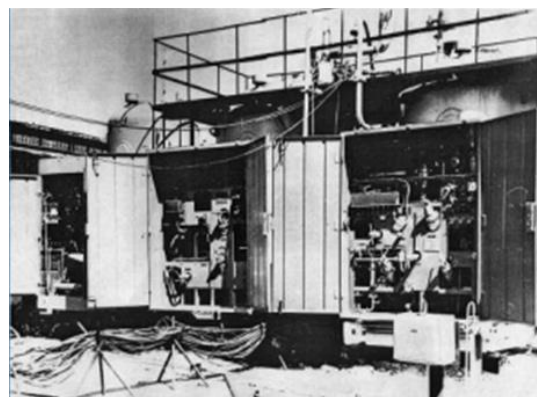
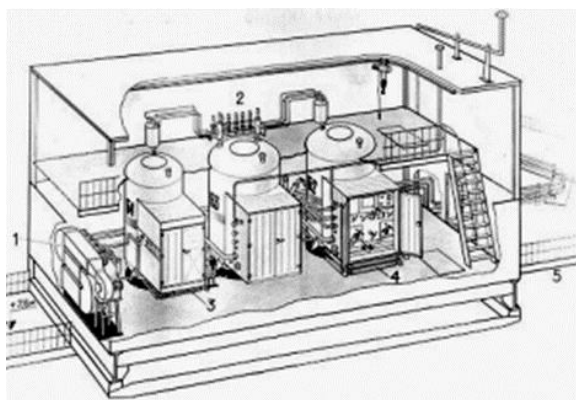


Рисунок 3. График постепенного изменения концентрации примесей в жидком водороде (1) и кислороде (2) при подаче в баки СЭП (сплошные линии) и непосредственно на ЭХГ (штриховые линии):

- а) компонент, заливаемый в цистерну;
- б) компонент, сливаемый из цистерны;
- в) компонент, подаваемый из хранилища;
- г) компонент, подаваемый в баки СЭП и на ЭХГ



а)

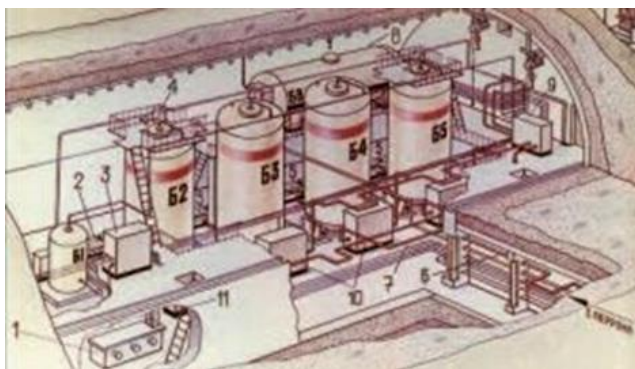
б)

Рисунок 4. Хранилища жидкого кислорода особой чистоты:

а) блок-схема, б) общий вид



а)

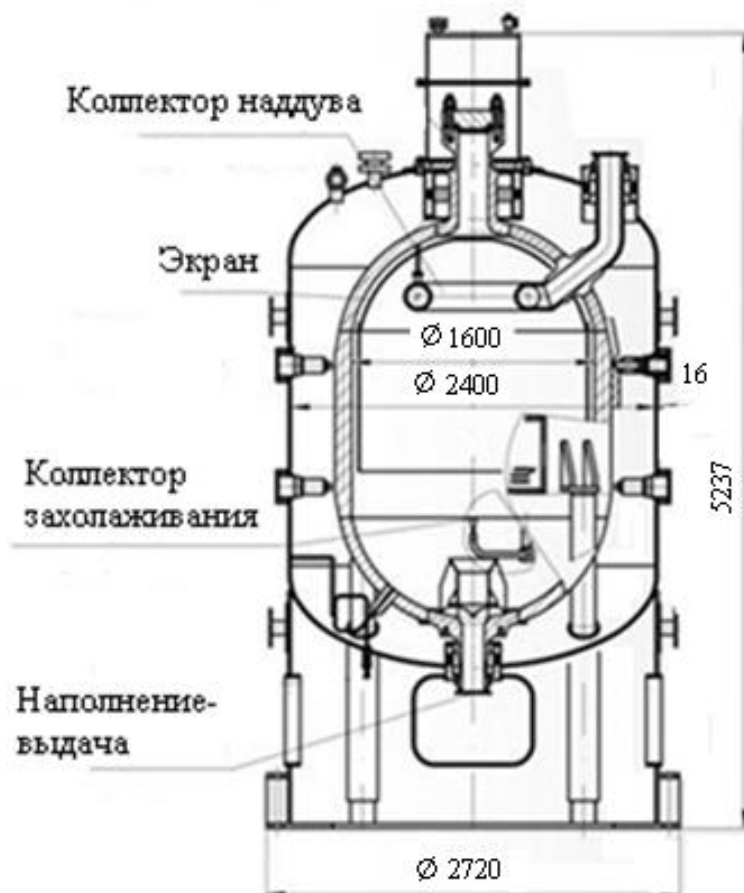


б)

Рисунок 5. Разработанные и смонтированные хранилища жидкого водорода:  
а) в Индии на космодроме Шарикотта; б) на космодроме Байконур



а)



б)

Рисунок 6. Емкости для хранения жидкого кислорода  
при закритическом давлении ( $P = 22,0$  МПа):  
а) общий вид емкости-хранилища;  
б) основные элементы и размеры

В главе 3 представлены результаты исследований по получению и поддержанию в емкости газификационной установки закритических параметров водорода при выдаче в течение длительного периода времени как с постоянным, так и переменным во времени расходом потребителю как с использованием в качестве теплоносителя стороннего источника водорода, так и части водорода из емкости-газификатора, идущего потребителю; исследования переходных процессов в ем-

кости-газификатора с водородом в зависимости от технических характеристик объекта потребления; исследования чистоты водорода при его газификации и хранения в газообразном состоянии при закритических параметрах. Приведены разработки и конструктивные решения газификационных установок водорода на закритические параметры применительно как к стартовому, так и техническому комплексам; приведена разработанная технология эвакуации водорода из баков СХПР СЭП орбитального корабля применительно к стартовому и посадочному комплексам.

Рассматриваются вопросы разработки экспериментальных стендов для исследования процессов газификации водорода при докритических и закритических параметрах. Представлен обзор оборудования для газификации криогенных жидкостей, в том числе при закритических параметрах, рассмотрены и проанализированы различные схемные решения подачи водорода в СХПР СЭП КО, проведены аналитические и экспериментальные исследования переходных процессов газификации водорода и выдачи (Рисунок 7).

Основа этой установки – криососуд 1 с находящимся в нем внутренним теплообменником, объемом 2 м<sup>3</sup> и заправляемой массой водорода до 120 кг и рабочим давлением до 2,5 МПа. Предусмотрены два возможных способа вывода системы на закритические параметры и управления ею, во-первых, для подачи газифицированного водорода потребителю, во-вторых, для поддержания его давления на требуемом уровне. Для реализации этих способов выполняются следующие действия:

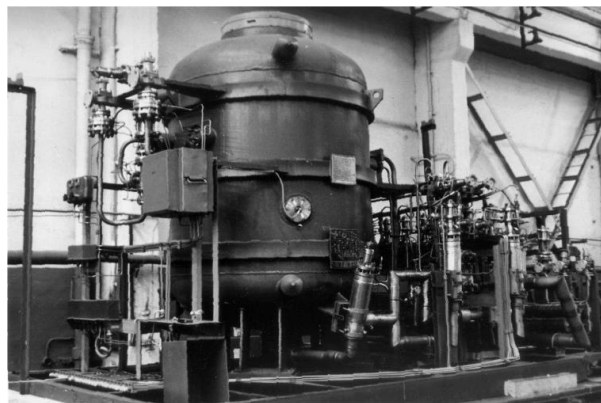
- объемный прогрев двухфазного водорода в криососуде посредством подачи во внутренний теплообменник 2 нагретого водорода из другой технологической системы;
- объемный прогрев двухфазного водорода газообразным водородом, взятым из криососуда, причем отбираемый водород нагревают во внешнем теплообменнике 3 и подают во внутренний теплообменник 2, где нагретый водород отдает тепло находящемуся там водороду, затем отводится в дренажную линию.

Из сравнения этих двух способов можно заключить, что более рациональным является первый из них. При его использовании исключаются, как при реализации второго способа, затраты водорода, заправленного в криососуд на разогрев основной части водорода.

