

УДК 621.59:04

И.И. ПЕТУХОВ, Ю.В. ШАХОВ*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина***СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КРИОГЕННЫХ СТЕНДОВЫХ КОМПЛЕКСОВ
НА БАЗЕ СТРУЙНОГО ОХЛАДИТЕЛЯ ЖИДКОСТИ**

Рассмотрены варианты модернизации наземной системы хранения, охлаждения и заправки жидким водородом блока Ц сверхтяжелой ракеты-носителя (РН) "Энергия" путем использования вместо традиционных теплообменных устройств струйного охладителя жидкости. Помимо значительного упрощения конструкции стенда и снижения его материалоемкости это позволяет реализовать замкнутую схему циркуляции жидкого водорода при термостатировании топливного бака РН. Таким образом обеспечивается не только экономия криокомпонента, но и повышается безопасность процессов заправки и термостатирования. Предложенные в данной статье технические решения могут быть использованы при создании новых и модернизации существующих системы хранения, охлаждения и заправки жидким водородом топливных баков ракет-носителей.

Ключевые слова: жидкий водород, ракетно-космическая техника, стендовые и стартовые комплексы, испарительное охлаждение, ванны-охладители, газовые эжекторы, струйный охладитель жидкости, безопасность.

Введение

Задача создания в последней четверти XX века ракет-носителей тяжелого и сверхтяжелого класса определила необходимость использования высокоэффективных компонентов ракетного топлива – жидких кислорода и водорода. В связи с этим возникло новое направление криогенной техники, связанное с вопросами крупнотоннажного производства, накопления и хранения криокомпонентов, заправки и термостатирования стендовых и бортовых баков. Работой по данной тематике активно занимались в Германии, Франции, Японии, однако ведущими разработчиками технологий по понятной причине стали США и СССР [1, 2]. Разработанные в США технические решения были использованы в программах "Аполлон" и Space Shuttle.

В СССР результатом работ в данном направлении стало создание на космодроме Байконур двух стартовых комплексов, в состав которых входили "Криогенные центры" для заправки ракетно-космической системы "Энергия-Буран" жидкими кислородом и водородом в переохлажденном состоянии. Основной при их разработке была концепция безопасности и надежности, реализованная за счет использования только проверенных технических решений и устройств [1]. Её правомерность подтверждена успешным стартом ракетно-космической системы "Энергия-Буран" в ноябре 1988 года.

Однако с точки зрения эффективности схема криогенных комплексов не является оптимальной. И касается это не только выбора вытеснительной сис-

темы подачи ввиду отсутствия на момент начала разработки надёжных криогенных насосов нужной производительности [1, 3]. Нуждаются в рассмотрении и варианты с альтернативными устройствами для испарительного охлаждения криогенных компонентов. В данной работе это выполнено для случая использования в составе водородной системы 17Г24 струйного охладителя жидкости [4].

1. Система заправки 17Г24

Система заправки жидким водородом (ЖВ) 17Г24 (рис. 1) [1 – 3] позволяет заправить в баки ракеты-носителя (РН) 104 т охлажденного до 17К ЖВ с расходом до 100 т/ч и далее термостатировать его на уровне 17К при расходе 70 т/ч. Хранилище из четырех шаровых резервуаров 1 с рабочим давлением до 1,0 МПа вмещает 372 т жидкого водорода при температуре 21,8К.

Применяется вытеснительная система подачи ЖВ из хранилища и его охлаждение в кожухотрубных теплообменниках 4 и 5, называемых ваннами-охладителями. В качестве охлаждающей среды используется кипящий в вакуумируемом межтрубном пространстве водород. Холодопроизводительность системы составляет 1000 кВт при заправке и 730 кВт при термостатировании. С целью уменьшения потерь дорогостоящего компонента реализована полужамкнутая схема циркуляции ЖВ с использованием струйного жидкостного насоса 6.

Перед заправкой воздушная среда в баках РН и трубопроводах заменялась на азотную, а затем на

водородную с концентрацией кислорода в водороде не выше $2 \cdot 10^{-1}\%$ (об.).

