

УДК 621.56/.59

Имитационные испытания баллона с криогенной заправкой для дроссельной системы охлаждения и ее сравнительные характеристики

А.И. Довгялло, С.О. Некрасова, Д.В. Сармин, Д.А. Угланов

Представлены результаты экспериментальных исследований процессов в баллоне с криогенной заправкой для дроссельной системы охлаждения, а также проведён сравнительный анализ ее характеристик с параметрами дроссельной системы охлаждения на основе баллона высокого давления.

PACS:06.20.—г

Ключевые слова: ИК-приёмник, дроссель, система охлаждения, баллон с криогенной заправкой, экспериментальная установка.

Введение

В настоящее время на борту летательных аппаратов (ЛА) используется широкий ряд оптико-электронных устройств и систем, в состав которых входят ИК-приёмники излучения, требующие для своей нормальной работы охлаждения криогенного уровня температур [1]. Система охлаждения может иметь различные параметры по массе, потребляемой мощности, габаритам, надёжности, холодопроизводительности и температуре термостатирования.

Бортовые системы охлаждения ИК-приёмников можно разделить на два основных типа:

- термомеханические системы охлаждения с замкнутым циклом;
- дроссельные системы охлаждения с разомкнутым циклом, использующие, например, газ высокого давления.

Целью данной работы является рассмотрение возможности совершенствования дроссельной системы охлаждения за счёт использования в их составе баллона с криогенной заправкой [2].

Дроссельная система охлаждения

Наиболее простой и наименее дорогостоящей системой охлаждения разомкнутого цикла является система охлаждения, основанная на эффекте

Джоуля — Томпсона и использующая газ высокого давления от 20 до 60 МПа.

Использование инертных газов и смеси даёт возможность обеспечить температурный уровень охлаждения в диапазоне температур 50—80 К при суммарной мощности тепловыделения объекта от 0,1 до 10 Вт.

Одним из основных элементов дроссельной системы охлаждения является баллон для хранения и выдачи продукта.

В рассматриваемом случае предлагается в качестве емкости для дроссельной системы охлаждения использовать баллон с криогенной заправкой (БКЗ), основанный на идее патента «Топливный баллон», запатентованный Самарским государственным аэрокосмическим университетом [2].

Для определения эффективности использования БКЗ в составе дроссельной системы охлаждения рассмотрены две системы (рис. 1). В первом случае в дроссельной системе используется стандартный баллон, заправленный азотом с исходным давлением $p_0 = 19,6$ МПа и температурой $T_0 = 300$ К. Во втором случае в составе дроссельной системы предлагается использовать баллон с криогенной заправкой. Термодинамические расчёты показали, что в случае заправки такого баллона криопродуктом (азотом) через некоторое время наступает равновесное состояние системы баллон—рабочее тело. Температура достигает величины $T_0 = 130—135$ К при давлении $p_0 = 4$ МПа. На рис. 1, а и 1, б представлены схемы и циклы работы для двух вариантов дроссельной системы охлаждения, причем в обеих сравниваемых схемах начальная масса рабочего тела одинакова.

Часто ограничением для применения подобных систем является масса баллона, что обусловлено высоким рабочим давлением газообразного хладагента. Поэтому используются жидкостные системы охлаждения, имеющие свои преимуще-

Довгялло Александр Иванович, профессор.
Некрасова Светлана Олеговна, инженер.
Сармин Дмитрий Викторович, аспирант.
Угланов Дмитрий Александрович, доцент.
Самарский государственный аэрокосмический университет им С.П.Королёва
Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.
Тел: (846) 335-18-12.
E-mail: d.a.i@mail.ru; sarmin.d.v@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 августа 2012 г.

