

УДК 546/21 (038)

О.Я. ЧеремныхАО «УралКриоМаш», Восточное шоссе, 24, г. Нижний Тагил Свердловской области, РФ, 622051
e-mail: cryont@cryont.ru**ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ, РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ
ГАЗИФИКАЦИИ, ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА ВЫСОКОЙ ЧИСТОТЫ, ИСПОЛЗУЕМОГО
В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРАХ**

В космических и летательных аппаратах, глубоководных объектах, автомобильных агрегатах широкое применение находят водороднокислородные электрохимические генераторы, обеспечивающие выработку электроэнергии и получение воды. Система энергопитания этих объектов включает в себя как непосредственно электрохимический генератор, так и систему хранения и подготовки реагентов, в том числе и ёмкостное оборудование с системой подачи водорода с различными теплофизическими параметрами. Сообщается об опыте ОАО «УралКриоМаш» по созданию систем хранения и обеспечения водородом электрохимических генераторов космических объектов.

Ключевые слова: Электрохимический генератор системы энергопитания космического объекта (ЭХГ СЭП КО). Система хранения и подготовки реагентов (СХПР). Ракетно-космический комплекс. Ёмкость-хранилище жидкого водорода. Резервуар газообразного водорода. Газгольдер водорода. Транспортировщик-заправщик водорода. Газификатор водорода. Стартовый комплекс. Монтажно-испытательный комплекс.

О. Ya. Cheremnikh**RESEARCH OF PROCESSES, THE DEVELOPMENT OF METHODS AND MEANS OF
GASIFICATION, STORAGE OF HIGH PURITY HYDROGEN USED AS FUEL
IN ELECTROCHEMICAL GENERATORS**

In the aerospace and aircraft, deep sea objects, road aggregates are widely used hydrogen-oxygen electrochemical generators providing generation of electricity and water reception. The system of energy supply these objects consists of both directly electrochemical generator and storage system and preparation of reagents, including the tank equipment with a system of supply hydrogen with different physical parameters. It is reported about the experience of «UralKrioMash» on creation storage system and to provide electrochemical generators of space objects by hydrogen.

Keywords: Electrochemical generator power supply system of the space object (ECG PSS SO). Storage and preparation of reagents system (SPRS). Rocket and space complex. Storage tanks of liquid hydrogen. Receiver of gaseous hydrogen. Gas holder of hydrogen. Transporter-tanker of hydrogen. Gasifier hydrogen. Launch complex. Assembly and test complex.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие в США, Германии, Японии, Великобритании, России активно ведутся работы по использованию водорода в качестве топлива для водороднокислородных электрохимических генераторов (ЭХГ) систем энергопитания (СЭП) как транспортных средств, так и стационарных установок в различных отраслях промышленности: в энергетике космических кораблей и аппаратов; в энергетике морских кораблей-аппаратов погружения; электроприводах автомобилей и вспомогательных машин (каров, погрузчиков, тракторов).

Обязательной составной частью любого типа энергоустановки на основе ЭХГ является система хранения и подготовки реагентов (СХПР) [1]. Эти системы могут быть классифицированы следующим образом:

1. СХПР с газообразными реагентами, в которых топливо (водород) и окислитель (кислород) хранятся в виде сжатых газов и подаются непосредственно в ЭХГ.

2. СХПР с криогенными реагентами (водород и кислород), в которых топливо и окислитель хранятся в сжиженном состоянии и перед подачей в ЭХГ газифицируются.

В схемно-конструктивном отношении наиболее

простой является СХПР с газообразными реагентами, так как они хранятся в готовом к подаче в ЭХГ виде. Такая СХПР в принципе состоит из шар-баллонов высокого давления (15-50 МПа) с объёмом до 1 м³ каждый и системы редуцирования.

Наиболее существенным недостатком, ограничивающим применение баллонной системы СХПР, является большая относительная масса металлических баллонов на 1 м³ газа.

Наиболее компактна и схемно достаточно проста СХПР с криогенным хранением водорода и кислорода, состоящая из криостата и системы газификации. Однако в этой конструкции возникает проблема удержания водорода и кислорода в сжиженном состоянии при длительном хранении для предотвращения потерь реагента. Потери жидкого водорода в криостате СХПР к тому же вследствие неизбежного теплопритока приводят к увеличению примесей азота, кислорода в остающейся массе реагента. Поэтому криогенный способ хранения водорода используется в энергоустановках, в которых по условиям эксплуатации СХПР реагенты могут быть заправлены непосредственно перед началом работы. Длительность непрерывной работы таких установок составляет несколько сотен часов. Им присущи относительно небольшие массы.

Разработка новых систем ракетно-космической техники привела к необходимости создания на борту космических объектов в качестве источников электроэнергии электрохимических генераторов, использующих кислород и водород, последний из которых хранится в баках СХПР как при докритических, так и закритических его параметрах.

Это выдвинуло проблему разработки и создания наземных криогенных комплексов, включающих средства доставки криогенных компонентов топлива и окислителя, длительного их хранения и подачи в систему энергопитания космического объекта на ракетно-космическом комплексе [2-6].

В зависимости от задач, решаемых космическим объектом, предъявляются соответствующие требования к реагентам, подаваемым в систему их хранения и подготовки космического объекта или непосредственно на электрохимический генератор энергомодуля [2,4]. Так, при подготовке ракетно-космической системы на стартовой позиции криогенный комплекс должен обеспечить как заправку бортовых баков СХПР системы энергопитания космического объекта жидким водородом и кислородом, создание в них рабочего давления, так и непосредственную подачу газообразных реагентов на энергомодуль для запуска ЭХГ СЭП космического аппарата.

При отработке электрохимического генератора системы энергопитания космического аппарата в монтажно-испытательном корпусе орбитального корабля (МИК ОК) требуется подача газообразных реагентов непосредственно на ЭХГ как в лаборатории СЭП, так и на рабочее место космического объекта при давлении водорода на входе в энергомодуль до 2,5 МПа и максимальном расходе до 2,0 кг/ч в течение 5-6 суток.

Основопологающими требованиями, которые предъявляются к реагентам СЭП космического объекта (КО), являются чистота водорода и кислорода: на уровне, соответственно, 99,999 и 99,99 % об. для подаваемых непосредственно на ЭХГ СЭП КО и на уровне, соответственно, 99,9999 и 99,999 % об. для подаваемых непосредственно в баки СХПР СЭП ОК.