После захлаживания системы заправка и термостатирование РН производится следующим образом [3]. ЖВ из резервуара 1 с начальной температу-

рой 21,8К и давлением 1,0 МПа подается в теплообменник 3 а затем 4, охлаждается и далее направляется в активное сопло струйного насоса 6. В режиме термостатирования массовый расход этого потока около 20 т/ч.

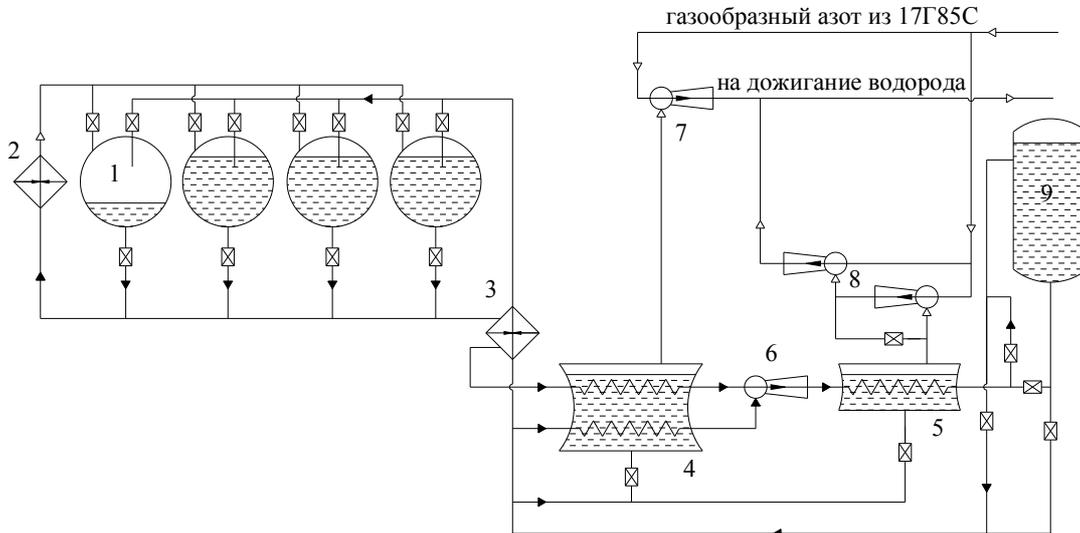


Рис. 1. Принципиальная схема системы 17Г24 заправки и термостатирования водородного бака РН "Энергия": 1 – резервуар РС-1400/1,0; 2 – теплообменник-испаритель системы наддува резервуаров; 3 – рекуперативный теплообменник; 4, 5 – теплообменник-охладитель; 6 – струйный насос; 7 – одноступенчатый эжектор; 8 – двухступенчатый эжектор; 9 – топливный бак РН "Энергия" (блок Ц)

Струйный насос 6 обеспечивает циркуляцию ЖВ в контуре, включающем бак 9 и трубное пространство теплообменников-испарителей 4 и 5. Жидкий водород с расходом около 70 т/час, отбираемый из верхней части топливного бака 9, используется следующим образом. Основная часть (около 50 т/ч) охлаждается в теплообменнике 4 и направляется в пассивное сопло струйного насоса 6. Полученное в струйном насосе 6 приращение давления позволяет компенсировать гидравлические потери потока в теплообменнике-охладителе 5 и обеспечить возврат охлажденного ЖВ в нижнюю часть топливного бака 9.

Оставшаяся часть ЖВ (около 20 т/ч) расходуется на подпитку межтрубного пространства теплообменников-охладителей 4 и 5 с кипящим под вакуумом водородом, а излишек возвращается в один из резервуаров РС-1400/1,0 с насыщенным ЖВ (давление около 0,16 МПа) через рекуперативный теплообменник 3. Здесь за счет регенерации теплоты обеспечивается охлаждение потока из резервуара 1.

