

О. Я. Черемных

ОАО «УралКриоМаш», Восточное шоссе, 24, г. Нижний Тагил, Свердловская обл., РФ, 622051
e-mail: cryont@cryont.ru

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ЭВАКУАЦИИ ВОДОРОДА ПРИ ЗАКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ ИЗ БАКОВ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОПИТАНИЯ ОРБИТАЛЬНОГО КОРАБЛЯ

В случае переноса или несостоявшегося запуска орбитального корабля на стартовом комплексе, а также послеполётного обслуживания летательного аппарата должна производиться эвакуация водорода из ёмкостей системы хранения и подготовки реагентов систем энергопитания (СХПР СЭП) орбитального корабля. Слив водорода, находящегося в ёмкостях при закритических параметрах, необходимо осуществлять в наземные стационарные и транспортные системы, обеспечивающие безопасный его приём. Сообщается о результатах исследовательских работ ОАО «УралКриоМаш» по разработке методов и средств эвакуации водорода, находящегося в ёмкостях СХПР СЭП орбитального корабля при закритических параметрах, в технологические системы на стартовом или посадочном комплексе орбитального корабля.

Ключевые слова: Жидкий водород. Криогенная ёмкость. Системы хранения и подготовки реагентов системы энергопитания орбитального корабля (СХПР СЭП ОК). Испаритель-теплообменник водорода. Коммуникации жидкого водорода. Ёмкость для слива водорода. Стартовый комплекс. Посадочный комплекс. Наземные стационарные и транспортные системы.

О. Ya. Cheremnikh

ANALYSIS OF THE PROCESS OF EVACUATION HYDROGEN AT SUPERCRITICAL PARAMETERS FROM THE TANKS SYSTEMS OF ENERGY SUPPLY ORBITAL SHIP

In case of delayed or failed start orbital ship on the launch complex, and post-flight servicing of the aircraft must be carried out the hydrogen evacuation from the storage capacity and the preparation of reagents energy supply systems (SSPR SES) orbital ship. Draining a hydrogen in tanks at supercritical parameters, it is necessary to carry out in the ground stationary and transport systems that provide its secure appointment. Report the results of research works JSC «Uralkriomash» for development of methods and means of the hydrogen evacuation within the container SSPR SES the orbital ship at supercritical parameters in industrial processes in the start or landing complex orbital ship.

Keywords: Liquid hydrogen. Cryogenic tank. Storage systems and preparation of reagents the orbital ship systems of energy supply (SSPR SES OS). Evaporator heat exchanger hydrogen. Communications of liquid hydrogen. Capacity to drain hydrogen. Start complex. Boarding complex. Ground stationary and transportation systems.

1. ВВЕДЕНИЕ

На разных стадиях подготовки к запуску или послеполётного обслуживания орбитального корабля перед наземными стартовым или посадочным комплексами ставится задача приёма водорода, находящегося в ёмкостях системы хранения и подготовки реагентов систем энергопитания орбитального корабля (СХПР СЭП ОК) при закритических параметрах, в технологические наземные стационарные или транспортные системы и агрегаты [1-3].

В зависимости от программы полёта орбитально-

го корабля первоначальное количество водорода в ёмкостях СХПР СЭП ОК может быть различно: 50, 75 или 100 %. Водород в ёмкостях СХПР характеризуется соответствующими давлением, температурой, плотностью, может находиться в виде жидкости, парожидкостной смеси, насыщенного пара и газа.