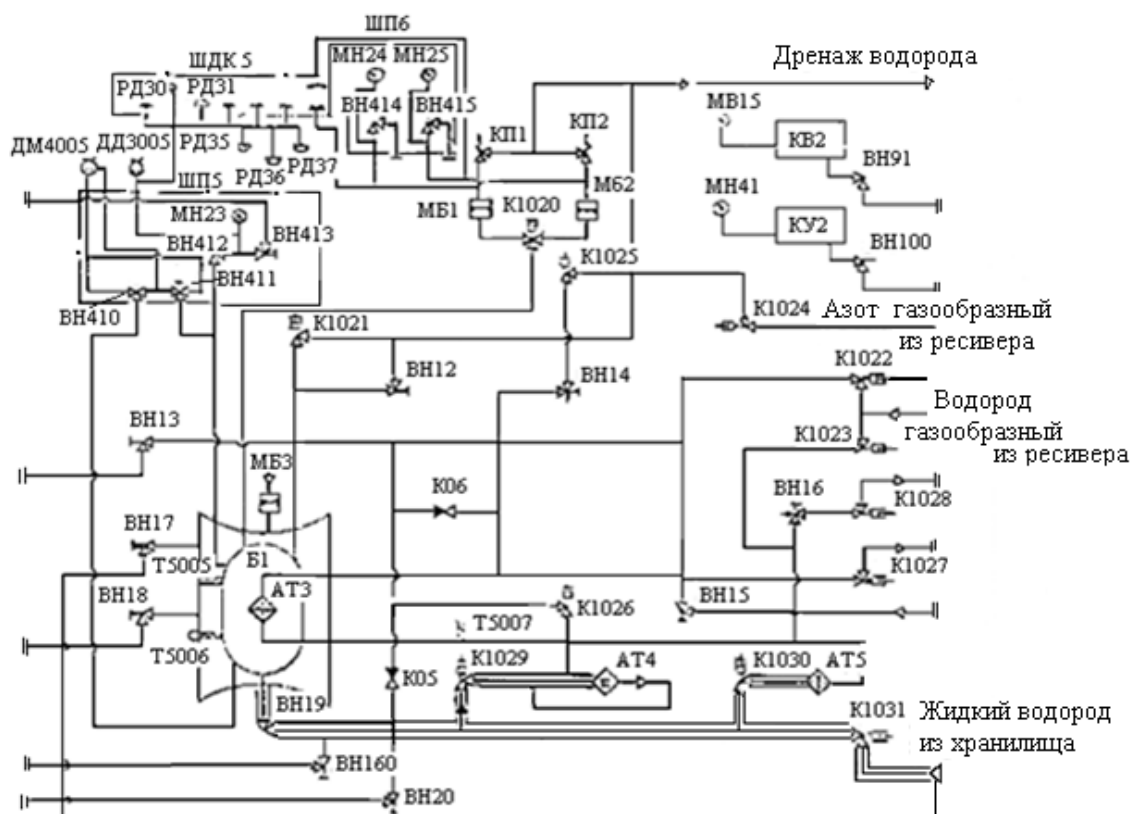
При отработке электрохимического генератора системы энергопитания космического объекта на технической позиции ракетно-космического комплекса в лаборатории СЭП или технической позиции ОК подачу водорода на ЭХГ СЭП эффективнее осуществлять из газгольдеров (Рисунок 8) или ресиверов, когда время технологической операции по проверке работоспособности энергомодуля не так ограничено и может исчисляться до 140 часов и более.

На стартовом комплексе запуск ЭХГ СЭП КО осуществляется за несколько часов до пуска РКС от наземного оборудования непосредственно подачей водорода из емкости-газификатора при давлении на входе в энергомодуль 1,2...2,0 МПа. Проведены аналитические и экспериментальные исследования переходных процессов газификации водорода и выдачи из емкости при закритических параметрах для схемы (Рисунок 8, в).





*a*



*б*

Рисунок 7. Экспериментальная установка для отработки режимов газификации водорода на критические параметры:

- a*) общий вид установки;
- б*) принципиальная пневмогидравлическая схема установки

Для описания параметров, остающегося в криососуде водорода, используем уравнение первого начала термодинамики для открытой системы в виде

$$dU = dQ - pdV + \sum_{k=1}^n i_k dG_k \quad (1)$$

где  $U$  – внутренняя энергия;  $V, p$  – объем, занимаемый водородом и его давление;  $dQ$  – элементарное количество тепла, поступающего в систему;  $dG_k$  – элементарное количество  $k$ -го потока массы;  $n$  – кол-во потоков массы;  $i_k$  – удельная энтальпия  $k$ -го заторможенного потока массы.

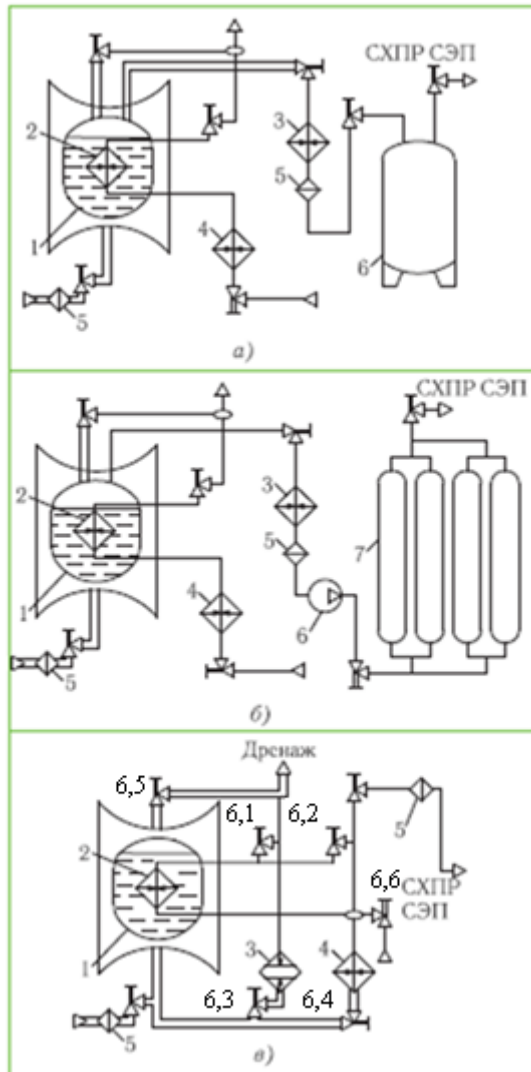


Рисунок 8. Принципиальные схемы подачи водорода в СХПР СЭП КО:

а) в режиме подачи водорода в СХПР СЭП из газгольдера;

б) в режиме подачи водорода в СХПР СЭП из баллонов;

в) в режиме непосредственной подачи водорода в СХПР СЭП:

1 – емкость водорода; 2 – внутренний теплообменник;

3 – испаритель; 4 – внешний теплообменник; 5 – фильтр тонкой очистки; 6.1–6.6 – пневмоуправляемая запорная арматура

Используя в качестве второго уравнения уравнение состояния реального газа, получены следующие соотношения:

$$\frac{\partial p}{\partial v} = \frac{\frac{dQ_{BH}}{d\tau} - \mu p v \frac{dG_k}{d\tau}}{\left(v^2 / \eta\right) \frac{dG_k}{d\tau}}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial v} = \frac{\frac{dQ_{BH}}{d\tau} - \eta c_v T \frac{dG_k}{d\tau}}{c_v v \frac{dG_k}{d\tau}}. \quad (3)$$

Из уравнения (2) определено, что для поддержания постоянного давления в криососуде, т. е. при  $\Delta P = 0$ , необходимая величина теплоподвода к системе в процессе ее работы составит

$$\frac{dQ_{BH}}{d\tau} = \mu p v \frac{dG_k}{d\tau}. \quad (4)$$

$$\left( \frac{dQ_{BH}}{d\tau} / \frac{dG_k}{d\tau} \right) = \mu p v = c_p \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_p v. \quad (5)$$

где  $v(G_0 - G_k \tau)$  – функция изменения удельного объема водорода в криостате во времени. С учетом этого, количество тепла, затрачиваемое на вытеснение массы продукта при постоянном рабочем давлении, можно рассчитывать из выражения (5). Решение указанной системы уравнений осуществлялось численным интегрированием дифференциальных уравнений.

На основе этого численно определена важная зависимость  $\left( \frac{dQ_{BH}}{d\tau} / \frac{dG_k}{d\tau} \right) = f(v)$  для различных давлений из заданного диапазона их возможных значений (Рисунок 9).