В режиме заправки температура ЖВ после теплообменника 5 около 18,5К. При термостатировании ЖВ забирается из бака 9 при температуре 19К, а после теплообменника 5 имеет температуру 16К. Давление в баке 9 поддерживается на уровне 0,26 МПа.

Необходимое разрежение в межтрубном пространстве теплообменников-охладителей 4 и 5 обес-

печивают одноступенчатый 7 и двухступенчатый 8 сверхзвуковые эжекторы. В качестве активного потока в эжекторах используется газообразный азот из системы 17Г85С с давлением 1,0 МПа, температурой 323 К и общим расходом около 120 т/ч. После эжекторов азотно-водородная смесь направляется по трубопроводам Ду600 на площадку дожига, находящуюся на расстоянии 300 м.

Существенным недостатком системы 17Г24 является высокая материалоемкость и связанные с этим значительные потери жидких азота и водорода на захлаживание при подготовке к работе. Применение вытеснительной системы подачи с давлением до 1,0 МПа определяет использование трубопроводов и резервуаров с увеличенной толщиной стенок и соответствующей арматуры. Например, для изготовления резервуаров РС-1400/1,0 применена листовая нержавеющая сталь толщиной 22 мм.

Масса теплообменников-охладителей 4 и 5 в пересчете на единицу массового расхода ЖВ составляет 2000 кг [5]. Связано это как с пониженным давлением внутри кожуха, так и с малым температурным напором.

Требование снижения гидравлических потерь при подаче ЖВ из резервуара 1 в бак 9 определило использование трубопроводов с Ду200 на участке между резервуарами и теплообменником-охладите-

лем 4 и трубопроводов с Ду400 на всех остальных участках.

Значительная длина магистралей системы 17Г24 определяется требованиями безопасности [6, 7], предъявляемыми к водородным системам. Так, например, расстояние от резервуаров для хранения криогенных жидкостей до линии стартовых столов составило порядка 800 м, а теплообменники-охладители 4 и 5 с суммарным объемом 300 м³ размещались в подземном сооружении арочного типа в 100 м от стартового стола. С точки зрения обеспечения безопасности охладители следовало бы максимально удалить от заправляемой РН, однако в этом случае потери хладоресурса становятся недопустимыми.

2. Варианты модернизации системы 17Г24 с использованием струйного охладителя жидкости

При модернизации комплекса 17Г24 недостатки, связанные с его большой металлоемкостью, могут быть устранены за счет использования струйного охладителя жидкости (СОЖ) [4, 8] в качестве малогабаритного теплообменного устройства, а также отказа от вытеснительной системы подачи. На начальном этапе создания комплекса от насосной системы подачи отказались еще на стадии проработки технического задания по причине отсутствия насосов нужной производительности для ЖВ. В настоящий момент, когда накоплен опыт создания и отработки высоконапорных криогенных насосов и име-

ется необходимая экспериментальная база, отказ от использования в составе стелов криогенных ЦБН в пользу повышения надежности можно считать необоснованным. Основная экономия будет достигнута за счет исключения из состава системы теплообменников-охладителей 4 и 5, рекуперативного теплообменника 3 и магистрали возврата ЖВ в резервуары 1. Незначительное по сравнению с внутренним объемом теплообменников-охладителей 4 и 5 количество ЖВ, одновременно находящегося в СОЖ, позволяет приблизить его к топливному баку 9, что также положительно сказывается на температуре заправляемого ЖВ и сократит длину захлаждаемых криогенных магистралей.

Для использования на режиме термостатирования системы 17Г24 был спроектирован СОЖ для следующих номинальных параметров рабочего процесса: давление на входе 0,5 МПа, температура на входе 20 К, расход ЖВ на входе 25 кг/с, температура охлажденного ЖВ 16 К. Габариты СОЖ без теплоизоляции 0,85x0,42x0,32 м, примерная масса сварной конструкции из листовой нержавеющей стали 12Х18Н9Т – 12 кг. Малый объем находящегося в устройстве ЖВ повышает безопасность системы в целом.