Существенное влияние на энергетическую характеристику ЭХГ оказывают, помимо чистоты реагентов, также давления, температуры и расходы подаваемых водорода и кислорода. Высокие требования к чистоте реагентов объясняются накоплением примесей на электродах ЭХГ, что снижает его энергетическую характеристику. Для удаления примесей, образовавшихся на электродах, осуществляют их продувку чистым реагентом (водородом или кислородом, соответственно). Это приводит к неоправданным потерям реагентов и к дестабилизации космического объекта в полете при сбросе реагентов в космическое пространство в процессе продувок.

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

Влияние на вольтамперную характеристику топливного элемента ЭХГ парциального давления водорода потребовало поддержания его давления перед энергомодулем в 1,1...2,5 МПа в течение длительного периода времени.

Совокупность этих требований привела к необходимости создания системы хранения и газификации водорода при докритических или закритических его параметрах как на борту космического объекта, так и на наземных стартовых и монтажно-испытательных комплексах.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЧИСТОТЫ ВОДОРОДА ПРИ ЕГО ГАЗИФИКАЦИИ И ХРАНЕНИИ В ГАЗООБРАЗНОМ СОСТОЯНИИ

В соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми к реагентам топливных элементов электрохимических генераторов, хранящимся как в криогенном состоянии в криостатах, так и в газообразном состоянии — в газгольдерах или ресиверах, необходимо обеспечение качественного и количественного содержания примесей в водороде и кислороде в течение всего времени работы электрохимического генератора.

Целью экспериментальной отработки этих требований на штатном оборудовании явилось получение данных, их анализ и подготовка рекомендаций по технологии обеспечения чистоты водорода, подаваемого из хранилища жидкого водорода на ЭХГ СЭП космического аппарата.

Программа эксперимента предусматривала следующие этапы:

— отработка технологии обеспечения чистоты водорода при докритическом и закритическом его давлениях в ёмкости при отборе жидкости из ёмкости-хранилища и последующей газификации, компримирования и заполнения баллонов и газгольдера СХПР ЭХГ СЭП;

— отработка технологии обеспечения чистоты водорода при докритических и закритических его параметрах в ёмкости при отборе водорода из «подушки» ёмкости и заполнения им баллонов или газгольдера.

При испытаниях использовался жидкий водород марки «Б» по ОСТ В-113-03-502-86, в котором содержание примесей азота и кислорода значительно превышало нормируемые показатели нормативных документов. С этого же завода отгружался одновременно и жидкий водород марки «А» со значительно меньшим содержанием в нём примесей азота и кислорода, чем в водороде марки «Б». Практически показатели примесей по кислороду составляли менее $(5-8) \cdot 10^{-8}$ % об. и по азоту — 10^{-7} % об.

Достоверность результатов, полученных в процессе проведения экспериментальных работ, подтверждается высоким классом точности использованных анализаторов примесей. При проведении работ применялся анализатор «Микрохром» как на заводе-производителе жидкого водорода, получаемого при электролизе воды, так и на испытательной базе в РФ. На базу водород доставлялся в железнодорожной цистерне ЖВЦ-100М2.

Учитывая, что 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 ёмкость с жидким водородом экспериментальной установки вносилась расчётная порция газообразного азота в составе гелиевоазотной смеси (гелий — для устранения примерзания азота к стенкам трубки) из переносного пятилитрового баллона. Состав газовой смеси составил: 50,00 % об. — гелий, 49,75 % об. — азот, 0,25 % об. — кислород. При этом давление в ёмкости с жидким водородом с объёмом $6,6 \text{ м}^3$ равнялось 0,04 МПа, начальное давление в баллоне — 1,0 МПа, конечное — 0,07 МПа. Граничная растворимость кислорода и азота при $T=21,1 \text{ К}$ составила: по кислороду — $7,86 \cdot 10^{-8}$ % об, по азоту — $6,05 \cdot 10^{-5}$ % об.

Расчёт показал, что количество внесённого азота находится выше уровня растворимости для данного объёма жидкого водорода, т. е. гарантированно имелся максимально загрязнённый жидкий водород с твёрдым азотом в осадке.

Результаты анализа качества жидкого водорода в ёмкости после внесения в него примеси азота составили: по кислороду — $(1,9...2,4) \cdot 10^{-6}$ % об., по азоту — $(2,2...2,7) \cdot 10^{-4}$ % об.

В ходе эксперимента проводились две серии замеров, в каждом из них — по пять измерений.

Определение концентрации примесей осуществлялось по методике, разработанной в соответствии с ОСТ 92-324-86 и ГОСТ 8467-82.

Погрешность показаний анализатора «Микрохром» составила: по кислороду в интервале $(8 \cdot 10^{-8}...1 \cdot 10^{-3})$ % об. — 30 %; по азоту в интервале $(4 \cdot 10^{-7}...5 \cdot 10^{-3})$ % об. — 30 %.

2.1. Заполнение баллонов газообразным водородом, отбираемым из газового объёма ёмкости-хранилища

Принципиальная схема заполнения водородом баллонной рампы (ресиверной) в результате отбора газа из «подушки» ёмкости-хранилища представлена на рис. 1. Ёмкость-хранилище жидкого водорода (технические характеристики представлены в табл. 1) была заправлена жидким водородом при давлении в сосуде 0,1-0,15 МПа. По окончании заправки производился сброс паров водорода из ёмкости до установления давления в ней на уровне 0,03 МПа и затем осуществлялось термостатирование в течение пяти часов.