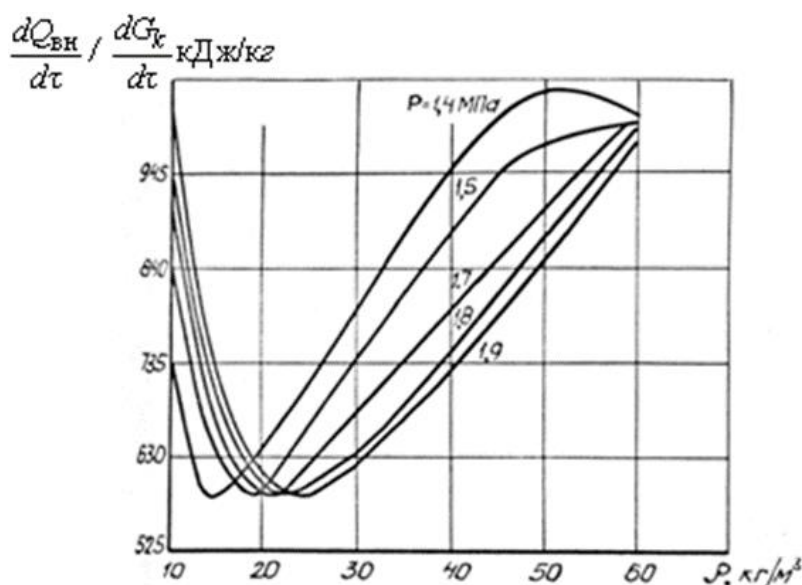


Рисунок 9. Зависимость величины теплоподвода на единицу массы водорода от изменения плотности при сверхкритических параметрах для различных давлений выдачи водорода, МПа:  
1 – 1,9; 2 – 1,8; 3 – 1,7; 4 – 1,5; 5 – 1,4

В главе также представлены результаты исследований переходных процессов в емкости газификатора с водородом в зависимости от технических характеристик объекта потребления (Рисунок 10, 11).

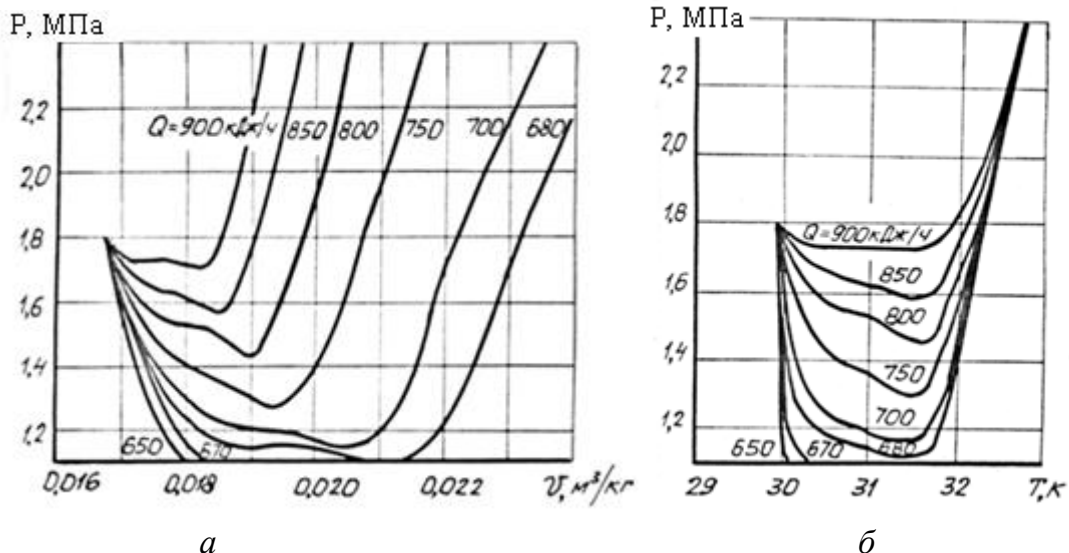


Рисунок 10. Зависимость изменения давления водорода в емкости в закритической области параметров от удельного объема (а) и изменения температуры при этих давлениях (б) при различных величинах теплопритока к компоненту ( $G = 2,16 \text{ кг/ч}$ )

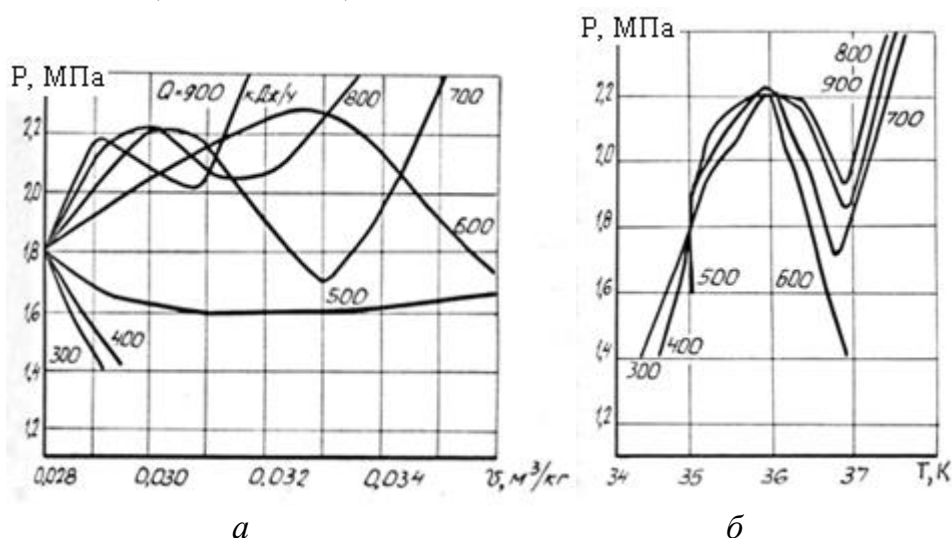


Рисунок 11. Зависимость изменения давления водорода в емкости в закритической области параметров от начального удельного объема (а) и изменения температуры при этих давлениях (б) при различных теплопритоках к компоненту ( $G = 1,08 \text{ кг/ч}$ )

Из анализа графиков следует, что при выдаче водорода из емкости с расходом  $2,16 \text{ кг/ч}$  (Рисунок 10) при коэффициенте заполнения емкости  $0,85$  (начальный удельный объем  $v = 0,0168 \text{ м}^3/\text{кг}$ ) может быть найдена рациональная величина теплоподвода  $dQ/dt = 900 \text{ кДж/ч}$ , при которой давление в емкости будет оставаться в заданном рабочем диапазоне ( $1,4 \leq P < 2,0 \text{ МПа}$ ). Температура водорода в емкости при этом изменится всего на один градус. С уменьшением коэффициента заполнения емкости до  $0,5$  (начальный удельный объем  $v = 0,028 \text{ м}^3/\text{кг}$ ) уменьшается рациональная величина теплоподвода  $= 500 \text{ кДж/ч}$  для поддержания давления в емкости (Рисунок 11), увеличивается временной интервал выдачи водорода с постоянным расходом.

С уменьшением расхода водорода (Рисунок 12) уменьшается рациональная величина теплоподвода. Так, если при начальном удельном объеме  $0,0168 \text{ м}^3/\text{кг}$  при расходе водорода  $2,16 \text{ кг/ч}$  рациональная величина теплоподвода к компоненту составляла  $900 \text{ кДж/ч}$ , то при уменьшении расхода водорода вдвое, величина теплоподвода составит  $435 \text{ кДж/ч}$  (Рисунок 12, а). При начальной величине удельного объема  $0,028 \text{ м}^3/\text{кг}$  рациональная величина теплоподвода к компоненту составит  $255 \text{ кДж/ч}$  при расходе водорода  $1,08 \text{ кг/ч}$ .

При малых расходах водорода из емкости возникает необходимость оценки роста давления водорода в рабочем диапазоне при минимальных теплопритоках в зависимости от величины удельного объема. При высоких начальных коэффициентах заполнения емкости ( $K > 0,8$ ) или соответственно малых начальных значениях удельного объема ( $v < 0,020 \text{ м}^3/\text{кг}$ ) при малых расходах водорода темп роста давления в рабочем диапазоне ( $1,6 \leq P < 2,3 \text{ МПа}$ ) составит  $0,175 \text{ МПа/ч}$  при теплоподводе  $150 \text{ кДж/ч}$ , что может привести в конечном итоге к срабатыванию предохранительных устройств и, следовательно, потере компонента. Исследование режимов срабатывания предохранительных устройств емкости в закритической области параметров также представлено в тексте главы.