При достижении в ёмкостях в процессе сброса давления при эвакуации водорода критических его параметров (переход через линию насыщения в $T-s$ -диаграмме водорода) может возникать однофазное или двухфазное состояния водорода в ёмкостях СХПР СЭП ОК, что является определяющим фактором при

разработке технологии эвакуации водорода из ёмкостей орбитального корабля.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭВАКУАЦИИ ВОДОРОДА ИЗ ЁМКОСТИ-ХРАНИЛИЩА ПРИ ЗАКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ

При докритических параметрах водорода в ёмкости ($T < T_{кр} < 33$ К; $P < P_{кр} \leq 1,3$ МПа, плотность $\rho_{кр} > 30$ кг/м³) наблюдается его двухфазное состояние жидкость-пар в ёмкости. В этом случае для эвакуации водорода из ёмкости конструктивно предусматриваются магистрали слива и наддува-дренажа. При этом соответственно рассчитываются коммуникации слива и дренажа.

При закритических параметрах водород представляет собой однофазную среду в ёмкости. В зависимости от первоначального состояния перед эвакуацией он может быть близок к жидкости, пару или газу.

В связи с этим коммуникации наполнения-слива, наддува-дренажа наземных магистралей должны быть рассчитаны на соответствующие параметры при эвакуации водорода.

В ходе эксперимента ёмкость заполнялась жидким водородом до вполне определённого количества, характеризующего коэффициент заполнения, при начальном давлении в ёмкости 0,13 МПа и равновесной температуре 21,1 К.

С помощью теплообменника 2 (см. рис. 1) в ёмкости осуществлялся прогрев водорода до достижения нижней границы давления срабатывания предохранительных клапанов — 2,6 МПа. При этом фиксировалась температура водорода в ёмкости по датчику 7.2 и масса — по датчику 8.

При коэффициенте заполнения ёмкости 0,85 начальные параметры водорода перед эвакуацией составляют: давление — 2,6 МПа, температура — 31,2 К. Состояние водорода в ёмкости оценивается как жидкость меньшей плотности по сравнению с первоначальным моментом ($P=0,13$ МПа, $T=21,1$ К, плотность $\rho=59,4$ кг/м³).

В первоначальный момент эвакуацию водорода осуществляют посредством дренажа водорода из ёмкости после открытия запорного вентиля 6.2 и последующей подачей в теплообменник 3 и далее на дренажную свечу. Состояние водорода в магистрали сброса фиксируется по датчику температуры Т3, а непосредственно в ёмкости — по датчику температуры Т2 и датчику давления 9.

При достижении в ёмкости давления водорода 0,7 МПа и температуры продукта выше 33 К он перейдёт в двухфазное состояние «жидкость-пар». Появление паровой фазы в ёмкости фиксирует датчик температуры Т3.

Затем при давлении водорода в ёмкости ниже 0,7 МПа осуществляют его слив из ёмкости в дренажную ёмкость 5 и далее подают в теплообменник 4 и дренажную свечу. Поддержание давления в ёмкости при сливе водорода осуществляют посредством стороне-

го наддува или теплоподводом греющего газа через теплообменник 2. Окончание слива водорода из ёмкости фиксируется датчиком температуры Т1.

Практический интерес представляет эвакуация водорода из ёмкости в случае первоначального заполнения её продуктом на 50 % ($K=0,5$). При этом первоначальные параметры водорода в ёмкости составят: давление — 2,6 МПа, температура — 38,7К, плотность $\rho \leq 30$ кг/м³. Водород в ёмкости будет находиться в виде пара.