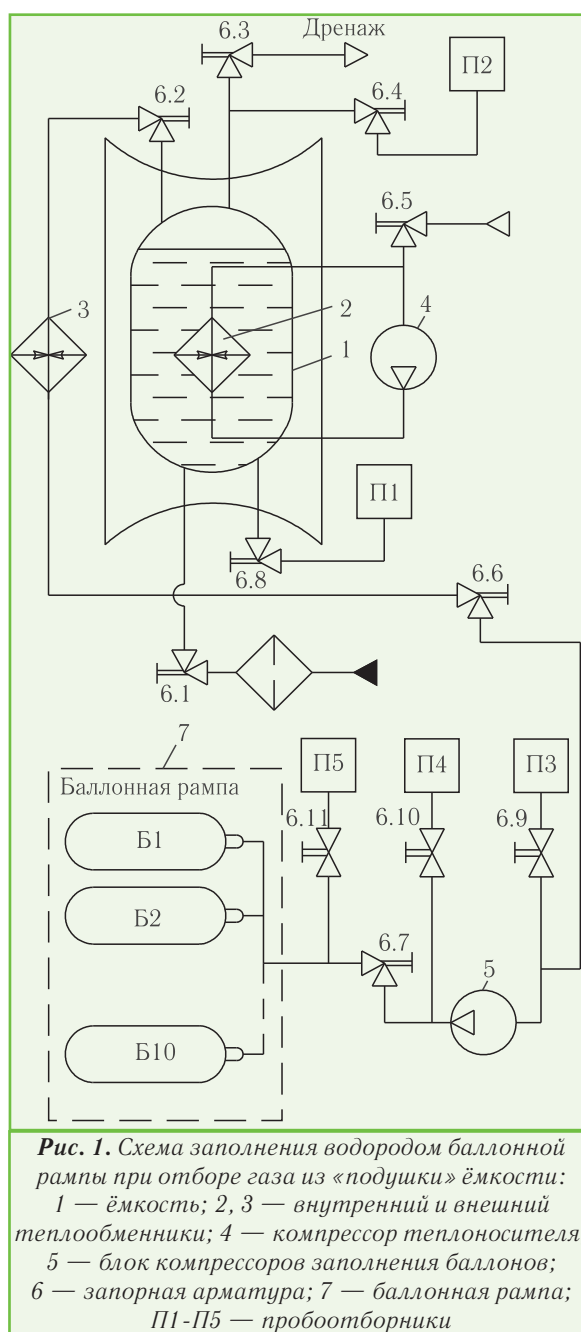


Рис. 1. Схема заполнения водородом баллонной рампы при отборе газа из «подушки» ёмкости: 1 — ёмкость; 2, 3 — внутренний и внешний теплообменники; 4 — компрессор теплоносителя; 5 — блок компрессоров заполнения баллонов; 6 — запорная арматура; 7 — баллонная рампа; П1-П5 — проботборники

Таблица 1. Технические характеристики ёмкости жидкого водорода экспериментальной установки с внутренним теплообменником

Наименование параметра	Величина параметра
Геометрический объём сосуда, м ³	8,0
Рабочее давление в сосуде, МПа	1,8
Количество заправляемого жидкого водорода в ёмкость, кг	475
Тип теплоизоляции	Многослойно-вакуумная
Потери жидкого водорода от испарения, % в сутки	1,0
Материал ёмкости: — сосуда — оболочки	Сталь 12Х18Н10Т Сталь 09Г2С
Габаритные размеры ёмкости, мм: — длина — ширина — высота	5200 3500 4900
Способ выдачи водорода из ёмкости	Верхний, из «подушки» ёмкости
Площадь поверхности внутреннего теплообменника, м ²	3,3
Масса ёмкости, кг	11550
Величина вакуума в межстенном пространстве ёмкости в холодном состоянии, мм рт. ст.	9·10 ⁻⁶

На первом этапе эксперимента исследовалось влияние равновесных параметров состояния водорода в ёмкости при подъёме давления и в процессе сброса паров водорода из ёмкости как при докритических, так и при закритических его параметрах на содержание примесей в водороде, находящемся в «подушке» ёмкости.

Подъём давления паров водорода в ёмкости осуществлялся посредством внутреннего теплообменника 2, через который пропускаться водород в качестве греющего газа — теплоносителя, подаваемого в контур теплообменника компрессором. Расходные характеристики компрессора при давлениях нагнетания 5,0; 10,0 МПа представлены на рис. 2.

Первоначально производился подъём давления в ёмкости от естественного теплопритока до величины 0,1 МПа и после этого осуществлялся анализ газа из «подушки» ёмкости, который отбирался пробоотборником П2 при незначительном дренаже газа через вентиль 6.3 (серия замеров из пяти стабильных анализов).

После завершения анализов на содержание примесей в водороде включалась циркуляция теплоносителя (греющего газообразного водорода) в теплообменнике АТ-1, и давление в ёмкости поднималось до 0,2 МПа. При этом на компрессоре греющего газа давление всасывания составляло 0,2 МПа, давление нагнетания — 5,0 МПа, расход теплоносителя-водорода через теплообменник — 8,4 нм³/ч (рис. 2). Произво-

дился следующий анализ газа на содержание примесей азота и кислорода в водороде из «подушки» ёмкости (серия из пяти стабильных анализов). Циклы «подъём давления — анализ газа из «подушки» ёмкости» выполнялись подобным образом последовательно при давлениях в ёмкости: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,8; 1,3 МПа.

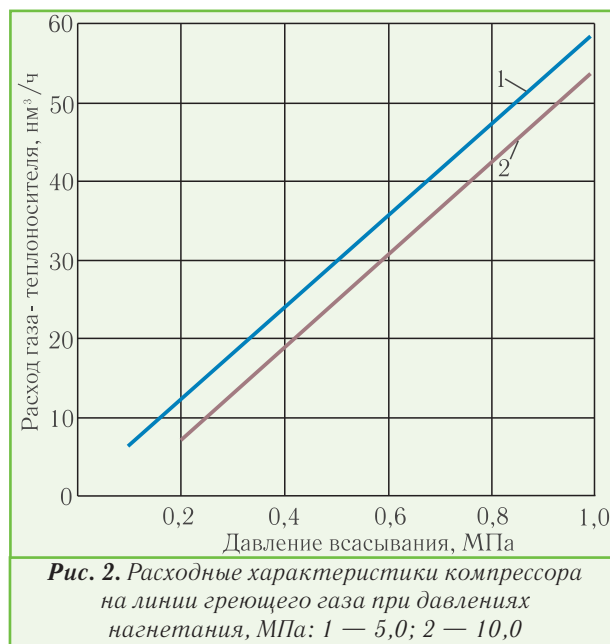


Рис. 2. Расходные характеристики компрессора на линии греющего газа при давлениях нагнетания, МПа: 1 — 5,0; 2 — 10,0

После получения данных о содержании примесей в водороде при достижении критического давления $P_{кр}=1,3$ МПа (равновесная $T_{кр}=33$ К и $\rho \geq \rho_{кр} \geq 30$ кг/м³), когда весь объём ёмкости был заполнен однофазным жидким водородом, первоначально проводился обратный процесс в виде циклов «сброс давления — анализ газа из «подушки» ёмкости» последовательно для давлений в ёмкости 0,8; 0,4; 0,2; 0,1.