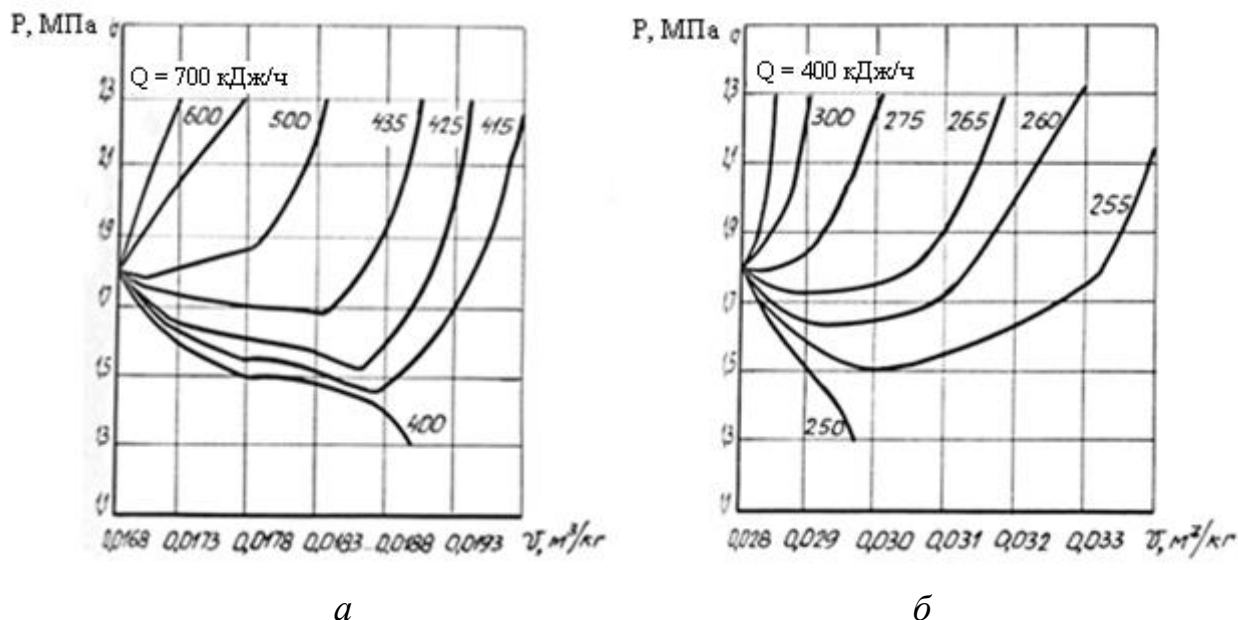


Рисунок 12. Зависимость изменения давления водорода в емкости в закритической области параметров от начального удельного объема при различных теплопритоках к компоненту ( $G=1,08 \text{ кг/ч}$ ;  $P=1,8 \text{ МПа}$ ):  
а – при  $v = 0,0168 \text{ м}^3/\text{кг}$ ; б – при  $v = 0,0280 \text{ м}^3/\text{кг}$

Экспериментальные кривые изменения давления и температуры водорода в емкости при достижении закритических параметров водорода и использовании в качестве теплоносителя как стороннего источника, так и части водорода из емкости в зависимости от начального коэффициента заполнения представлены на Рисунке 13 и 14. Анализ результатов испытаний показал, что при использовании в качестве теплоносителя стороннего источника водорода время достижения рабочего давления ( $P = 1,8 \text{ МПа}$ ) на порядок меньше, чем при использовании в качестве теплоносителя части водорода из емкости. С увеличением коэффициента заполнения емкости при использовании в качестве теплоносителя стороннего ис-

точника водорода, время достижения рабочего давления уменьшается с 7,5 мин при  $K_3 = 0,5$  до 4,5 мин при  $K_3 = 0,85$  (Рисунок 13).

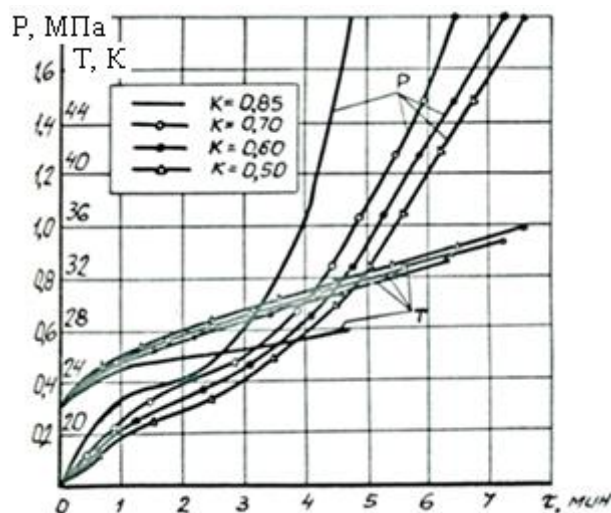


Рисунок 13. Экспериментальные кривые изменения давления и температуры водорода в емкости при достижении закритических параметров водорода при теплоподводе от стороннего источника теплоносителя

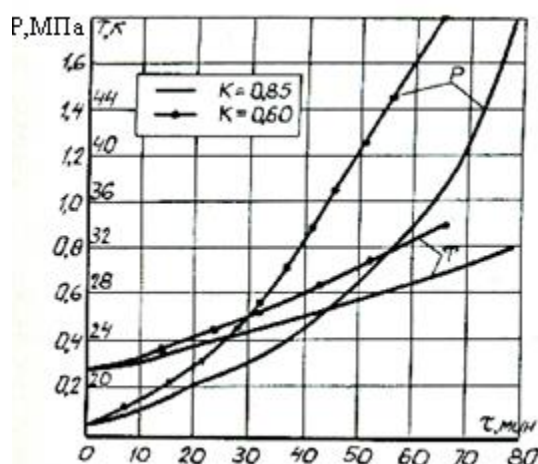


Рисунок 14. Экспериментальные кривые изменения давления и температуры водорода в емкости при достижении закритических параметров при использовании в качестве теплоносителя части водорода из емкости

Для отработки ЭХГ СЭП космического объекта в монтажно-испытательном корпусе на технической позиции решалась задача обеспечения подачи газообразных компонентов чистотой 99,999 и 99,98 % об. соответственно по водороду и кислороду при давлении перед энергомодулем 1,6–2,0 МПа в течение не менее 140 часов. Основная цель эксперимента – отработка принципиальной технологии получения газообразного водорода для потребителя чистотой не менее 99,9999 % об. (сумма примесей не более  $1 \cdot 10^{-4}$  % об.). В качестве эталонной примеси в емкость с жидким водородом экспериментальной установки вводилась определенная порция газообразного азота в составе гелево-азотной смеси. В ходе эксперимента проводились две серии замеров, в каждом из них – по пять измерений. Определение концентрации примесей осуществлялось по методике, разработан-

ной в соответствии с ОСТ 92-324-86 и ГОСТ 8467–82. Принципиальная схема заполнения водородом баллонной рампы (ресиверной) в результате отбора газа из «подушки» емкости-хранилища представлена на Рисунке 15. Емкость-хранилище жидкого водорода (технические характеристики представлены ниже) была заправлена жидким водородом при давлении в сосуде 0,1–0,15 МПа. По окончании заправки производился сброс паров водорода из емкости до установления давления в ней на уровне 0,03 МПа, и затем осуществлялось термостатирование в течение пяти часов.

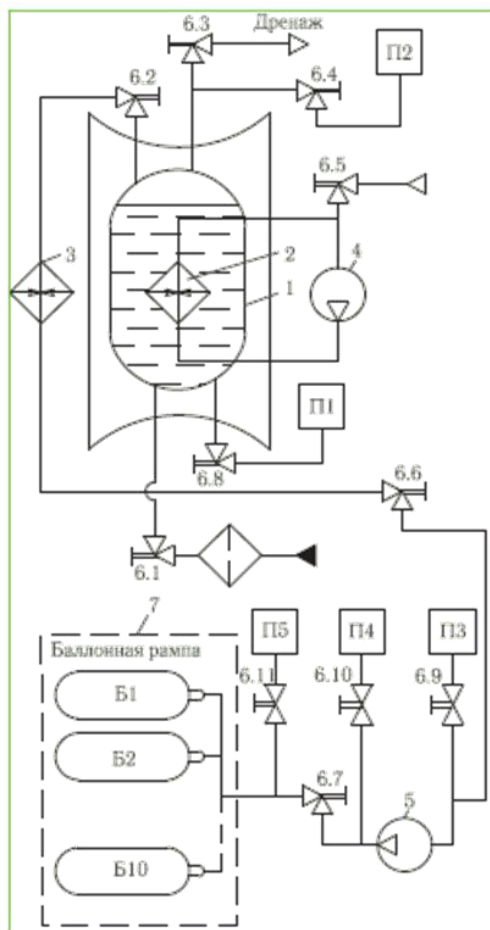


Рисунок 15. Схема заполнения водородом баллонной рампы при отборе газа из «подушки» емкости:

- 1 – емкость; 2, 3 – внутренний и внешний теплообменники;
- 4 – компрессор теплоносителя;
- 5 – блок компрессоров заполнения баллонов;
- 6 – запорная арматура; 7 – баллонная рампа;
- П1–П5 – пробоотборники

В дальнейшем производился подъем давления водорода в емкости до достижения величины 1,3 МПа, после чего осуществлялся сброс до величины 0,1 МПа. Результаты экспериментальных исследований представлены в Таблице 4 и Таблице 5.