Принципиальная схема модернизированной с использованием СОЖ системы заправки и термостатирования охлажденным ЖВ РН "Энергия" на базе системы 17Г24 с вытеснительной системой подачи приведена на рис. 2, с насосной системой подачи – на рис. 3, с комбинированной – на рис. 4.

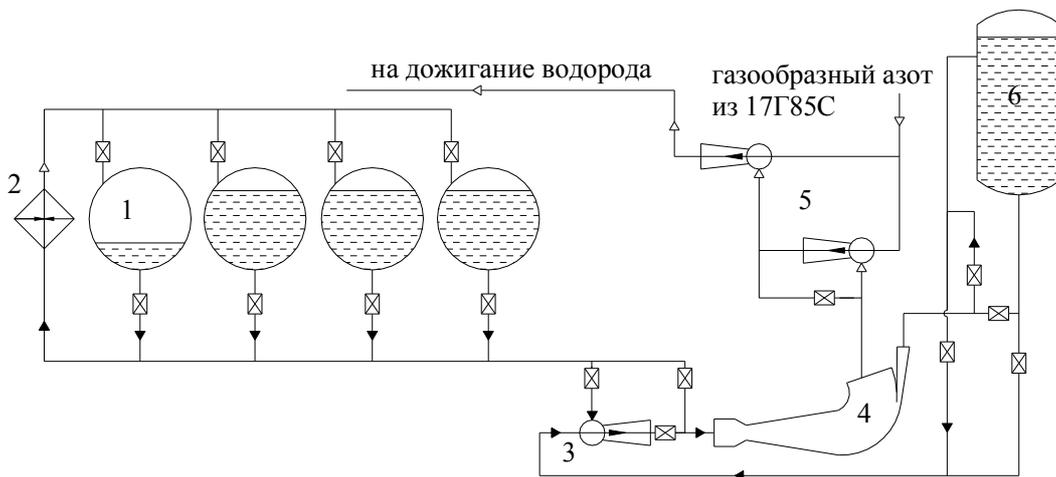


Рис. 2. Принципиальная схема модернизированной безнасосной системы заправки и термостатирования охлажденным водородом РН "Энергия" на базе системы 17Г24: 1 – резервуар РС-1400/1,0; 2 – теплообменник-испаритель системы наддува резервуаров; 3 – струйный насос; 4 – СОЖ; 5 – двухступенчатый эжектор; 6 – топливный бак РН "Энергия" (блок Ц)

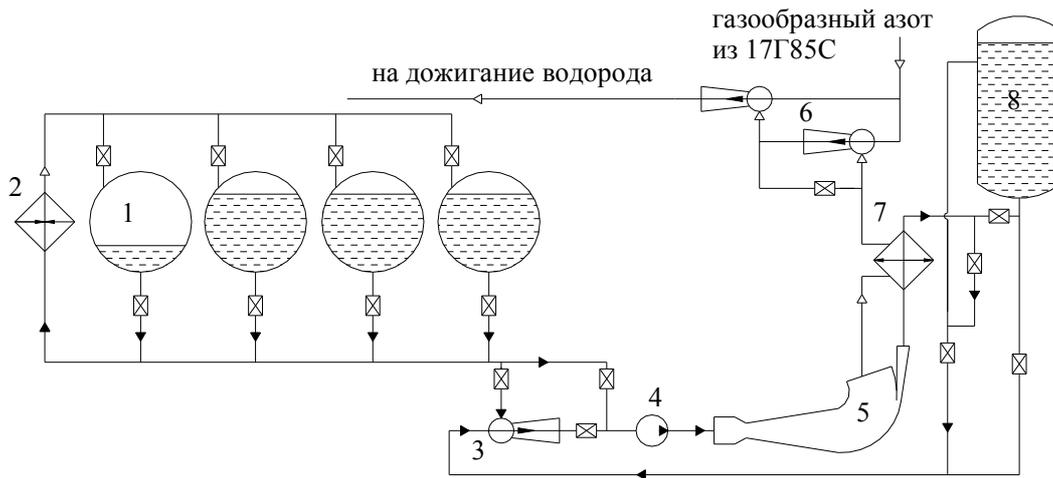


Рис. 3. Схема модернизированной насосной системы заправки и термостатирования охлажденным водородом РН "Энергия" на базе системы 17Г24:

- 1 – резервуар РС-1400/1,0; 2 – теплообменник-испаритель системы наддува резервуаров;
- 3 – струйный насос; 4 – насос; 5 – СОЖ; 6 – двухступенчатый эжектор; 7 – рекуперативный теплообменник системы утилизации хладоресурса отходящих паров водорода;
- 8 – топливный бак РН "Энергия" (блок Ц)

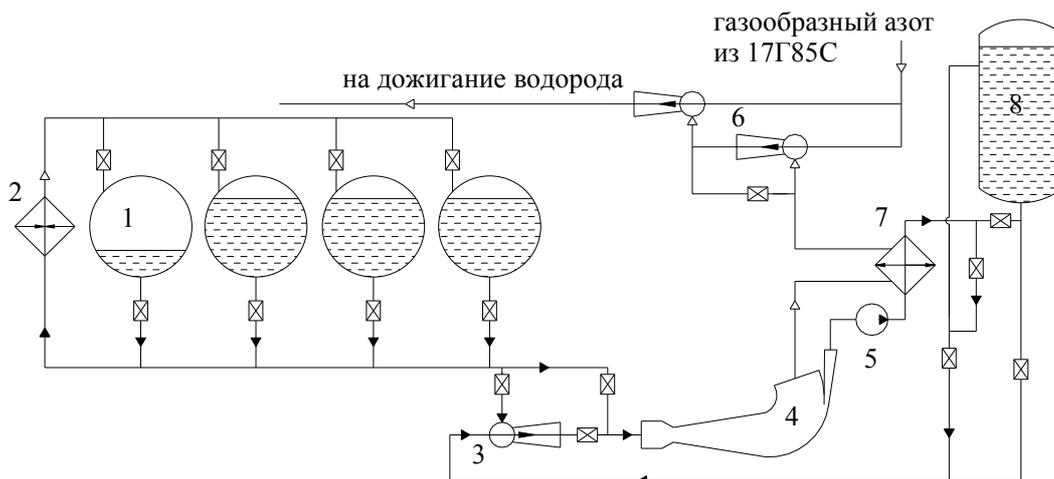


Рис. 4. Принципиальная схема модернизированной вытеснительно-насосной системы заправки и термостатирования охлажденным водородом РН "Энергия" на базе системы 17Г24:

- 1 – резервуар РС-1400/1,0; 2 – теплообменник-испаритель системы наддува резервуаров;
- 3 – струйный насос; 4 – СОЖ; 5 – насос; 6 – двухступенчатый эжектор;
- 7 – рекуперативный теплообменник системы утилизации хладоресурса отходящих паров водорода; 8 – топливный бак РН "Энергия" (блок Ц)

Безнасосная система заправки и термостатирования (рис. 2) является самой простой, однако с точки зрения регулирования более предпочтительны схемы с центробежным преднасосом (рис. 3) или с подкачивающим центробежным насосом за диффузором СОЖ (рис. 4).

Насосная схема подачи может являться также основой для разработки новых систем заправки и термостатирования, поскольку позволяет отказаться от использования толстостенных конструкций.

Дополнительный эффект может быть получен за счет установки теплообменника на трубопроводе

подачи подпитывающего потока ЖВ (поз.7 рис. 3 и 4), использующего хладоресурс пара, отводимого за срезом сопла СОЖ.

Результаты расчета системы заправки и термостатирования на базе СОЖ приведены на графиках рис. 5. Здесь показаны зависимости давления на срезе сопла СОЖ P_2 , обеспечивающего необходимую степень захлаживания ЖВ, от температуры подачи охлаждаемого ЖВ из внешнего бака при различных значениях отводимой тепловой мощности. Для удобства показана также температура насыщения $T_s(P_2)$.