Результаты измерений приведены в табл. 2.

Таблица 2. Содержание примесей в водороде в ёмкости при теплоподводе от внутреннего теплообменника с газовым теплоносителем при различных давлениях

Объём водорода в ёмкости, м ³	Давление в ёмкости, МПа	Содержание примесей в водороде в газовой «подушке» ёмкости, % об.	
		O ₂	N ₂
*6,6	0,1	1,0·10 ⁻⁷	1,7·10 ⁻⁵
6,4	0,2	5,5·10 ⁻⁷	3,3·10 ⁻⁵
6,2	0,3	8,6·10 ⁻⁷	5,8·10 ⁻⁵
5,8	0,4	2,8·10 ⁻⁷	7,4·10 ⁻⁵
5,4	0,8	2,0·10 ⁻⁷	4,5·10 ⁻⁵
**5,0	1,3	2,2·10 ⁻⁶	4,8·10 ⁻⁴
4,3	0,8	<4,0·10 ⁻⁸	<3,0·10 ⁻⁷
3,8	0,4	<4,0·10 ⁻⁸	<3,0·10 ⁻⁷
3,4	0,2	<4,0·10 ⁻⁸	<3,0·10 ⁻⁷
3,2	0,1	<4,0·10 ⁻⁸	<3,0·10 ⁻⁷

Примечание: *) Подъём давления водорода в ёмкости. **) Сброс давления водорода из ёмкости.

Таблица 3. Содержание примесей кислорода и азота в водороде в ресиверной при отборе газа из «подушки» ёмкости

Наименование этапа	Содержание примесей в подушке ёмкости, % об.		Содержание примесей на входе в баллоны, % об.		Содержание примесей в баллонах, % об.	
	O ₂	N ₂	O ₂	N ₂	O ₂	N ₂
До заполнения баллонов водородом	6,6·10 ⁻⁸	4,8·10 ⁻⁷	8,2·10 ⁻⁸	5,7·10 ⁻⁷		
После заполнения баллонов водородом	5,5·10 ⁻⁷	3,4·10 ⁻⁵	3,6·10 ⁻⁷	4,8·10 ⁻⁵	3,8·10 ⁻⁷	3,5·10 ⁻⁵
После хранения водорода в баллонах в течение месяца					1,9·10 ⁻⁷	3,0·10 ⁻⁵
При хранении водорода в баллонах в течение двух месяцев					1,4·10 ⁻⁷	1,6·10 ⁻⁵

На втором этапе экспериментов производилось заполнение баллонной рампы, содержащей десять баллонов объёмами 10 м³ каждый, изготовленных из стали 16ГС, газообразным водородом до давления 12,0 МПа.

Предварительно осуществлялось «полоскание» баллонной рампы газообразным водородом до получения содержания примесей: кислорода — не более 1,0·10⁻⁶ % об., азота — не более 1,0·10⁻⁴ % об.

Давление на входе компрессора составляло 0,35-0,4 МПа и поддерживалось циркуляцией в контуре теплообменника АТ-1. Для определения примесей азота и кислорода в водороде последний отбирался пробоотборниками ПЗ, П4, П5.

На заключительном этапе эксперимента осуществлялся анализ водорода, заправленного в баллоны рампы, на содержание в нём примесей азота и кислорода. Эти анализы выполнялись через один и два месяца после их заполнения. Результаты иллюстрируются табл. 3.

Анализируя представленные в таблице результаты экспериментов, можно сделать следующие выводы:

— При испарении жидкого водорода в ёмкости за счёт теплоподвода от внутреннего теплообменника с газовым теплоносителем содержание примесей азота и кислорода в газовой «подушке» ёмкости при докритических давлениях и равновесных им температурам на порядок ниже, чем содержание примесей в жидком водороде.

— После достижения закритических параметров водорода в ёмкости ($P_{кр} \geq 1,3$ МПа, $T_{кр} \geq 33$ К; $\rho_{кр} \geq 30$ кг/м³) содержание примесей в водороде оказывается близким содержанию примесей в жидком водороде в начальный момент времени после заполнения ёмкости, так как водород в ёмкости находится в однофазном жидком состоянии.

— При сбросе давления водорода в ёмкости и достижения равновесной температуры ниже критических значений при $\rho \geq \rho_{кр}$ происходит образование жидкой и газовой фаз водорода в ёмкости. При этом содержание примесей азота и кислорода в водороде в газовой «подушке» ёмкости значительно ниже (по кислороду — на порядок, по азоту — на два порядка), чем содержание примесей в газообразном водороде в «подушке» ёмкости в начальный момент времени после заполнения ёмкости жидким водородом.

— При хранении газообразного водорода в баллонах в течение 30 и 60 суток с момента их заполнения концентрация примесей в водороде несколько снижается.

2.2. Заполнение баллонов ресиверной газообразным водородом посредством отбора жидкости из ёмкости с последующей её газификацией и компримированием

ванием

Ёмкость-хранилище жидкого водорода (технические характеристики представлены в табл. 4) заправлялась одной тонной водорода при избыточном давлении в ёмкости 0,05 МПа. После проведения термостатирования в течение пяти часов осуществлялся наддув газовой полости резервуара с помощью испарителя ёмкости 2 (рис. 3) до давления в сосуде 1,3 МПа.

Таблица 4. Технические характеристики ёмкости жидкого водорода экспериментальной установки с внешним испарителем-теплообменником

Наименование параметра	Величина параметра
Геометрический объём сосуда, м ³	16
Рабочее давление в сосуде, МПа	1,6
Максимальное количество заправляемого жидкого водорода в ёмкость, кг	950
Тип теплоизоляции	Многослойно-вакуумная
Потери жидкого водорода от испарения, % в сутки	1,2
Материал ёмкости: — сосуда — оболочка	Сталь 12Х18Н10Т Сталь 09Г2С
Способ выдачи водорода из ёмкости	Нижний, с наддувом от внешнего испарителя

Перед наддувом газовой полости резервуара при давлении 0,05 МПа производился анализ примесей азота и кислорода в жидком водороде, находящемся в ёмкости, который отбирался пробоотборником П1 (табл. 5).

