

УДК 621.59.536.48(035.5)

Д. И. Гудыменко, С. А. Куда, канд. техн. наук А. И. Логвиненко,
канд. техн. наук В. И. Порубаймех

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОЙ КРИОГЕННОЙ ЖИДКОСТИ

Описан разработанный, запатентованный и апробированный способ получения переохлажденной криогенной среды, необходимой для проведения испытаний по подтверждению работоспособности агрегатов автоматики и систем ракетно-космической техники.

Описано розроблений, запатентований та апробований спосіб отримання переохолодженого криогенного середовища, необхідного для проведення випробувань щодо підтвердження працездатності агрегатів автоматики й систем ракетно-космічної техніки.

A developed, patented and proven method of producing supercooled cryogenic medium, required for testing for functional demonstration of space rocket automatic units and systems, is described herein.

В настоящее время в ракетно-космической технике все шире применяется жидкий или переохлажденный кислород в паре с керосином или другими компонентами. Примерами их применения являются ракеты-носители «Сатурн», «Антарес», «Зенит» и др. Одним из проблемных вопросов при этом является разработка и экспериментальная проверка работоспособности элементов автоматики и систем в переохлажденной криогенной среде. Например, при опорожнении баллонов системы наддува, погруженных в бак с жидким кислородом, температура газа наддува (гелия) может достигать минус $\sim 220^{\circ}\text{C}$ и ниже при его подаче через ряд электропневмоклапанов (ЭПК) и обратные клапаны, арматуру и соединительные элементы. Поэтому при разработке РН должна решаться одна из проблем по созданию соответствующей экспериментальной базы.

Жидкий кислород представляет собой бесцветную легкоподвижную жидкость, не имеющую запаха и вкуса. Его плотность составляет $1,14 \text{ кг/м}^3$. При охлаждении от точки кипения минус 182°C до температуры минус 219°C кислород переходит в твердое состояние – кристаллы голубого цвета [1].

Жидкий кислород получают разделением воздуха методом глубокого охлаждения [2].

Атмосферный воздух приблизительно можно рассматривать как смесь азота и кислорода (аргона и редких газов в нем содержится менее 1%). Воздух переводят в жидкое состояние по одному из холодильных циклов, а затем разделяют его на составные части. Если жидкий воздух постепенно испарять, то сначала испаряется преимущественно азот и жидкость обогащается кислородом. Повторяя процесс испарения и конденсации многократно, достигается желаемая степень разделения воздуха на азот, и кислород требуемых концентраций. Процесс многократного испарения жидкости и конденсации его паров для разделения на составные части называется ректификацией.

В современных воздуходелительных установках [2] можно выделить три основных узла: сжатия, охлаждения и ректификации. В узле сжатия воздух сжимается компрессором, проходит через систему охлаждения, влагоотделители и фильтры. Узел охлаждения состоит из теплообменных аппаратов, аппаратов очистки и осушки воздуха, детандерных агрегатов. В узле

ректификации, включающем в себя ректификационные колонны, конденсаторы, переохладители, жидкостные насосы и жидкофазные адсорберы, происходит разделение воздуха на компоненты.

Следует отметить, что, как установлено экспериментально [3], процесс испарения жидкости в разреженной среде зависит от темпа сброса давления из емкости $\left(\frac{dP}{dt}, \frac{\text{атм}}{\text{мин}}\right)$. Так, при $\frac{dP}{dt} \leq 0,2-0,3$ происходит стационарное испарение с выравниванием температуры по глубине за счет теплопроводности; при $\frac{dP}{dt} = 0,3-3$ наблюдается испарение с периодическим вскипанием и изменением профиля температуры; $\frac{dP}{dt} \gg 3$ – интенсивное вскипание взрывного характера по всему объему емкости. При уменьшении давления меняется температура кипения и характер испарения. Наблюдается четкая граница, разделяющая слой, в котором пузырьки возникают и растут, и нижний некипящий слой. Уменьшается и критический тепловой поток, резко падает количество активных центров, а размеры пузырьков намного увеличиваются. Рост пузырьков носит взрывной характер с интенсивным шумом. Температура поверхности жидкости изменяется импульсно. Инерционность вскипания дегазированных компонентов составляет 0,4–0,5 с для АТ и 0,6–0,8 с для НДМГ. Она характеризует способность жидкости пребывать в перегретом состоянии. Поведение кипящей жидкости при сбросе давления характеризуется образованием следующих областей в емкости:

- верхней (область пенообразования, высота которой непрерывно меняется даже при постоянном давлении в емкости);
- средней (слой интенсивного кипения);
- нижней (область образования большего количества отдельных пузырьков различного размера на внутренней поверхности емкости с последующим их ростом и отрывом от поверхности).