Таблица 4.

**Содержание примесей в водороде в емкости при теплоподводе от  
внутреннего теплообменника с газовым теплоносителем  
при различных давлениях**

Объем водорода в емкости, м <sup>3</sup>	Давление в емкости, МПа	Содержание примесей в водороде в газовой «подушке» емкости, % об.	
		O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
6,6	0,1	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$
6,4	0,2	$5,5 \cdot 10^{-7}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$
6,2	0,3	$8,6 \cdot 10^{-7}$	$5,8 \cdot 10^{-5}$
5,8	0,4	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$7,4 \cdot 10^{-5}$
5,4	0,8	$2,0 \cdot 10^{-7}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$
5,0	1,3	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$
4,3	0,8	$< 4,0 \cdot 10^{-8}$	$< 3,0 \cdot 10^{-7}$
3,8	0,4	$< 4,0 \cdot 10^{-8}$	$< 3,0 \cdot 10^{-7}$
3,4	0,2	$< 4,0 \cdot 10^{-8}$	$< 3,0 \cdot 10^{-7}$
3,2	0,1	$< 4,0 \cdot 10^{-8}$	$< 3,0 \cdot 10^{-7}$

Таблица 5.

**Содержание примесей в водороде в емкости при отборе жидкости,  
газификации и компримировании**

Наименование этапа	Содержание примесей в жидком водороде в емкости, % об.		Содержание примесей на входе в баллоны, % об.		Содержание примесей в баллонах, % об.	
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
До заполнения баллонов водо- родом	$3,6 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$8,9 \cdot 10^{-7}$	$9,5 \cdot 10^{-5}$
По окончании заполнения баллонов водо- родом	$4,3 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-7}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$9,7 \cdot 10^{-5}$
При хранении водорода в баллонах в те- чение месяца	—	—	—	—	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$9,4 \cdot 10^{-5}$

Анализируя представленные в таблицах результаты экспериментов, можно заключить, что содержание примесей азота и кислорода в газообразном водороде, заправленном в баллоны, выше, чем непосредственно в жидком водороде в первоначальный момент времени. Увеличения содержания примесей в газообразном водороде, заправленном в баллоны, в процессе 30-суточного хранения практически не наблюдалось.

**Глава 4** посвящена вопросам разработки средств заправки высокочистым жидким водородом и кислородом особой чистоты баков СХПР СЭП ОК, а также систем подачи высокочистых газообразных реагентов на ЭХГ СЭП ОК при его отработке в монтажно-испытательном корпусе. Схема системы заправки баков СХПР СЭП ОК высокочистыми криогенными компонентами представлена на Рисунке 16.



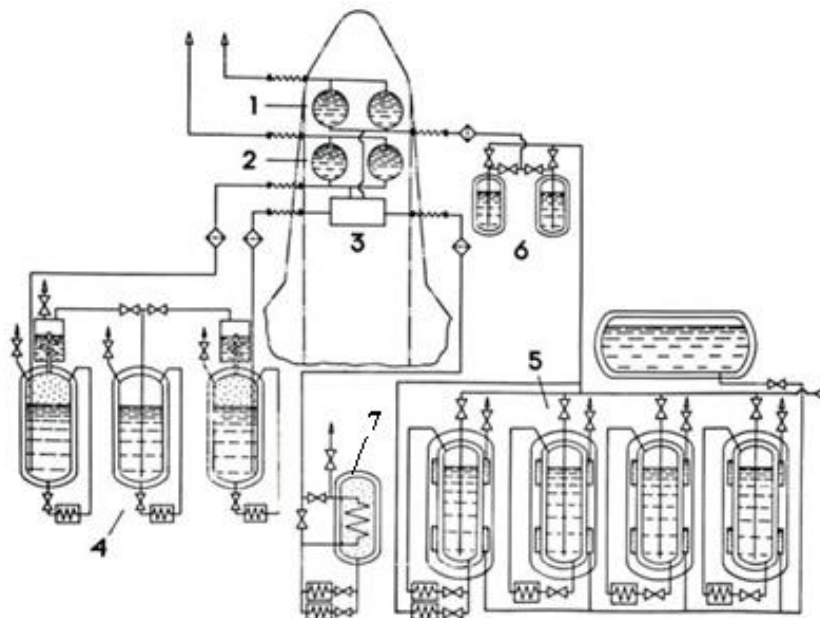


Рисунок 16. Принципиальная пневмогидравлическая схема заправки баков ЭХГ СЭП ОК высокочистым жидким водородом и особо чистым жидким кислородом:

- 1 – БХВ (баки хранения водорода);
- 2 – БХК (баки хранения кислорода);
- 3 – ЭХГ СЭП;
- 4 – хранилище жидкого кислорода;
- 5 – хранилище жидкого водорода;
- 6 – промежуточные емкости жидкого водорода;
- 7 – газификатор жидкого водорода

В главе 4 представлены следующие результаты: разработана, экспериментально отработана технология заправки высокочистым жидким водородом баков СХПР СЭП ОК при многовариантности их количества и заправляемой массы компонента; разработаны, экспериментально отработаны средства длительного хранения и заправки особо чистым жидким кислородом баков СХПР СЭП ОК; разработаны схемы, изготовлено оборудование, проведена экспериментальная отработка режимов подачи газообразного водорода высокой чистоты, кислорода особой чистоты на ЭХГ СЭП ОК.

Представлен обзор криогенных заправочных систем баков ЭХГ СЭП лунного орбитального корабля РКС «Н1-Л3» высокочистым водородом и особо чистым кислородом. Отражены этапы создания комплекса заправки высокочистыми криогенными компонентами баков СХПР СЭП орбитального корабля «Буран». Схема заправки баков СХПР СЭП приведена на Рисунке 17, а параметры заправки баков жидким водородом приведены в Таблице 6.

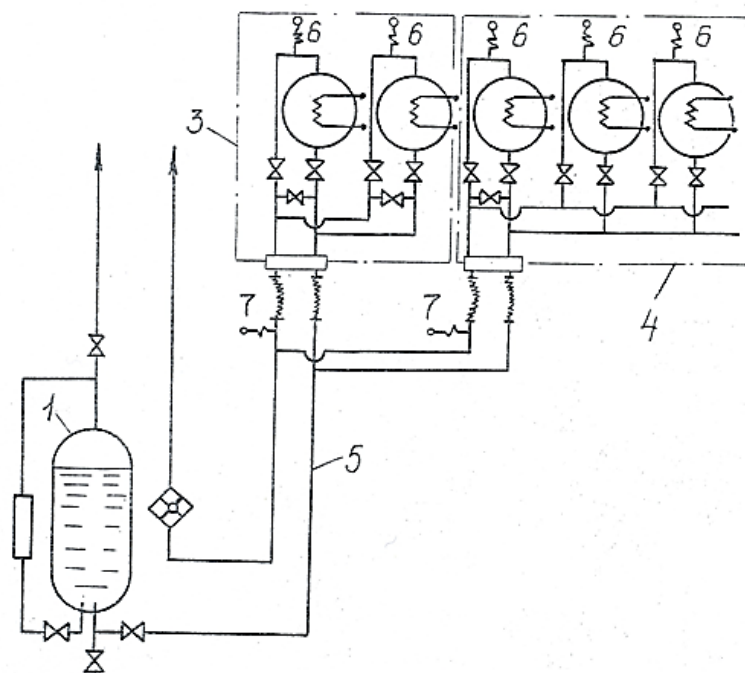


Рисунок 17. Принципиальная пневмогидравлическая схема заправки баков СХПР СЭП ОК жидким водородом:  
 1 – промежуточная емкость;  
 2 – испаритель наддува емкости;  
 3 – базовый блок БХВ; 4 – модульный блок БХВ;  
 5 – коммуникации системы заправки; 6, 7 – термодатчики

Таблица 6.

**Параметры водорода при заправке базовых и модульных баков СХПР СЭП ОК**

Но- мер бака	Параметры до перелива				Параметры с учетом перелива			
	Расход, кг/с	Темпера- тура, К	Масса водо- рода, кг	Время заправ- ки, мин	Расход, кг/с	Темпера- тура, К	Масса водо- рода, кг	Время заправки, мин
1	0,06	22,28	57,6	16	0,023	22,5	57,4	18
2	0,053	22,28	57,5	19	0,034	22,9	57,3	21
3	0,025	23,2	54,45	39	0,013	24,1	55,5	41
4	0,026	23,2	56,6	36	0,007	23,3	56,5	38
5	0,026	23,2	56,6	36	0,007	23,3	56,5	38
6	0,026	23,2	56,6	36	0,007	23,3	56,5	38
7	0,025	23,2	54,45	39	0,013	24,1	55,5	41
8	0,026	23,2	56,6	36	0,007	23,3	56,5	38

Созданные испытательные стенды для отработки режимов заправки водородом и длительного хранения жидким кислородом особой чистоты штатного бака СХПР СЭП орбитального корабля представлены на Рисунках 18 и 19.