Расход подпитывающего ЖВ зависит, главным образом, от внешних теплопритоков. При температуре подачи ЖВ 19 К для теплопритоков 300 кВт он составляет около 2,32 кг/с, для 700 кВт – около 3,05 кг/с. Некоторая зависимость подпитывающего расхода от температуры в баке при варьировании внешней тепловой мощности объясняется фиксированной геометрией СОЖ. Устранить эту зависимость можно за счет регулирования проточной части СОЖ.

Расчет характеристик систем термостатирования со струйным охладителем жидкости и подкачивающим центробежным насосом (ЦБН) за диффузором СОЖ показали, что они аналогичны графикам рис. 5, но реализуются в более узком диапазоне отводимых тепловых мощностей. Связано это с ограничением по расходам, которое можно снять при регулировании сопла СОЖ.

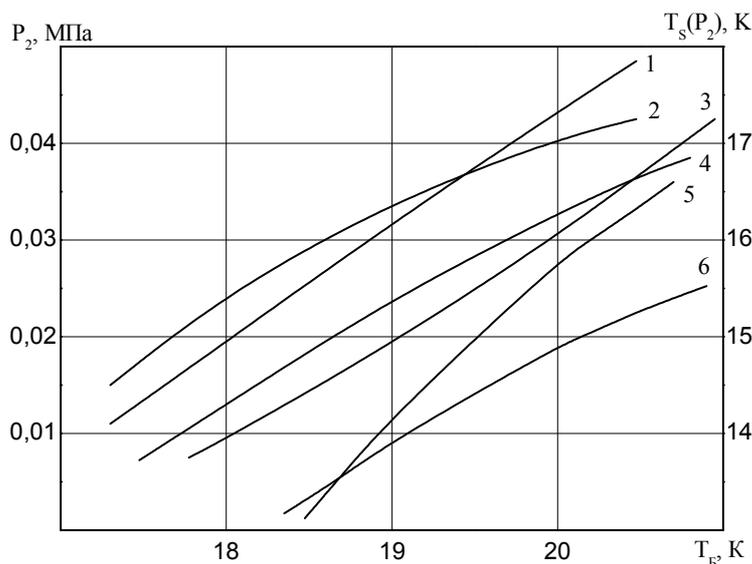


Рис. 5. Характеристики схемы термостатирования с СОЖ и центробежным преднасосом: 1, 3, 5 – P_2 ; 2, 4, 6 – $T_S(P_2)$; 1, 2 – $N_T = 300$ кВт; 3, 4 – $N_T = 500$ кВт; 5, 6 – $N_T = 700$ кВт

Заключение

Водородная криогенная система 17Г24 заправки и термостатирования топливных баков РН является достаточно надежной и на практике подтвердила правомерность заложенных в ней технических решений. Однако нынешний уровень развития криогенной техники позволяет улучшить показатели подобных систем. Предложенные схемы заправки и термостатирования топливных баков криогенными компонентами ракетного топлива позволяют получить значительный выигрыш как по массогабаритным, так и по технико-экономическим показателям. В большой мере это достигается за счет использования струйного охладителя жидкости, в котором процесс испарительного охлаждения сопровождается производством паром работы по повышению полного давления жидкости. Наряду с экономией конструкционных материалов и топлива в схемах реализуется возможность быстрого изменения температурного режима заправки и термостатирования. Поэтому является перспективным использование данных технических решений при создании новых и модернизации криогенной инфраструктуры существующих стартовых комплексов ракетно-космической техники.