© Довгялло А.И., Некрасова С.О., Сармин Д.В., Угланов Д.А., 2013

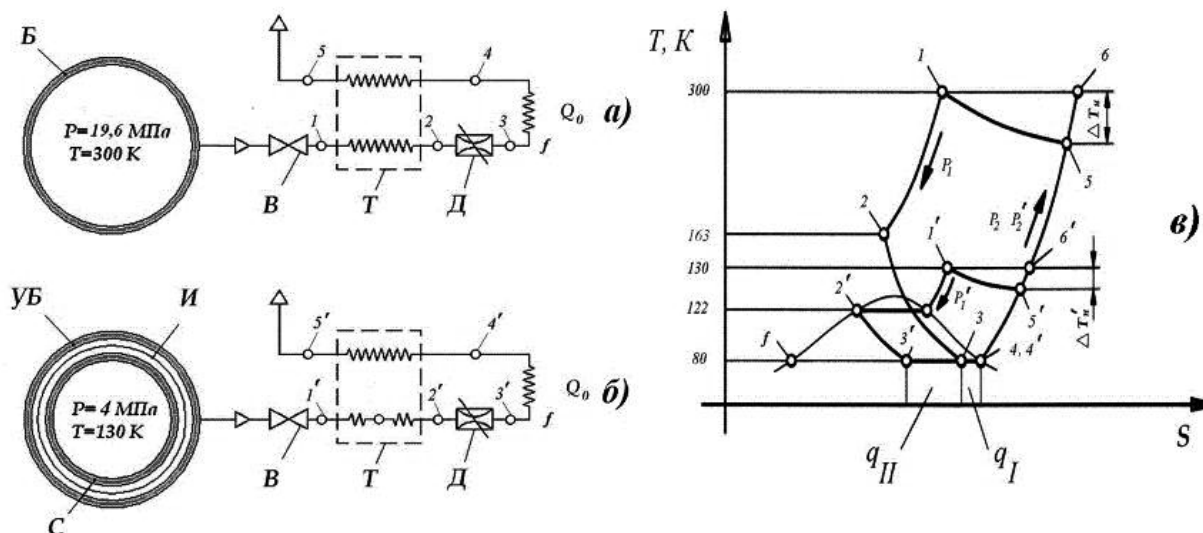


Рис. 1. Дроссельные системы охлаждения: а) — дроссельная система охлаждения с баллоном высокого давления; б) — дроссельная система охлаждения в составе с баллоном с криогенной заправкой, в) — $T-S$ диаграмма дроссельной системы охлаждения. Обозначения: Б — баллон; В — запорный вентиль; Д — дроссель; И — теплоизоляция; С — внутренний сосуд (термос); БКЗ — баллон с криогенной заправкой, Т — теплообменник

ства по температуре в обеспечении постоянной температуры охлаждаемого объекта. Однако недостатком этих систем является тот факт, что температура криостатирования не может быть выше, чем температура криоагента.

Из приведённого выше следует, что объективно полезным и своевременным будет разработка и создание универсального оборудования, способного удовлетворять существующим технологиям применения компримированных газов и криогенных жидкостей.

Идея заключается в том, что в случае заправки баллона газообразным продуктом он работает как обычный баллон высокого давления, а в случае заправки равным по массе криогенным компонентом, баллон работает в более благоприятных условиях по давлению. Внутренняя термосная ёмкость для криогенного компонента предотвращает тепловые удары и смягчает условия по термомоциклической прочности конструкции [1].

Использование этой идеи позволило разработать баллон с криогенной заправкой (БКЗ) для дроссельной системы охлаждения. С целью оценки энергетических характеристик такой емкости при бездренажном хранении и в режиме подачи рабочего тела в дроссельную систему (имитационные испытания) была разработана экспериментальная установка, принципиальная схема которой приведена на рис. 2.

Основной частью этой установки является цилиндрический баллон с криогенной заправкой, выполненный по оригинальной схеме на базе стандартного баллона объёмом 8 литров (ГОСТ 949–73). Материалом баллона — сталь 30ХМА. В крышке баллона располагаются пять штуцеров,

через два из которых выведены концы термопар (поз. 4), другие штуцеры (поз. 4) имеют свои отдельные трубопроводы. Один подключён к образцовому манометру (поз. 6) для контроля давления в баллоне. Два других штуцера соединены соответственно с дублирующим предохранительным клапаном (поз. 7), и с мембранным разрывным предохранительным клапаном (поз. 10). Регулирующий вентиль (поз. 8) установлен перед расходомером (поз. 9).