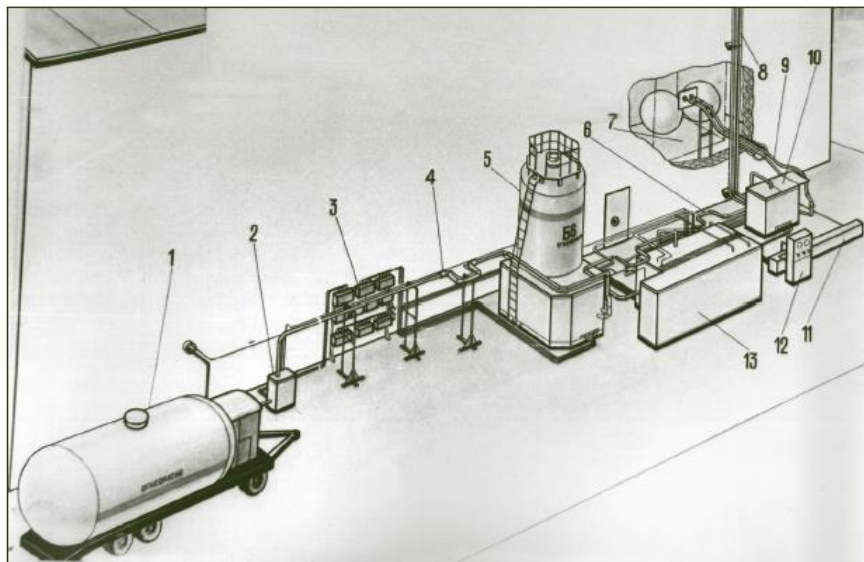


Рисунок 18. Испытательный стенд по отработке режимов заправки жидким водородом баков СЭП ОК:

1 – транспортная емкость жидкого водорода; 2 – стыковочная колонка; 3 – пневмоштыты раздачи и управления; 4 – заправочные трубопроводы жидкого водорода; 5 – промежуточная емкость жидкого водорода; 6 – трубопроводы подачи жидкого водорода в баки СЭП ОК; 7 – баки СЭП ОК; 8 – дренажный стояк газообразного водорода; 9 – гибкие рукава подачи водорода в баки СЭП; 10 – стыковочная колонка; 11 – теплообменник; 12 – блок контроля; 13 – арматурный блок

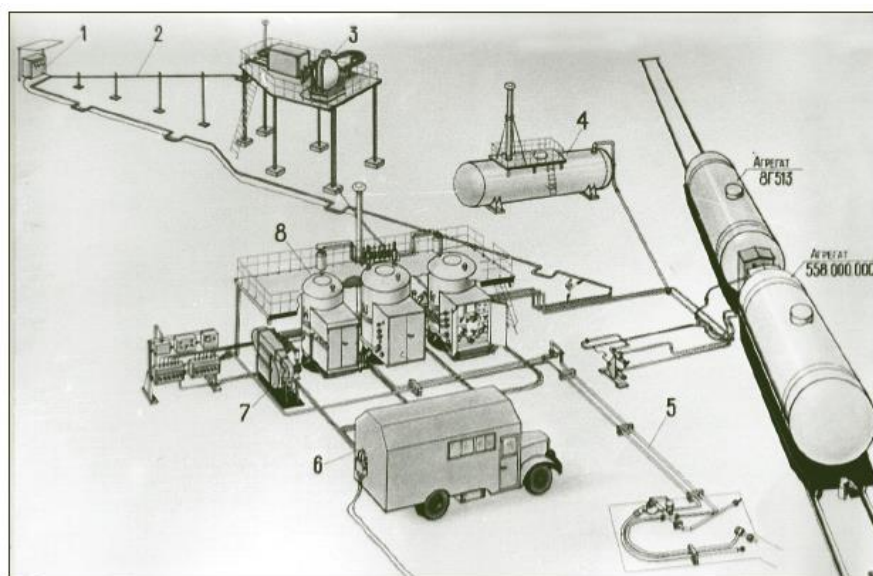


Рисунок 19. Испытательный стенд по отработке заправки жидким кислородом баков СЭП ОК:

1 – стыковочная колонка; 2 – трубопроводы жидкого кислорода; 3 – бак СЭП ОК; 4 – дренажная емкость; 5 – коммуникации газообразного кислорода; 6 – пульт управления заправкой; 7 – теплообменник-подогреватель; 8 – система конденсации

Система заправки баков СЭП ОК «Буран» высокочистым (ОЧ) жидким кислородом предназначалась для заправки двух баков СХПР СЭП ОК в количестве 460 кг каждый с чистотой 99,999 % об. и подачи газообразного кислорода на ЭХГ для его продувки и запуска в предстартовый период. Система заправки включает: три криогенные емкости с вакуумно-порошковой теплоизоляцией: объемом 7 м<sup>3</sup> и рабочим давлением 0,7 МПа и криогенная емкость-газификатор объемом 3 м<sup>3</sup>. В двух «продуктовых» емкостях хранился в бездренажном режиме кислород особой чистоты, а в третьей – технологической – жидкий кислород для обратной конденсации паров особо чистого продукта в конденсаторах, присоединенных к газосбросам основных емкостей, в которых продукт находился под небольшим избыточным давлением. Целью проведения экспериментальных исследований являлось:

- отработка режимов заправки емкостей хранилища из транспортных железнодорожных цистерн 15-558С, 8Г513;
- длительное хранение особо чистого кислорода в емкостях хранилища в бездренажном режиме;
- газификация жидкого кислорода при его подаче на ЭХГ СЭП;
- обеспечение требуемых параметров кислорода (температуры и давления) на входе в штатный бак СХПР СЭП.

Одновременно проходили испытания фильтры тонкой очистки (3 мкм) типа ФНС, установленные на магистралях жидкого кислорода, перед баком СЭП (Ф) и газообразного кислорода перед ЭХГ (Ф1) и (Ф3) на жидкостной магистрали при заполнении емкостей хранилища и газификатора. Результаты стендовых испытаний комплекса бездренажного хранения жидкого кислорода особой чистоты, заправки бака СЭП ОК, системы газификации и подачи газообразного кислорода на ЭХГ подтвердили реализацию всех технических характеристик, что в дальнейшем обеспечило успешное проведение автономных и комплексных испытаний штатной системы заправки высокочистым кислородом баков СЭП орбитального корабля на стартовом комплексе.

Общий вид системы заправки охлажденным жидким кислородом разгонного блока представлен на Рисунке 20.

Принципиальным отличием разработанной системы от предшествующей является наличие агрегата-заправщика, емкость которого выполнена с тремя полостями – полостью сосуда, полостью рубашки хладагента (жидкого азота) и полостью теплоизоляции, и оборудована технологическими коммуникациями, полость теплоизоляции размещена между рубашкой и оболочкой, а газовые полости сосуда и рубашки соединены между собой. Система снабжена регулирующим клапаном давления.

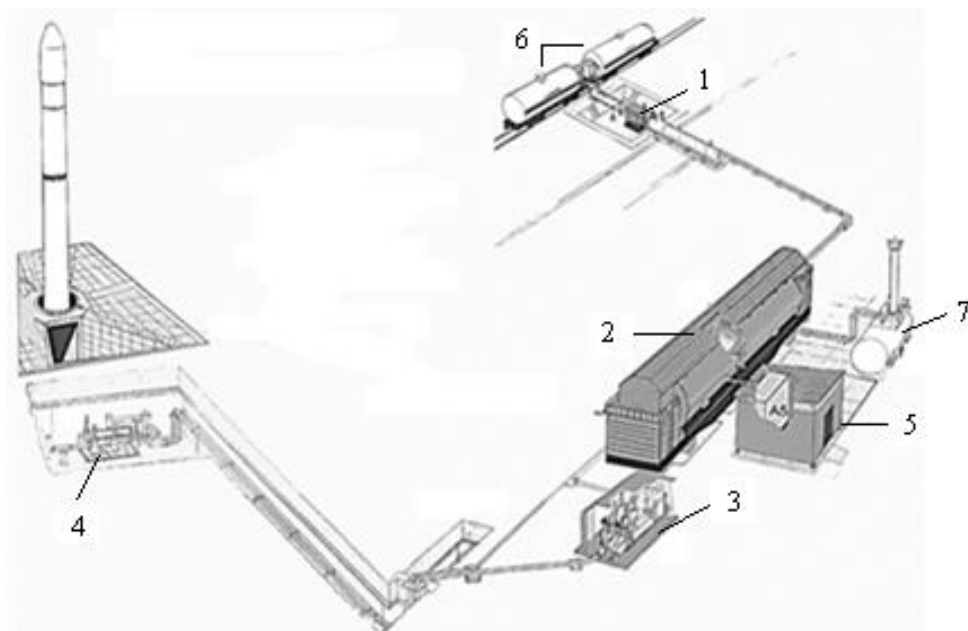


Рисунок 20. Общий вид системы заправки охлажденным жидким кислородом разгонного блока РКС «Зенит-3SLB»:

1 – колонка слива кислорода, азота; 2 – агрегат-заправщик;  
 3 – арматурный блок; 4 – заправочный блок клапанов;  
 5 – блок откачки паров азота; 6 – транспортные агрегаты жидких кислорода и азота; 7 – емкость дренажная

В **Главе 5** сформулированы основные перспективы использования полученных результатов и практические рекомендации по их применению. Рассмотрены вопросы использования СПГ в ракетно-космической технике и перспективы создания криогенного комплекса заправки высокочистыми компонентами водородом и кислородом глубоководных морских объектов. Приводятся разработанные схемные решения комплексов доставки, хранения и заправки криогенных баков подводного аппарата высокочистыми жидкими водородом и кислородом, а также схемные решения транспортных и стационарных хранилищ. На Рисунке 21 представлен вариант комплекса доставки, хранения, газификации и заправки СПГ включающий в себя:

- хранилище СПГ вертикального типа с вакуумной порошковой изоляцией (перлит) с нижним сливом продукта объемом 50 м<sup>3</sup> 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.



Рисунок 21. Криогенный комплекс доставки компонента, хранения, газификации и заправки СПГ:

1 – контейнер-цистерна модели КМЦ-35/06; 2 – хранилище СПГ;  
3 – испаритель-теплообменник; 4 – испаритель для создания избыточного давления в емкости контейнера; 5 – блок запорно-предохранительной арматуры и контрольно-измерительных приборов

### Основные результаты и выводы

1. Исследованы переходные процессы при хранении, газификации и выдаче из емкости водорода при закритических параметрах криогенного компонента как в процессе достижения в емкости закритических параметров водорода с использованием в качестве теплоносителя стороннего источника водорода, так и части водорода из емкости газификатора; выдачу водорода высокой чистоты из емкости газификатора при закритических параметрах в течение длительного периода времени как с постоянным, так и переменным во времени расходом (а. с. РФ № 189028).

2. Исследованы процессы увеличения концентрации примесей (азота и кислорода) в жидком водороде при его транспортировании в железнодорожных вагонах-цистернах в зависимости от концентрации примесей в остаточном газе подготовки, суточной испаряемости водорода в емкости, концентрации примесей в газе наддува. На основе исследований разработан способ транспортировки жидкого водорода высокой чистоты в железнодорожных вагонах-цистернах при его доставке с завода-наполнителя на ракетно-космический комплекс (патент РФ № 2064626).

3. Для длительного (пятимесячного) хранения на ракетно-космическом комплексе жидкого кислорода особой чистоты в целях сохранения качества и потерь компонента разработан способ и устройство бездренажного хранения особо чистого кислорода (а. с. РФ № 198160), а для длительного хранения жидкого водорода высокой чистоты – хранилище компонента с минимальными суточными потерями и минимальным увеличением концентрации примесей (азота и кислорода) в жидком водороде (а. с. № 217955).

4. Для криогенных транспортных средств – железнодорожных вагонов-цистern – достигнуто снижение потерь компонентов:

– жидкого водорода в цистернах моделей ЖВЦ-100М, ЖВЦ-100М2 до уровня 0,8 % в сутки;



– жидкого кислорода в цистернах модели 15-558С-04 до уровня 0,17 % в сутки.

5. Для криогенных транспортных средств – вагонов-цистерн и контейнеров-цистерн разработаны основные положения конструктивного исполнения:

- теплоизоляции емкости (патент РФ № 2065546, а. с. РФ № 256974);
- силовых элементов крепления «сосуд – обложка – рама» (патент РФ № 2259312);
- системы безопасно-дренажных устройств для транспортировки жидкого водорода и СПГ (патент РФ № 2002990);
- трубопроводы высокой чистоты (патент РФ № 2035001);
- арматура (запорно-предохранительное устройство, скоростной клапан, предохранительный клапан).

6. Проведен анализ рабочих режимов газификатора водорода при закритических параметрах, в результате которого определена оптимальная величина теплоподвода к водороду в закритической области, необходимой для поддержания давления в емкости в заданных пределах при выдаче потребителю, как с постоянным, так и переменным во времени расходом (а. с. РФ № 301601).

7. На основе исследования режима «слива» водорода, находящегося в емкости при закритических параметрах, разработан способ эвакуации водорода из баков космического объекта в случае несостоявшегося пуска или послепускового обслуживания (патент РФ № 236373).

8. Разработаны, изготовлены и испытаны средства хранения и выдачи из резервуара-хранилища жидкого водорода и кислорода при закритическом рабочем давлении ( $P_p = 22,0$  МПа).

9. Проведенный анализ влияния методов испарения жидкого водорода на чистоту образующихся в емкости газификатора паров водорода при различной начальной концентрации примесей азота и кислорода в жидком водороде позволил разработать способ заправки баков или газгольдеров высокочистым водородом при закритическом давлении (а. с. РФ № 314490).

10. Разработан метод и средства заправки баков СХПР СЭП ОК жидким водородом высокой чистоты при многовариантности их количества (до восьми единиц) и заправляемой массы компонента (50, 75, 100 %) с чистотой водорода 99,9999 % об. и подачей водорода на ЭХГ СЭП с расходом от 0 до 2,16 кг/ч с чистотой 99,999 % об. при давлении 1,4...1,8 МПа на стартовом и техническом комплексах (а. с. РФ № 217955).

### **Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:**

1. Черемных О. Я. Создание, совершенствование конструкции, перспектива развития транспортных средств для жидкого водорода // Инженерный журнал : Наука и инновации. 2017. Вып. 3. С. 1–19 (0,92 п. л.).
2. Черемных О. Я. Перспектива развития транспортных средств для жидкого кислорода, азота, аргона // Инженерный журнал : Наука и инновации. 2017. Вып. 10. С. 1–16 (0,60 п. л.).
3. Черемных О. Я. Создание, совершенствование конструкций, перспективы развития транспортных средств для сжиженного природного газа // Инженерный журнал : Наука и инновации. 2018. Вып. 1. С. 1–17 (0,90 п. л.).

4. Черемных О. Я. От программы «Энергия–Буран» до «Боинга» // РЖД-Партнер. 2004. № 5. С. 80–81 (0,12 п. л.).
5. Черемных О. Я. Разработка способа и средств транспортировки жидкого водорода высокой чистоты // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2018. № 11. С. 31–32 (0,21 п. л.).
6. Черемных О. Я. Создание оборудования и исследование потерь при хранении жидкого водорода в транспортных и стационарных хранилищах с различными типами теплоизоляции : Сб. науч. тр. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2018. С. 11–22 (0,38 п. л.).
7. Черемных О. Я. Анализ процессов, разработка способа и средств эвакуации водорода при закритических параметрах из баков энергопитания орбитального корабля : Сб. науч. тр. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2018. С. 36–44 (0,37 п. л.).
8. Cheremnykh O. Ya. The increase of efficiency and safety of liquid hydrogen transportation. Proc. 10Jnt. Conf. Cryogenics 2008. Prague. 2008. P. 359–365 (0,21 п. л.)
9. Cheremnykh O. Ya. Creating of storage for liquid hydrogen of high purity. Proc. 13 Jnt. Conf. Cryogenics 2014. – Prague. 2014. P. 122–125 (0,21 п. л.).
10. Cheremnykh O. Ya. The development of methods and means for Long-Term Storage of Liquid Hydrogen of High Purity Proc. 12 Jnt. Conf. Cryogenics 2012. – Dresden. 2012. P. 287–288 (0,1 п. л.).
11. Cheremnykh, O. Ya., Korneva I. I. The creation of vapor-cooling devices for liquid oxygen in stationary reservoirs using liquid nitrogen as a cooling reagent . Proc. 10 Jnt. Conf. Cryogenics 2008. – Prague. 2008. P. 367–372 (0,21 п. л./0,18 п. л.).
12. Cheremnykh O. Ya. The development of methods and means of evacuation of hydrogen from tanks of a space flying apparatus under supercritical parameters. Proc. 12Jnt. Conf. Cryogenics 2012. – Dresden. 2012. P. 424–425 (0,12 п. л.).
13. Cheremnykh, O. Ya., Zashlyapin R. A. The creation vehicles for multimodal transportation of liquefied gases. Proc. 10 Jnt. Conf. Cryogenics 2008. – Prague. 2008. P. 351–355 (0,31 п. л./0,25 п. л.).
14. Cheremnykh O. Ya. The development of methods and means of gasification of liquid hydrogen under supercritical parameters. Proc. 12 Jnt. Conf. Cryogenics 2012. – Dresden. 2012. P. 421–422 (0,12 п. л.).
15. Черемных О. Я. Исследование процессов, разработка методов и средств газификации, хранения водорода высокой чистоты, используемого в качестве топлива в электрохимических генераторах // Технические газы. 2012. № 2. С. 31–40 (0,98 п. л.).
16. Черемных, О. Я., Лавренченко Г. К. Термодинамические процессы обеспечения водородом системы энергопитания орбитального корабля // Технические газы. 2014. № 5. С. 40–45 (0,53 п. л./0,48 п. л.).
17. Черемных О. Я., Лавренченко Г. К. Методы и средства заправки, хранения и выдачи из емкостей жидких криопродуктов при закритических параметрах // Технические газы. 2016. № 1. С. 31–35 (0,38 п. л./0,32 п. л.).
18. Черемных О. Я., Рочевский Б. С. Целесообразность экспорта СПГ с малотоннажных заводов СПГ // Газовая промышленность. 2017. № 6 (753). С. 82–84 (0,29 п. л./0,25 п. л.).