В технике известны различные способы и агрегаты для сжижения криогенных газов с применением физических эффектов, хладагентов, теплообменников и различных устройств [1, 2]. Однако теплообменники, сложные и громоздкие, требуют относительно много рабочего времени и материальных затрат.

Для проведения испытаний авторами разработан простой и эффективный способ получения переохлажденной криогенной среды с учетом особенностей поведения жидкости в разреженной среде [3, 4]. Принцип его работы состоит в использовании эффекта самоиспарения криогенной жидкости в относительно разреженной среде (без подвода тепла).

Установка (рис. 1), реализующая способ, состоит из цистерны 15 для жидкого кислорода, азота или аргона, предназначенной для заправки сосуда 3 вышеуказанными криогенными продуктами, а также для длительного их хранения и транспортирования, эжектора 11, работающего на сжатом газе и используемого для вакуумирования полостей над жидким криогенным продуктом до требуемого остаточного давления, аппаратно-программного комплекса (АПК) 12, который представляет собой электронную систему измерения, регистрации, сбора, обработки и выдачи результатов, электропневмоклапанов 10 – агрегатов пневмосистем с электроприводом для автоматического дистанционного открытия-закрытия магистралей подвода газа к эжектору и вакуумирования полости над криогенным жидким продуктом сосуда 3, первичных преобразователей вакуума 9 и температуры 13, которые представляют собой датчики, преобразующие сигналы и выдающие их на АПК для регистрации, обработки и работы системы по алгоритму.

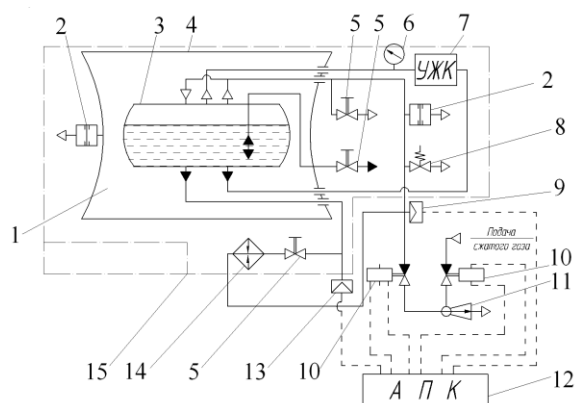


Рис. 1. Схема установки для получения переохлажденных криогенных продуктов:

1 – отвакуумированное пространство, заполненное изоляционным материалом; 2 – предохранительные мембраны; 3 – сосуд; 4 – кожух; 5 – вентили; 6 – манометр; 7 – указатель жидкого криогенного продукта; 8 – предохранительный клапан; 9 – первичный преобразователь вакуума; 10 – ЭПК; 11 – эжектор; 12 – АПК; 13 – первичный преобразователь температуры; 14 – испаритель; 15 – цистерна для жидкого кислорода, азота или аргона

Все операции на установке выполняются в следующей последовательности (рис. 2):

- 1 – включение системы управления;
- 2 – включение регистрации и контроля параметров;
- 3 – проверка температуры криогенного продукта;
- 4 – выключение регистрации и контроля параметров при достижении необходимой температуры;
- 5 – остановка системы (выключение системы управления);
- 6 – открытие магистралей подачи газа на эжектор и вакуумирование полости над криогенным продуктом;
- 7 – вакуумирование на $\Delta P=0,1$ ата;
- 8 – закрытие магистралей подачи газа на эжектор и вакуумирование полости над криогенным продуктом;
- 9 – выдержка криогенных продуктов в течение 15 мин.

Далее проводится повторение операций пп. 6, 7, 8 до момента выполнения условия пп. 3 с последующим завершением операций пп. 4 и 5.

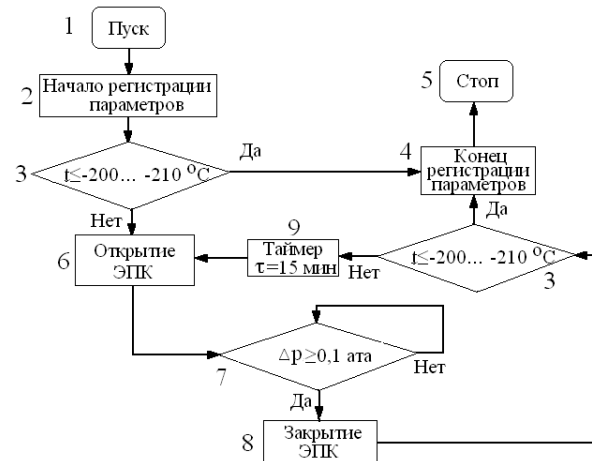


Рис. 2. Блок-схема работы экспериментальной установки

Сам способ осуществляется следующим образом.