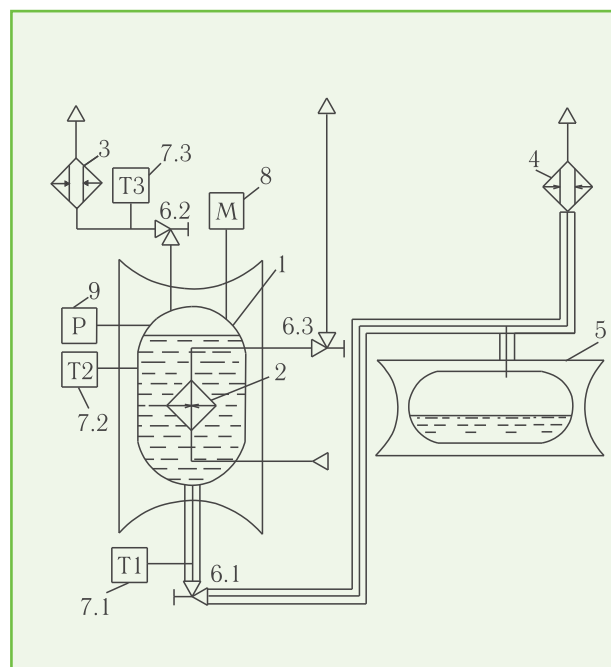


Рис. 1. Схема экспериментальной установки при эвакуации водорода из ёмкости ($V=2$ м³, $P_p=2,6$ МПа) при закритических параметрах: 1 — ёмкость; 2 — внутренний теплообменник ёмкости; 3 — теплообменник дренажной магистрали; 4 — теплообменник сливной магистрали; 5 — сливная ёмкость; 6 — запорная арматура; 7 — датчики температуры; 8 — датчик массы водорода; 9 — датчик давления

Как и в предыдущем случае, эвакуацию водорода из ёмкости в первоначальный момент времени осуществляют путём его дренажа до достижения давления 1,3 МПа и температуры ≥ 33 К. Температура водорода при переходе через линию насыщения на T - s -диаграмме при $P=1,3$ МПа составляет более 33 К и плотность 28,8 кг/м³. Водород в ёмкости будет в виде пара. Следовательно, эвакуацию водорода из ёмкости в дальнейшем продолжают за счёт его сброса через дренажную магистраль в теплообменник 3 и на дренажную свечу до достижения в ёмкости минимального давления 0,13 МПа.

Результаты расчётного определения параметров водорода при его начальных закритических состояниях приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры водорода при эвакуации из ёмкости при начальных закритических состояниях

Коэффициент заполнения ёмкости, %	Масса продукта в ёмкости, кг	Плотность продукта в ёмкости, кг/м ³	Удельный объём, см ³ /моль	Начальное давление эвакуации водорода, МПа	Температура водорода в ёмкости, К	Предполагаемое состояние водорода в начале слива
1	2	3	4	5	6	7
0,85	118,8	59,4	34	2,6	31,2	ж
0,80	111,8	55,9	36	2,6	32,5	ж
0,75	104,8	52,4	38	2,6	33,9	п-ж
0,70	97,9	48,9	41,2	2,6	35,2	п-ж
0,65	90,9	45,4	44,4	2,6	36,1	п-ж
0,6	83,9	41,9	48,1	2,6	37,1	п-ж
0,55	76,9	38,4	52,4	2,6	37,8	пар
0,5	69,9	34,9	57,6	2,6	38,7	пар
0,4	55,9	27,9	72,0	2,6	40,5	газ
0,3	41,9	20,9	96,0	2,6	43,7	газ
0,25	34,9	17,5	115	2,6	46,5	газ
Переход через линию насыщения, МПа	Плотность продукта кг/м ³	Предполагаемое состояние продукта	Масса продукта, оставшегося в ёмкости при переходе через линию насыщения	Масса сбрасываемого продукта, кг		
8	9	10	11	12		
0,7	56,8	ж	113,8	5,2		
0,85	53,6	ж	107,2	4,6		
1,0	49,8	ж	99,6	5,2		
1,12	43,8	п-ж	87,6	10,3		
1,2	41,1	п-ж	82,3	8,6		
1,27	36,5	п	73,0	10,8		
1,3	33,6	п	67,1	9,8		
1,31	28,8	г	57,6	12,3		
1,2	21,2	г	46,3	9,6		
9,6	12,7	г	38,4	3,5		
0,80	10,6	г	31,2	3,7		

Примечание: ж — жидкость; п-ж — пар-жидкость; г — газ.

3. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ЭВАКУАЦИИ ВОДОРОДА ИЗ БАКОВ СЭП ЭХГ ОК В НАЗЕМНУЮ СИСТЕМУ ПРИЁМА РЕАГЕНТОВ

Принципиальная схема хранения и подготовки реагентов (водорода) системы энергопитания орбитального корабля (СХПР СЭП ОК) представлена на рис. 2.

Криогенные баки СХПР СЭП ОК заправляют жидким водородом в количестве 59,3 кг каждый (заправка 100 %) или в количестве 29,7 кг (заправка 50 %) при давлении в ёмкостях 0,13 МПа. Возможен вариант, когда один из баков заправляют на 100 %, а второй бак — на 50 % (75 %) от полной заправки СХПР СЭП ОК) [6].

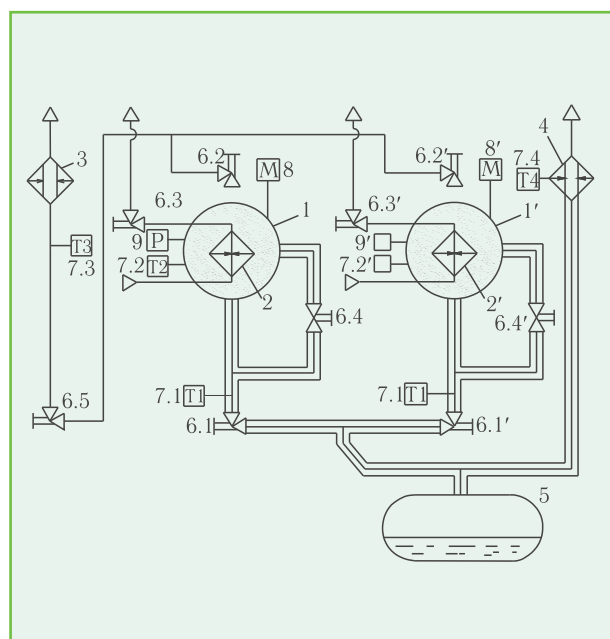


Рис. 2. Схема эвакуации водорода из ёмкостей системы хранения и подготовки реагентов системы энергопитания орбитального корабля:

1 — ёмкости СХПР СЭП ОК; 2 — теплообменники ёмкостей СХПР СЭП ОК; 3 — теплообменник дренажной магистрали; 4 — теплообменник сливной магистрали; 5 — дренажная сливная ёмкость; 6.1, 6.1' — вентили сливной магистрали ёмкости; 6.2, 6.2' — вентили дренажной магистрали ёмкости; 6.3, 6.3' — вентили магистрали теплообменника ёмкости; 6.4, 6.4' — вентили магистралей наполнения ёмкости на 50 %; 6.5 — вентиль дренажной магистрали теплообменника; 7.1, 7.1' — термодатчики сливной магистрали ёмкости; 7.2, 7.2' — термодатчики ёмкости; 7.3 — термодатчик дренажной магистрали; 7.4 — термодатчик сливной магистрали; 8, 8' — датчики массы водорода в ёмкостях; 9, 9' — датчики давления водорода в ёмкости

В дальнейшем за счёт теплоподвода греющего газа во внутренний теплообменник бака или электронагрева осуществляют подъём давления в них до равновесных параметров: давления — 2,6 МПа, температуры — 31,2 К при 100 % заправки баков. В случае заправки баков на 75 % имеем исходное состояние водорода в первом баке: давление — 2,6 МПа, температура — 31,2 К; во втором баке: давление — 2,6 МПа, температура — 38,7 К [4,5].