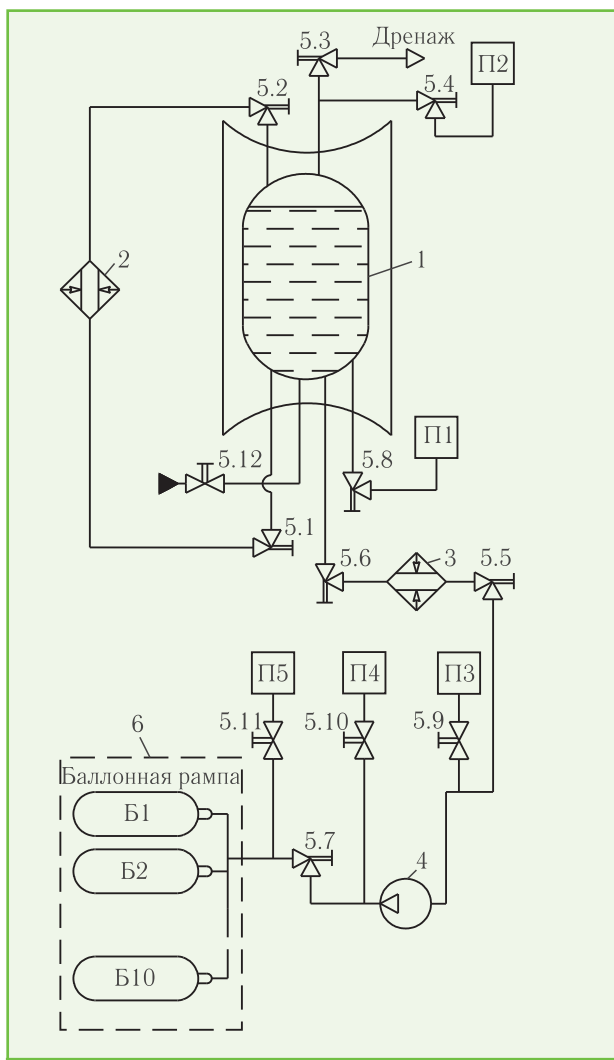


Рис. 3. Схема заполнения газообразным водородом баллонов посредством отбора жидкости из ёмкости, газификации и компримирования газа: 1 — ёмкость; 2 — испаритель наддува «подушки» ёмкости; 3 — испаритель-теплообменник; 4 — блок компрессоров заполнения баллонов; 5 — запорная арматура; 6 — баллонная рампа; П1-П5 — пробоотборники

В дальнейшем осуществлялась выдача жидкого водорода из ёмкости при неравновесных его параметрах при давлении 1,3 МПа (при двухфазном состоянии водорода) во внешний испаритель-теплообменник 3. Испарившийся водород подавался в блок компрессоров, с помощью которых закачивался в баллонные рампы до давления 12,0 МПа. При закачке баллонов использовались компрессоры моделей 6,3МК-70/15-400 и 4,0МК-70/15-400.

В процессе закачки баллонов газообразный водород из трубопровода нагнетания отбирался для анали-

зов пробоотборником П4. Отбор водорода для анализа примесей в нём производился из баллонов пробоотборником П5.

Наименование этапа	Содержание примесей в жидком водороде в ёмкости, % об.		Содержание примесей на входе в баллоны, % об.		Содержание примесей в баллонах, % об.	
	O ₂	N ₂	O ₂	N ₂	O ₂	N ₂
До заполнения баллонов водородом	$3,6 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$8,9 \cdot 10^{-7}$	$9,5 \cdot 10^{-5}$
По окончании заполнения баллонов водородом	$4,3 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-7}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$9,7 \cdot 10^{-5}$
При хранении водорода в баллонах в течение месяца	—	—	—	—	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$9,4 \cdot 10^{-5}$

Таблица 5. Содержание примесей в водороде в резервной при отборе жидкости из ёмкости, газификации и компримирования

Результаты измерения примесей представлены в табл. 5.

На завершающем этапе экспериментов определялось содержание примесей азота и кислорода в газообразном водороде, заправленном в баллоны рампы, в процессе его 30-суточного хранения.

Анализируя представленные в таблицах 2 и 5 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-ти суточного хранения практически не наблюдалось.

3. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ГАЗИФИКАЦИИ, ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА ПРИ ПОДАЧЕ В СХПР СЭП

В СХПР СЭП аппарата космического назначения хранилище водорода представляет собой шар-баллоны объёмом до 1 м³ и рабочим давлением 3,5-4,0 МПа, которые в штатном режиме используются как криостаты с системой газификации, а при подготовке и отработке ЭХГ СЭП в наземных условиях — в качестве газгольдеров.

Заправка шар-баллонов СХПР СЭП жидким и га-

зообразным водородом с заданными параметрами проводится в монтажно-испытательном или стартовом комплексе из стационарных или транспортных ёмкостей-хранилищ жидкого водорода (рис. 4), газгольдеров газообразного водорода (рис. 5), ресиверов стационарного или транспортного исполнения (рис. 6).

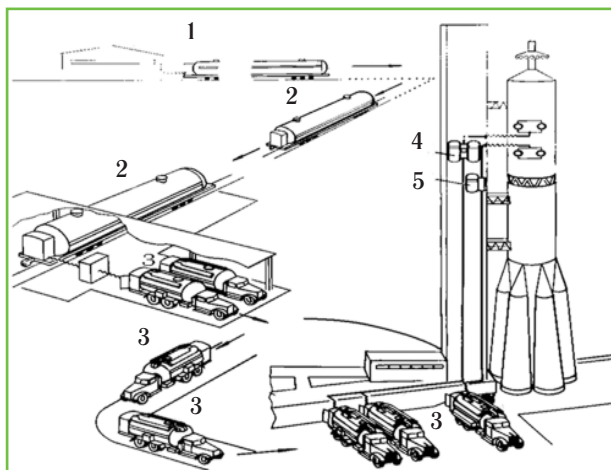


Рис. 4. Комплекс по заправке баков СХПР СЭП лунного орбитального корабля РКС «Н1-Л3» на стартовом комплексе: 1 — завод-производитель водорода; 2 — ж/д цистерны для транспортирования жидкого водорода; 3 — автомобильные заправщики-газификаторы жидкого водорода на станции перелива; 4 — дозаторы жидкого водорода; 5 — СХПР СЭП ОК