Литература

1. Криштал В.Н. Криогенные заправочные системы многоэтапного космического комплекса "Энергия-Буран" / В.Н. Криштал, А.Б. Ленский // *Технические газы*. – 2008. – № 6. – С. 13-20.
2. Создание и совершенствование криогенных заправочных и стендовых комплексов ракетно-космической техники / А.М. Домашенко, В.Н. Криштал, М.В. Красовицкий, Ю.В. Красовицкий, А.Г. Лапшин // *Технические газы*. – 2009. – № 1. – С. 27-33.
3. Домашенко А.М. Принципы построения, проблемы и опыт создания криогенных заправочных комплексов для ракетно-космической техники / А.М. Домашенко, В.Н. Криштал // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2007. – № 9 (53). – С. 16-19.
4. Струйная система утилизации жидкого водорода при испытаниях насоса ГТД / И.И. Петухов, Ю.В. Шахов, В.Н. Сырый, Ю.Е. Давыдов, И.П. Кошицын // *Прогресс. Качество. Технология: тр. Второго конгр. двигателестроителей Украины с иностр. участием (22 – 25 сентября 1997 г., Рыбачье)*. – К. – Х. – Рыбачье, 1997. – С. 364-369.
5. Архаров А.М. Криогенные заправочные системы стартовых ракетно-космических комплексов / А.М. Архаров, И.Д. Кулис // М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 256 с.

6. Галеев А.Г. Об опыте отработки ракетных двигателей и энергетических установок на водородном топливе и проблемы обеспечения их безопасности / А.Г.Галеев // *Альтернативная энергетика и экология*. - 2007. - № 7 (51). - С. 8-21.

7. Галеев А.Г. Отработка ракетных двигателей и энергетических установок на водородном топливе и проблемы обеспечения их безопасности /

А.Г.Галеев // *Альтернативная энергетика и экология*. - 2008. - № 3 (59). - С. 29-35.

8. Петухов И.И. Расчет статических характеристик струйного охладителя жидкости / И.И.Петухов, Ю.В.Шахов // *Авиационно-космическая техника и технология*. -2010. - № 7 (74). - С. 71-76.

Поступила в редакцию 30.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.А. Горбенко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

УДОСКОНАЛЕННЯ КРИОГЕННИХ СТЕНДОВИХ КОМПЛЕКСІВ НА БАЗІ СТРУМИННИХ ОХОЛОДЖУВАЧІВ РІДИНИ

І.І. Петухов, Ю.В.Шахов

Розглянуто варіанти модернізації наземної системи зберігання, охолодження і заправки рідким воднем блоку Ц надважкої ракети-носія (РН) "Енергія" шляхом використання замість традиційних теплообмінних пристроїв струминного охолоджувача рідини. Крім значного спрощення конструкції стенду та зниження його матеріаломісткості це дозволяє реалізувати замкнуту схему циркуляції рідкого водню при термостатуванні паливного бака РН. Таким чином забезпечується не тільки економія кріокомпоненту, але і підвищення безпеки процесів заправки і термостатування. Запропоновані в даній статті технічні рішення можуть бути використані при створенні нових та модернізації існуючих системи зберігання, охолодження і заправки рідким воднем паливних баків ракет-носіїв.

Ключові слова: рідкий водень, ракетно-космічна техніка, стендові та стартові комплекси, випарне охолодження, ванни-охолоджувачі, газові ежектори, струминний охолоджувач рідини, безпека.

LIQUID JET COOLER BASED IMPROVED CRYOGENIC BENCH COMPLEX

I.I. Petukhov, Y.V. Shakhov

Variants of modernization of the liquid hydrogen ground-based storage, cooling and refueling system of the superheavy Energy launch vehicle Block C by liquid jet cooler replacement of the traditional heat exchangers were considered. In addition to large stand design simplification and materials consumption reduction it allow to realized the closed circuit circulation of the liquid hydrogen fuel at the launch vehicle fuel tank thermostating. This provides both cryogenic fuel component saving and the fueling and thermostating processes safety enhancement. Proposed in this article technical solutions can be used for development of new and modernization of existing systems for storage, cooling and fueling operation for liquid hydrogen launch vehicle fuel tank.

Key words: liquid hydrogen, rocket and space technology, bench and starting systems, evaporative cooling, cooling vessel, gas ejectors, liquid jet cooler, safety.

Петухов Ілья Іванович – канд. техн. наук, доцент кафедри аэрокосмической теплотехники Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ilya@fsigma.kharkov.ua.

Шахов Юрий Васильевич – ст. научн. сотр. кафедры аэрокосмической теплотехники Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: k205@mail.ru.