19. Черемных О. Я. Анализ процессов эвакуации водорода при закритических параметрах из баков системы энергопитания орбитального корабля // Технические газы. 2012. № 16. С. 54–58 (0,40 п. л.).
20. Черемных О. Я. Новое поколение криогенных железнодорожных цистерн для перевозки жидких продуктов разделения воздуха // Технические газы. 2013. № 5. С. 66–72 (0,44 п. л.).
21. Черемных О. Я. Совершенствование оборудования для хранения и транспортирования жидкого водорода // Технические газы. 2010. № 4. С. 44–52 (0,91 п. л.).
22. Черемных О. Я. Особенности мультимодальных перевозок на экспорт СУГ и СПГ в контейнерах-цистернах // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. 2012. № 1 (61). С. 25–30 (0,42 п. л.).
23. Черемных О. Я. Опыт эксплуатации и совершенствование конструкции железнодорожных цистерн для транспортировки жидкого водорода // Водород-2014 : Тез. докл. 2-й Междунар. конф. М. : CREON. 2014. С. 20 (0,1 п. л.).
24. Черемных О. Я. Создание транспортного оборудования для мультимодальных перевозок сжиженного природного газа // СПГ-2014 : Тез. докл. 3-й Междунар. конф. М. : CREON. 2014. С. 2 (0,1 п. л.).
25. Черемных О. Я. Новое поколение контейнерного транспортного оборудования для СПГ и СУГ // Газовая промышленность России. Актуальные аспекты : Тез. докл. Междунар. конф. М. 2014. С. 79–80 (0,15 п. л.).
26. Черемных О. Я. Создание контейнеров-цистерн для транспортировки криогенных жидкостей // Подвижной состав XXI века: инновации в грузовом вагостроении : Тез. докл. Междунар. конф. Петербургский гос. ун-т путей сообщения императора Александра 1. СПб. 2014. С. 74–75 (0,14 п. л.).
27. Черемных О. Я. Создание оборудования для крупномасштабной транспортировки криогенных газов // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты : Тез. докл. XI Междунар. конф. Петербургский гос. ун-т путей сообщения императора Александра 1. СПб. 2016. С. 145 (0,1 п. л.).
28. Черемных О. Я. Создание оборудования на закритические параметры криогенной жидкости // Криогенные технологии и оборудование. Перспективы развития : Тез. докл. Междунар. конф. М. МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЦВК «Экспоцентр», 2015. С. 9–11 (0,2 п. л.).
29. Черемных О. Я. Создание транспортных средств для мультимодальных перевозок СПГ, СЭП, продуктов нефтехимии // Полимеризационные пластмассы. Сырьевая база, производство и переработка : Тез. докл. Междунар. конф. СПб. 2013. С. 172–175 (0,21 п. л.).
30. Способ транспортировки жидкого водорода : пат. 2064626 РФ, F17C3/00 / Черемных О. Я. [и др.]. Заявл. 16.04.1986 ; опубл. 27.07.1996. Бюл. № 21. 6 с.
31. Емкость для криогенной жидкости : пат. 2338118 РФ, F1763/08 / Черемных О. Я. [и др.]. Заявл. 05.02.2007 ; опубл. 10.11.2008. Бюл. № 31. 7 с.
32. Теплоизоляция криогенных устройств : пат. 2065546 РФ, F17C03/04 / Черемных О. Я. [и др.]. Заявл. 12.03.1986 ; опубл. 20.08.1996. Бюл. № 23. 7 с.
33. Контейнер-цистерна : пат. 2259312 РФ, B65D88/12 / Черемных О. Я. [и др.]. Заявл. 05.01.2004 ; опубл. 27.08.2005. Бюл. № 24. 7 с.

34. Секция заправочного трубопровода для криогенных продуктов особой чистоты : пат. 2035001 РФ, А16L 39/04 / Черемных О. Я. [и др.]. Заявл. 07.04.1983 ; опубл. 10.05.1985. Бюл. № 13. 5 с.
35. Железнодорожная цистерна : пат. 2265535 РФ, В 61Д5/06, В 61F1/00 / Черемных О. Я. [и др.]. Заявл. 19.06.2003 ; опубл. 10.12.2005. Бюл. № 34. 5 с.
36. Способ хранения сжиженного природного газа в транспортной емкости : пат. 2002990 РФ, F17C3/00, A17C7/00 / Черемных О. Я. [и др.]. Заявл. 11.04.1991 ; опубл. 15.11.1993. Бюл. № 41–42. 7 с.
37. Криогенная заправочная система космического объекта : пат. 2386890, РФ, F17C5/04 / Черемных О. Я. [и др.]. Заявл. 07.07.2008; опубл. 20.04.2010. Бюл. № 11. 6 с.
38. Криогенная цистерна : пат. 2059147 РФ, МКТ 6F17C3/00 / Черемных О. Я. [и др.]. Заявл. 17.04.1990 ; опубл. 27.04.1996. Бюл. № 12. 7 с.
39. Цистерна для транспортировки жидкостей : а. с. 1551602, В65Д5/00 / Черемных О. Я. [и др.]. Заявл. 19.05.1988 ; опубл. 23.03.90. Бюл. № 11. 6 с.
40. Способ наполнения баллонов высокого давления газообразным водородом : а. с. 314490, MKUF17C3/00 / Черемных О. Я. [и др.]. – Заяв. 28.02.89 ; зарегистрир. 01.06.90.
41. Система заправки баков СЭП космического объекта жидким водородом : а. с. 217955 / Черемных О. Я. [и др.]. Заяв. 05.06.84 ; зарегистрир. 29.03.85.
42. Способ газификации жидкого водорода : а. с. 189028, MKUF17C/00 / Черемных О. Я. [и др.]. Заяв. 21.04.82 ; зарегистрир. 02.06.83.
43. Способ эвакуации жидкого водорода из баков ЭХГ космического объекта : а. с. 236373, MKU В64С5/00 / Черемных О. Я. [и др.]. Заяв. 04.01.85 ; зарегистрир. 05.05.86.
44. Дренажное устройство электрохимического генератора : а. с. 198862, MKU НО1М8/02 / Черемных О. Я. [и др.]. Заяв. 04.05.83 ; зарегистрир. 07.02.84.
45. Резервуар для жидкого водорода : а. с. 202216 / Черемных О. Я. [и др.]. Заяв. 23.03.1983 ; зарегистрир. 26.04.84.
46. Цистерна для жидкого водорода : а. с. 285017, F17C300 / Черемных О. Я. [и др.]. Заяв. 04.08.1987 ; зарегистрир. 01.12.1988.
47. Устройство для подачи реагента на ЭХГ СЭП космического объекта : а. с. 198160, F41C3/00 / Черемных О. Я. [и др.]. Заяв. 28.09.1988 ; зарегистрир. 03.07.1989.
48. Теплоизоляция криогенных устройств : а. с. 256974 / Черемных О. Я. [и др.]. Заяв. 1986 ; зарегистрир. 01.07.1987.
49. Система хранения реагентов в криогенном состоянии : а. с. 301601 F17C/08 / Черемных О. Я. Заявл. 04.05.88 ; зарегистрир. 02.10.1989.
50. Способ технического освидетельствования криогенных резервуаров периодически в процессе эксплуатации : а. с. 1640494, F17C13/00 / Черемных О. Я. [и др.]. 1991. Бюл. № 13. 4 с.