Таблица 2. Теплофизические параметры водорода в баках СЭП ОК при эвакуации в наземную систему слива реагентов

Коэффициент заполнения бака, %	Масса продукта в баке, кг	Плотность продукта в баке, кг/м ³	Удельный объём, см ³ /моль	Температура продукта в баке, К	Предполагаемое состояние водорода в начале слива	Переход через линию насыщения, МПа
1	2	3	4	5	6	7
100	59,3	69,8	28,9	27,5	ж	0,36
0,85	50,5	59,4	33,9	32,3	ж	0,73
0,8	47,5	55,9	36	33,7	р. ж	0,88
0,75	44,5	52,4	38,5	35,3	р. ж	1,04
0,7	41,6	48,9	41,2	36,7	р. ж	1,47
0,65	38,6	45,4	44,4	37,6	р. ж	1,22
0,60	35,6	41,9	48,1	38,7	п-ж(ж.ф.)	1,28
0,55	32,7	38,4	52,4	40,1	п-ж(п.ф.)	1,3
0,5	29,7	34,9	57,7	41,3	п-ж(п.ф.)	1,28
0,4	23,8	28	72	44,0	г	1,15
0,3	17,8	20,9	95,3	48,2	г	0,88
8	9	10	11		12	
Плотность продукта, кг/м ³	Удельный объём, см ³ /моль	Масса сбрасываемого продукта, кг	Масса продукта, оставшегося в ёмкости при переходе через линию насыщения		Состояние продукта при переходе через линию насыщения	
64,6	31,2	5,2	54,6		ж	
55,5	36,3	3,3	47,2		ж	
51,7	39,0	3,6	43,9		ж	
48,0	42,0	3,7	40,8		ж	
42,9	42,0	5,1	36,5		п-ж	
40,3	50,0	4,5	34,3		п-ж	
35,4	57,0	5,6	30,1		п-ж	
31,0	65,0	6,3	26,4		п	
26,4	76,5	7,4	22,3		г	
18,3	110	5,7	18,1		г	
11,6	173	3,6	14,2		г	

Примечание: ж — жидкость; р. ж — расширившаяся жидкость; п-ж — пар-жидкость; г — газ; п-ж (ж.ф.) — пар-жидкость (жидкая фаза); п-ж (п.ф.) — пар-жидкость (паровая фаза).

В первоначальный момент времени осуществляют дренаж водорода из бака 1 с наибольшей массой водорода до достижения давления и других параметров фазового разделения водорода. Так, для первого бака параметры фазового разделения составят: давление — 0,7 МПа, температура — менее 33 К.

Для второго бака при 50 % его заправки имеем первоначальные параметры эвакуации водорода: давление — 26,5 МПа и температуру в ёмкости — 38,7 К. По своему состоянию водород получается в виде пара.

В процессе сброса водорода из ёмкости до достижения параметров фазового разделения (давление — 1,3 МПа, температура — более 33 К) имеем водород в баке в виде газа.

В дальнейшем осуществляют слив водорода из первого бака в сливную ёмкость 5 с последующей подачей водорода на теплообменник 4 и дренажную свечу [7,8]. По окончании слива водорода из этого бака производят дренаж газа из обоих баков на дренажный теплообменник 3 и дренажную свечу.

Результаты исследований процесса эвакуации водорода из ёмкости при начальных закритических параметрах (см. табл. 2) позволяют правильно оценить технические характеристики системы дренажей и слива водорода из ёмкости, обеспечить безопасные режимы в процессе эвакуации водорода.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования по изучению режимов эвакуации водорода, находящегося в ёмкостях системы энергоснабжения орбитального корабля при закритических параметрах, позволили разработать основополагающие принципы безопасного приёма водорода из баков в наземные стационарные и транспортные системы как на стартовом, так и посадочном комплексах орбитального корабля.