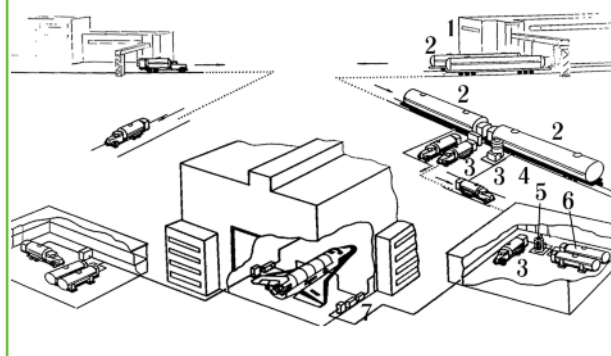


Рис. 5. Комплекс по отработке ЭХГ СЭП орбитального корабля в МИК ОК: 1 — завод-производитель водорода; 2 — ж/д цистерны для транспортирования водорода; 3 — автомобильные транспортировщики; 4 — технологическая ёмкость; 5 — газификатор жидкого водорода; 6 — газгольдер газообразного водорода; 7 — арматурный отсек

Требуемые параметры водорода, подаваемого из наземных хранилищ в СХПР СЭП, обеспечиваются технологическим комплексом систем хранения, транспортирования, газификации и заполнения хранилищ, разработанных с учётом основополагающих принципов обеспечения чистоты водорода, сформулированных по результатам экспериментальных исследований [7, 8].

На стартовом комплексе РКС «Н1-Л3» подготовка и заправка баков СХПР СЭП лунного орбитального корабля водородом производилась из автомобильных заправщиков-газификаторов (фото 7). При этом для подготовки баков перед их заполнением и прямой подачи на ЭХГ перед стартом газообразного водорода жидкость из транспортной ёмкости (рис. 8) газифицировалась в испарителе 3 и подавалась в газовую «подушку» ёмкости. Технические характеристики ёмкости представлены в табл. 6.

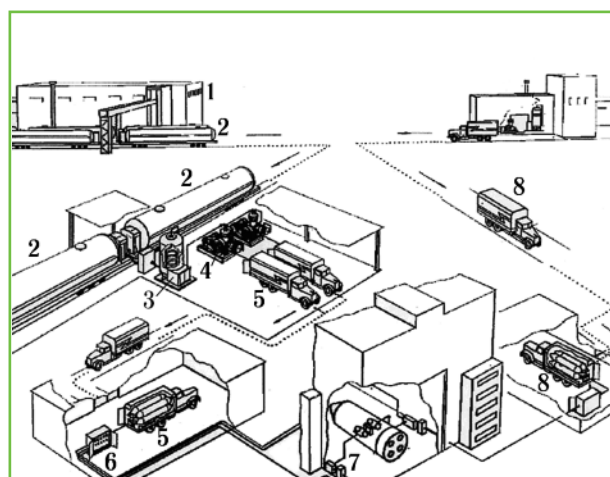


Рис. 6. Комплекс по заполнению газообразным водородом баков СХПР СЭП ЛОК РКС «Н1-Л3» на технической позиции: 1 — завод-производитель жидкого водорода; 2 — ж/д цистерны для транспортирования жидкого водорода; 3 — газификатор жидкого водорода; 4 — блок компрессоров; 5 — транспортная ресиверная газообразного водорода; 6 — редукционный блок управления и контроля; 7 — арматурный блок; 8 — СХПР СЭП ОК



Фото 7. Общий вид автомобильного заправщика-газификатора жидкого водорода

Из «подушки» ёмкости газообразный водород поступал в теплообменник 4, где с помощью нагревателя 6 и вентилятора 7 подогревался до заданной температуры и далее поступал в СХПР СЭП ЛОК для «полоскания» баков высокочистым водородом и прямой подачи на ЭХГ в период подготовки РКС к пуску [9].

Дальнейшее развитие ракетно-космической техники и создание новых, более современных РКС поставили задачу сооружения наземных заправочных комплек-

сов, обеспечивающих длительное хранение высококачественного водорода в СХПР СЭП ОК при закритических параметрах и его подачу со сложно-изменяющейся расходной характеристикой в процессе предстартовой подготовки ЭХГ СЭП ОК [10, 11].

Таблица 6. Технические характеристики заправщика-газификатора жидкого водорода

Наименование параметра	Величина параметра
Геометрический объём сосуда, м ³	10
Рабочее давление в сосуде, МПа	1,0
Количество заправляемого жидкого водорода в ёмкость, кг	540
Тип изоляции ёмкости	Многослойно-порошково-вакуумная
Величина вакуума в теплоизоляционной полости ёмкости, мм.рт.ст.	$2 \cdot 10^{-4}$
Потери жидкого водорода от испарения, % в сутки	1,73
Темп роста давления паров водорода в сосуде ёмкости при транспортировке с 0,02 до 0,5 МПа, ч	140
Максимальный расход газообразного водорода на выходе из теплообменника, м ³ /ч	до 150
Температура газообразного водорода на выходе из теплообменника, °С	25-45
Материал сосуда	Сталь 12Х18Н10Т
Материал оболочки	Сталь 09Г2С
Масса агрегата, кг	4000

Для обеспечения заправки баков СХПР СЭП ОК водородом при закритических параметрах было разработано несколько схемных решений.

Одно из них представлено на рис. 9. Жидкий водород из ёмкости-хранилища 1 в заданном количестве подавался в дозатор 2 при докритическом давлении. Достижение заданной величины закритического давления в баке СХПР СЭП обеспечивалось испарением водорода в газификаторе 3 [8].