Герметичный сосуд 3 заполняют криогенным продуктом (кислородом с $t=-183^{\circ}\text{C}$ или азотом с $t=-196^{\circ}\text{C}$) приблизительно до 90% его объема, создавая тем самым газовую подушку. В зависимости от необходимости получения заданной температуры ($-200...-210^{\circ}\text{C}$) переохлажденного криогенного продукта установка работает по соответствующему алгоритму (режиму) системы контроля и управления (блок АПК, рис. 1).

По команде «Пуск» от АПК 12 подается команда на открытие двух ЭПК 10 (рис. 1). Газовая подушка резервуара 3 сообщается с вакуумным насосом (эжектором 11), и в ней уменьшается давление, например, на 0,1 атм. (Это значение установлено экспериментальным путем). От первичных преобразователей вакуума 9 и температуры 13 на АПК 12 непрерывно подается информация по этим параметрам. АПК анализирует эту информацию, и согласно принятому алгоритму работы при вакуумировании через каждое значение остаточного давления 0,1 атм проводятся разъединение газовой подушки с эжектором 11 (путем закрытия ЭПК 10) и выдержка в течение 10...15 мин. Эта пауза необходима для выравнивания и стабилизации температуры, измеряемой датчиком 13, расположенным в нижней ча-

сти сосуда 3. Ее продолжительность установлена экспериментальным путем.

Эти операции повторяют с пошаговым уменьшением давления на 0,1 атм в газовой подушке. Градиент спада давления в газовой подушке изменяют в диапазоне, например, от 0,002 до 0,04 атм/мин.

Процесс вакуумирования проводится до получения заданной температуры, после чего по команде «Останов» ЭПК 10 закрываются, вакуумирование эжектором 11 прекращается.

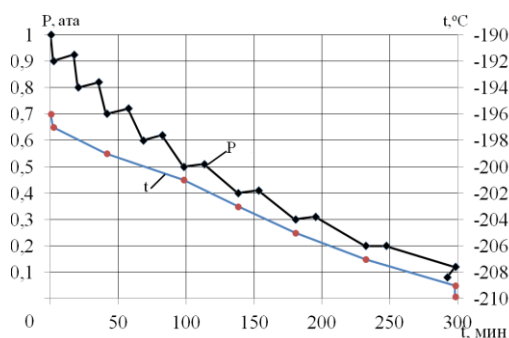


Рис. 3. Изменения давления P и температуры t в криогенной емкости при вакуумировании и выдержке

Полученный переохлажденный криогенный продукт через вентиль 5, который расположен в нижней части сосуда 3, поступает на испаритель 14, представляющий собой теплообменник, в котором испаряется в виде паров, дальше проходит по трубопроводу в верхнюю часть сосуда 3 и создает в нем давление $\leq 2,5$ кг/см².

Для слива жидкого переохлажденного продукта к вентилю 5 подсоединяют гибкий шланг, через который сливается полученный продукт для дальнейшего использования.

Анализ полученных экспериментальных данных (рис. 3) показал, что в каждый момент времени испытания температура криогенного продукта (жидкого азота) практически соответствует давлению его насыщенных паров. При этом массовая доля, потраченная на процесс его самоиспарения (без подвода тепла) и определяемая

по формуле теплового баланса [3]

$$\frac{m_s}{m} = \frac{c_p \Delta t}{r + 0,7c_p \Delta t - c_p t_k},$$

составляет 3...5 %. Здесь m , m_s – соответственно начальная масса и масса испаренного заправляемого криогенного продукта; c_p , r – удельная теплоемкость и удельная теплота испарения продукта; Δt – значение температурного захлаживания продукта (относительно температуры его кипения); t_k – температура захлажденного продукта.

Исследования показали, что использование предложенного способа обеспечивает понижение температуры криогенного продукта на 15...20°C. Это позволяет проводить экспериментальную отработку агрегатов автоматики и систем ракетно-космической техники с применением переохлажденных криогенных продуктов, что содействует повышению надежности этих объектов.

Список использованной литературы

1. Справочник по физико-техническим основам криогеники / Под ред. М. П. Малкова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 431 с.
2. Беляков В. П. Криогенная техника и технология. – М.: Энергия, 1982. – 271 с.
3. Логвиненко А. И. Особенности пассивации отработавших космических ступеней РН // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст., 2015. – Вып. 3. – Днепропетровск: ГП «КБ «Южное». – С. 60-64.
4. Пат. 110307, Украина, МПК F25J 1/00. Способ получения переохлажденной криогенной жидкости / Д. И. Гудыменко, С. А. Куда, А. И. Логвиненко, В. И. Порубаймех (Украина); заявитель и патентообладатель ГКБ «Южное». – №201601457; заявл. 18.02.2016; опубл. 10.10.2016, Бюл. №19.

Статья поступила 22.05.2017