Созданные на ОАО «УралКриоМаш» с учётом этих принципов системы и агрегаты обеспечивают выполнение требований, предъявляемых к современному парку оборудования, используемого как в национальных космических программах, так и в национальных программах наших зарубежных партнёров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Многооразовый орбитальный корабль «Буран»/ Ю. П. Семенов, Г.Е. Лозино-Лозинский, В. А. Лапыгин, В. А. Тимченко и др. — М.: Машиностроение, 1995. — 448 с.
2. Многооразовая космическая система «Энергия-Буран». — М.: НПП «ОВМ-ЛУЧ», 2004. — 356 с.
3. Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С. П. Королева. Раздел 5. Долговременные орбитальные станции. Многооразовые космические системы. — М.: Моновополиграф, 1996. — 670 с.
4. Справочник по физико-техническим основам крио-

геники/ **М.П. Малков, И. Б. Данилов, А. Г. Зельдович, А. Б. Фрадков.** Под ред. **М. П. Малкова.** — М.: Энергоиздат, 1985. — 452 с.

5. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: Справ. изд./ **Д.Ю. Гамбург, В.П. Семёнов, Н.Ф. Дубовкин, Л.Н. Смирнова.** Под ред. **Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубовкина.** — М.: Химия, 1989. — 672 с.

6. **Зашляпин Р. А., Павленко С. Т., Черемных О. Я.**

Создание транспортных и стационарных средств заправки особо чистым водородом и кислородом баков системы энергопитания орбитального корабля «Буран»//Технические газы. — 2007. — № 5. — С. 14-20.

7. А.с. 236373. Способ эвакуации жидкого водорода из баков ЭХГ космического объекта/ МКИ В64с5/00.

8. А.с. 198862. Дренажное устройство ЭХГ космического объекта/ МКИ Н01М8/02.

**ПЯТЫЙ
МЕЖДУНАРОДНЫЙ
СЕМИНАР
CO₂-2013**



**СЕМИНАР ПРОВОДИТСЯ
УКРАИНСКОЙ АССОЦИАЦИЕЙ
ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ
ТЕХНИЧЕСКИХ ГАЗОВ "УА-СИГМА"**

ПРИ СОДЕЙСТВИИ:

-  - ПАО "ОДЕССКИЙ ПРИПОРТОВЫЙ ЗАВОД" (Г. ОДЕССА, УКРАИНА),
-  - ИНСТИТУТА ГАЗА НАН УКРАИНЫ (Г. КИЕВ, УКРАИНА),
-  - ПАО "СУМСКОЕ НПО ИМ. М.В. ФРУНЗЕ" (Г. СУМЫ, УКРАИНА),
-  - МЕЖДУНАРОДНОЙ ГРУППЫ "РЕДКИЕ ГАЗЫ" (Г. МОСКВА, РОССИЯ),
-  - ПКФ "КРИОПРОМ" ООО (Г. ОДЕССА, УКРАИНА),

ПОД ЭГИДОЙ:

-  - МИНИСТЕРСТВА ЭНЕРГЕТИКИ И УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ УКРАИНЫ,
-  - МИНИСТЕРСТВА ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ РФ,
-  - МЕЖДУНАРОДНОЙ АКАДЕМИИ ХОЛОДА
-  - ОДЕССКОЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ ПИЩЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ПРИ УЧАСТИИ:

-  - ГОСУДАРСТВЕННОЙ СЛУЖБЫ ГОРНОГО НАДЗОРА И ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ УКРАИНЫ,
-  - ФЕДЕРАЛЬНОЙ СЛУЖБЫ ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ И АТОМНОМУ НАДЗОРУ РФ



Секретариат оргкомитета:
65026, Украина, Одесса-26, а/я 188
Тел/факс: + 380 48 777 00 87
E-mail: uasigma@paco.net
Http://www.uasigma.odessa.ua

Генеральный информационный спонсор



**«ПОВЫШЕНИЕ
ЭФФЕКТИВНОСТИ
И ЭКОЛОГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ
ПРОИЗВОДСТВА
И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ДИОКСИДА УГЛЕРОДА»**

20-24 мая 2013 г.
г. Одесса








Место проведения семинара:
Гостиница «Виктория», расположенная
в знаменитом курортном районе
г. Одессы — Аркадии.

Условия проживания:
Одноместные номера со всеми
удобствами.

Информационная поддержка