В процессе эксперимента в баллон помещается термосный сосуд с жидким азотом (77 К), крышка баллона герметично закрывается, и производятся замеры. Термопары установлены на наружной стенке баллона, внутри в газовой полости, а также на стенке термоса, и внутри термоса в жидкости. Показания хромель-копелевых термопар регистрируются измерительным потенциометром ПП-63 класса 0,05 (поз. 12).

Экспериментальная установка снабжена системой безопасности (в виде двух различных по конструкции дренажных клапанов).

При проведении испытаний БКЗ были поставлены следующие задачи:

- подтверждение работоспособности баллона с криогенной заправкой в полной комплектации (вентиль баллона, термос, экранная теплоизоляция на основе ЭВТИ и т.д.);

- получение картины изменения параметров рабочего тела и температуры стенки баллона по времени; подтверждение расчётной методики для бездренажного хранения криопродукта и в расходном режиме.

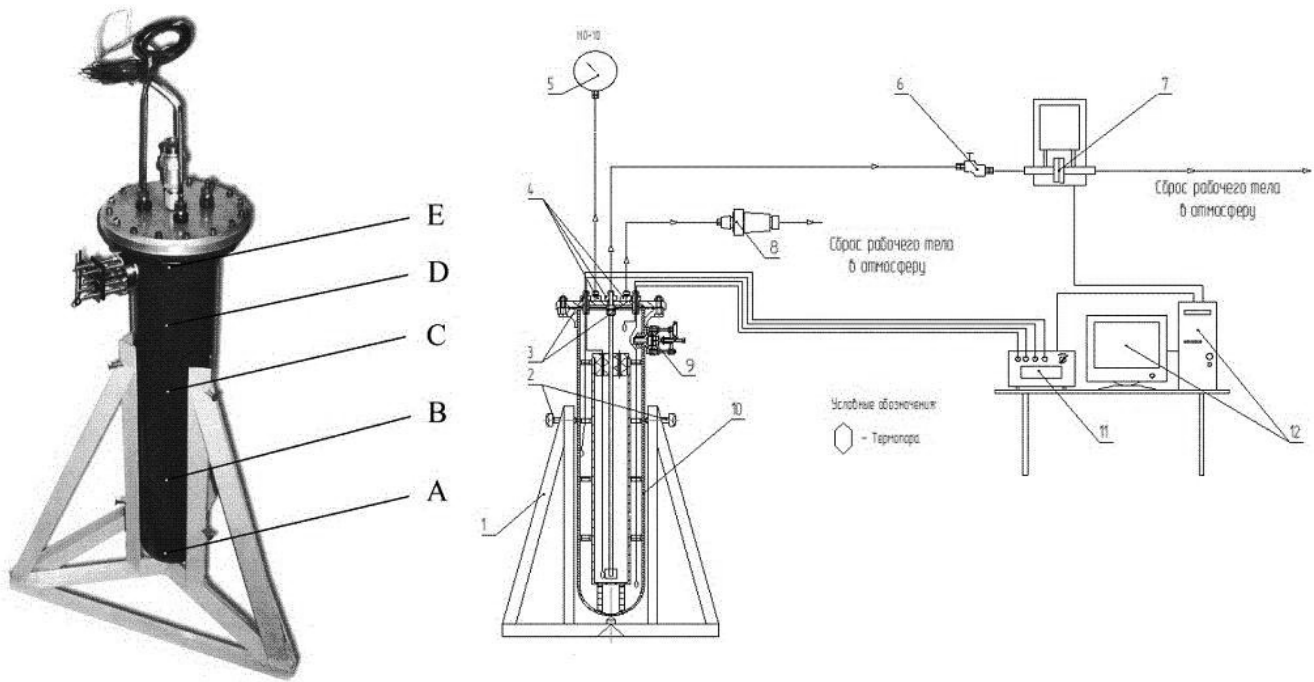


Рис. 2. Экспериментальная установка для исследования баллона с криогенной заправкой: 1 — ступень; 2 — винты с прокладками; 3 — штуцер терморпары; 4 — штуцер соединительный; 5 — манометр; 6 — вентиль регулирующий; 7 — расходомер; 8 — клапан предохранительный пружинный; 9 — клапан предохранительный разрывной; 10 — БКЗ; 11 — мультиметр цифровой; 12 — компьютер

Методика проведения эксперимента

Испытания были спланированы и проведены в три этапа, каждый из которых обусловлен необходимостью проверки влияния текущих доработок конструкции на характеристики БКЗ с учётом поставленных задач.