Этот способ, несмотря на его простоту, имел ряд недостатков. Один из них касался неудовлетворительного обеспечения сложно меняющейся во времени расходной характеристики подаваемого водорода непосредственно на ЭХГ при переменной энергетической нагрузке [1, 4]. Поддерживать давление в ёмкости при длительной подаче водорода на ЭХГ при докритических параметрах вследствие значительных теплопритоков с такой расходной характеристикой реагента было технически

проблематично. Поэтому при отработке ЭХГ СЭП космического объекта в наземных условиях стали содержать реагент в ёмкостях-хранилищах при докритических параметрах

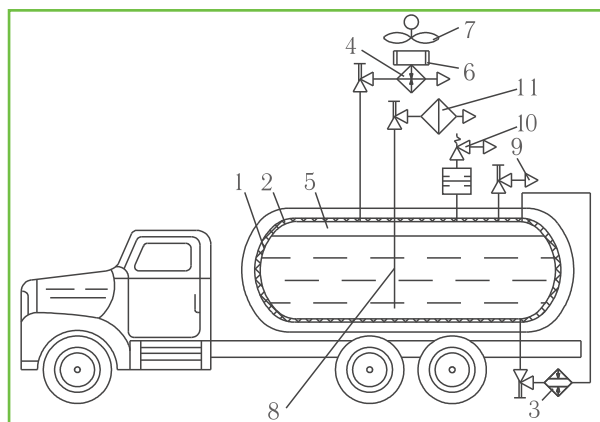


Рис. 8. Схема автомобильного заправщика-газификатора жидкого водорода: 1 — внутренний сосуд; 2 — теплоизоляция; 3 — испаритель; 4 — теплообменник; 5 — газовая «подушка» сосуда; 6 — подогреватель; 7 — вентилятор; 8 — магистраль «слива-налива» водорода; 9 — магистраль газосброса водорода; 10 — предохранительные устройства; 11 — фильтр

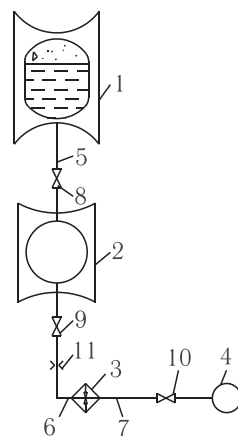


Рис. 9. Схема заправки баков СХПР СЭП газообразным водородом при закритическом давлении: 1 — ёмкость-хранилище для жидкого водорода; 2 — дозатор водорода; 3 — газификатор; 4 — бак СХПР СЭП; 5-7 — трубопроводы; 8-10 — запорная арматура; 11 — расходомер

с минимальной величиной теплопритоков к нему перед подачей водорода на ЭХГ [10, 11] или в газгольдер с последующей подачей на энергомодуль [7].

Для подачи водорода на ЭХГ СЭП КО из газгольдеров (рис. 10,а) или баллонов (рис. 10,б) заполнение их ведут путем непосредственной газификации при невысоких рабочих давлениях 2,5-3,0 МПа или при использовании компримирования сжимают водород до рабочего давления 30,0-40,0 МПа.

Схема подачи водорода непосредственно из ёмкости-газификатора на ЭХГ СЭП КО при закритических параметрах представлена на рис. 10,в.

При хранении жидкости в ёмкости постоянного объёма под давлением выше критического и равновесной температуре водород представляет собой однофазную среду, которая в зависимости от первоначальной величины удельного объёма v_0 может быть ближе к состоянию или жидкости, или газа. По мере удаления жидкости из ёмкости плотность оставшейся массы жидкости снижается. Для сохранения давления постоянным или поддержания его в задан-

ном диапазоне температура оставшейся жидкости должна со временем увеличиваться. Следовательно, в систему хранения необходимо подавать тепло [12]. Часть этого тепла будет поступать в резервуар через изоляцию ёмкости. Для подачи дополнительного количества тепла используется регенеративный нагрев,

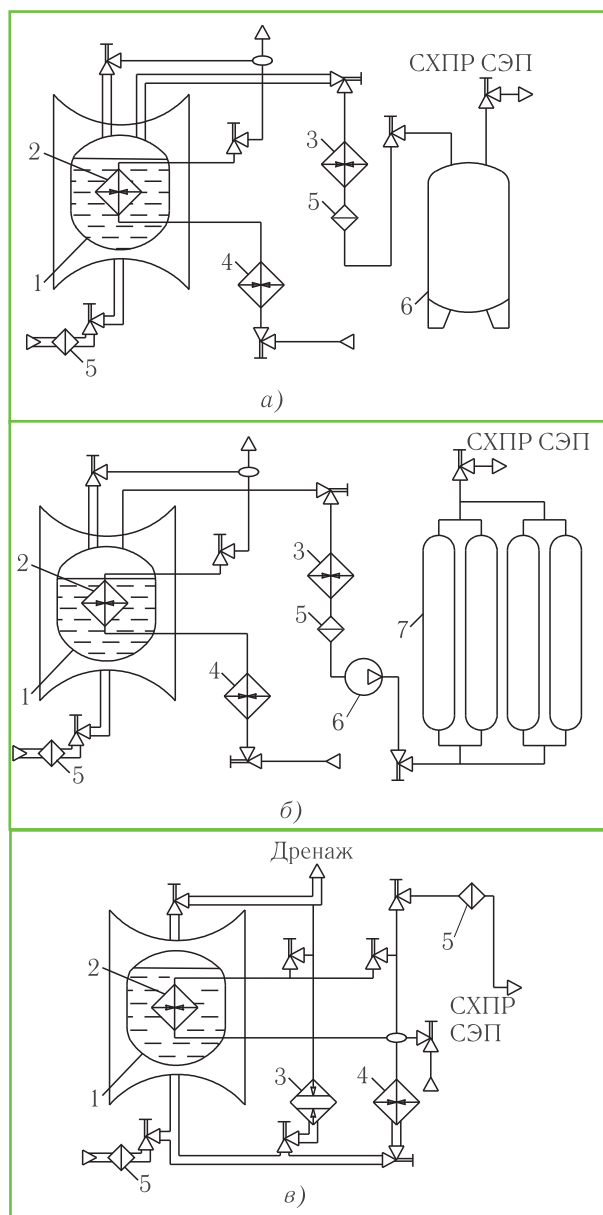


Рис. 10. Принципиальные схемы подачи водорода в СХПР СЭП КО: а — в режиме подачи водорода в СХПР СЭП из газгольдера; б — в режиме подачи водорода в СХПР СЭП из баллонов; в — в режиме непосредственной подачи водорода в СХПР СЭП; 1 — ёмкость; 2 — внутренний теплообменник; 3 — испаритель; 4 — внешний теплообменник; 5 — фильтр; 6 — газгольдер-хранилище (а); 6 — компрессор (б); 7 — ресивер-хранилище

при котором взятый из того же резервуара водород подаётся во внутренний теплообменник ёмкости, где подогревается почти до температуры окружающей среды.

Схема газификации жидкого водорода при закритических параметрах представлена на рис. 10,в. Газификатор жидкого водорода (фото 11) представляет собой, согласно рис. 10,в, систему, состоящую из ёмкости 1; внутреннего теплообменника 2; внешних испарителей-теплообменников 3, 4; запорно-регулирующей арматуры, фильтров 5. Технические характеристики ёмкости-газификатора жидкого водорода представлены в табл. 7.

Таблица 7. Технические характеристики ёмкости-газификатора жидкого водорода на закритические параметры

Наименование параметра	Величина параметра
Рабочая среда	Водород жидкий
Вместимость сосуда, м ³	2,0
Рабочее давление в сосуде, МПа	2,5
Максимальная масса водорода в ёмкости, кг	126
Потери жидкого водорода от испарения, % в сутки	1,0
Тип изоляции	Многослойно-вакуумная
Материал сосуда	Сталь 12Х18Н10Т
Материал оболочки	Сталь 09Г2С
Максимальный расход водорода из ёмкости, кг/ч	2,16
Масса ёмкости, кг	3300
Габаритные размеры ёмкости, мм:	
— длина	1700
— ширина	1700
— высота	2835

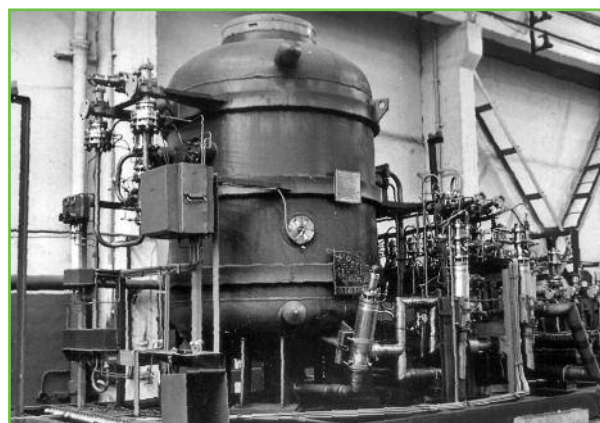


Фото 11. Общий вид газификатора жидкого водорода на закритические параметры

В схеме предусмотрены два возможных способа вывода системы на заданные закритические параметры:
 — Объёмный прогрев жидкого водорода в ёмкости сторонним источником газа (подают во внутренний

теплообменник нагретый газообразный газ-водород из других технологических систем).

— Объёмный прогрев жидкого водорода газом, взятым из той же ёмкости (часть водорода из ёмкости отбирают, производят нагрев во внешнем теплообменнике 3 и подают во внутренний теплообменник 2 ёмкости, где нагретый водород отдаёт тепло и затем сбрасывается в дренаж). При достижении в ёмкости заданной закритической величины давления осуществляют выдачу водорода потребителю, производя его нагрев в теплообменнике 4.

В процессе выдачи водорода из ёмкости для сохранения постоянного его давления или изменения в пределах регулируемого диапазона, часть водорода, предназначенного для потребителя, после нагрева в теплообменнике 4 с заданным расходом подают в теплообменник 2 с последующим перепуском в общую магистраль. При отсутствии необходимости подвода тепла в ёмкость водород будет направляться непосредственно в ЭХГ СЭП КО. В принятой схеме процесс теплоподвода будет носить дискретный характер, т.е. с целью поддержания рабочего давления в ёмкости в заданном диапазоне осуществляют оптимизированный теплоподвод методом двухпозиционного переключения на спадающей или возрастающей кривой давления. Такой метод ведения рабочего процесса позволяет исключить контрольную систему управления по количеству подводимого в ёмкость тепла.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные научно-исследовательские работы по изучению режимов газификации, заполнения газгольдеров и баллонов, а также длительного хранения в газообразном состоянии как при докритических, так и закритических параметрах водорода позволили разработать принципы газификации и хранения высокочистого водорода, используемого в качестве топлива для электрохимических генераторов систем энергоснабжения различных аппаратов космического и наземного назначения. Созданные в ОАО «УралКриоМаш» на основе этих принципов агрегаты и системы для транспортирования, хранения и заправки водородом баков СХПР СЭП и обеспечения подачи высокочистого водорода на электрохимический генератор, удовлетворяют требованиям, предъявляемым к современному оборудованию, используемому как в национальных космических программах, так и в национальных прог-

раммах наших зарубежных партнеров.

Достигнутые результаты позволяют продолжать дальнейшее совершенствование существующего оборудования, в том числе, и оборудования нового поколения для транспортирования, хранения и газификации жидкого водорода.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лидоренко Н.С., Мучник Г.Ф.** Электрохимические генераторы. — М.: Энергоиздат, 1982. — 448 с.
2. Многоцветная космическая система «Энергия-Буран». — М.: НПП «ОВМ-ЛУЧ», 2004. — 356 с.
3. Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва. Раздел 5. Долговременные орбитальные станции. Многоцветные космические системы — М.: Моносовомграф, 1996. — 670 с.
4. Многоцветный орбитальный корабль «Буран»/ **Ю.П. Семенов, Г.Е. Лозино-Лозинский, В.Л. Лапыгин и др.** — М.: Машиностроение, 1995. — 448 с.
5. **Зашляпин Р.А., Павленко С.Т., Черемных О.Я.** Создание транспортных и стационарных средств заправки особочистым водородом и кислородом баков системы энергоснабжения орбитального корабля «Буран»// Технические газы. — 2007. — № 5. — С. 14-20.
6. **Зашляпин Р.А., Павленко С.Т., Черемных О.Я.** Создание транспортных и стационарных средств заправки жидким водородом лунного орбитального комплекса// Технические газы. — 2007. — № 4. — С. 15-20.
7. Авторское свидетельство СССР № 314490. Способ наполнения баллонов высокого давления газообразным водородом. МКИ F17C3/00.
8. Авторское свидетельство СССР № 165710. Способ наполнения ёмкости газообразным водородом. МКИ F17C5/04.
9. Авторское свидетельство СССР № 58048. Заправщик-газификатор жидкого водорода. МКИ F17C5/02.
10. Авторское свидетельство СССР № 189028. Способ газификации жидкого водорода. МКИ F17C/00.
11. Авторское свидетельство СССР № 301601. Система хранения реагентов в криогенном состоянии. МКИ F17C/08.
12. Термодинамический анализ работы газификатора жидкого водорода при закритических параметрах/ **Ю.П. Перфильев, Ж.Р. Рахманов, О.Я. Черемных, Л.М. Гнатюк**// Ракетно-космическая техника. Стартовые комплексы и технологическое оборудование. — 1985. — Серия 3. — Выпуск 4. — С. 3-10.