На рис. 3–4 представлены отдельные результаты выполненных исследований. Их анализ и сравнение с теоретическими расчетами [3, 4] позволяют сделать основной вывод о вполне приемлемом соответствии экспериментальных данных и расчётной модели, описывающих теплофизику про-

цесса в баллоне. При равных условиях заправки теплофизика процессов подчиняется логике поведения термодинамических системах, а именно при уносе массы (расходный режим) температура у внутренней стенки баллона и температура у внешней поверхности термосной ёмкости значительно ниже, чем в безрасходном режиме. Это способствует поддержанию температуры рабочего тела на постоянном уровне (около $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$), что отражено на рис. 3–4. Первые 45 минут эксперимента после заправки криоагента шёл процесс регазификации и повышения давления в режиме

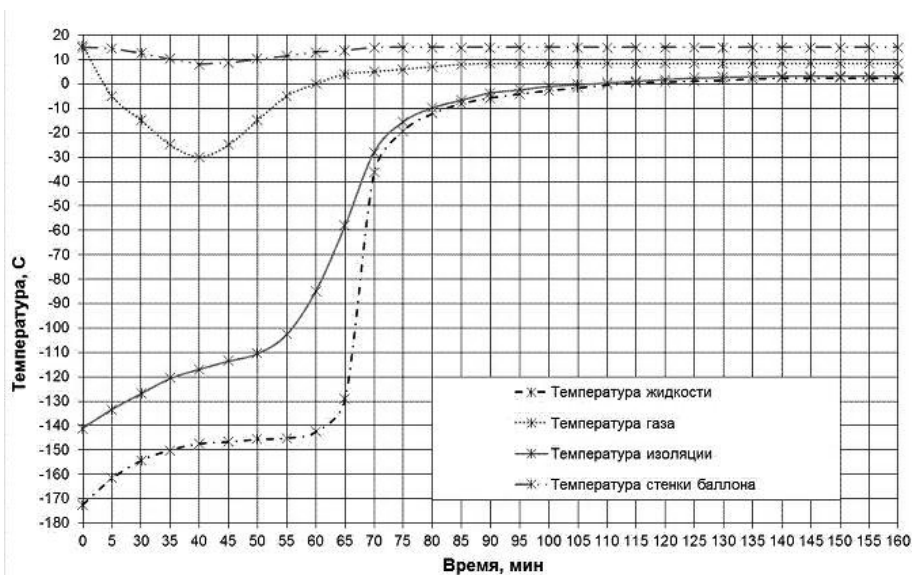


Рис. 3. Распределение температуры газа, жидкости и изоляции внутри баллона в зависимости от времени на расходном режиме

бездренажного хранения. Затем начиналось испытание баллона, имитирующее его работу в составе дроссельной системы охлаждения. С 46 минуты по 51 минуту постепенно возрастал расход рабочего вещества для обеспечения требуемой ее холодопроизводительности. Несмотря на унос массы, давление в эти минуты эксперимента возрастает. Далее система выходит на изотермический режим

при поддержании постоянного расхода рабочего тела. Поведение давления в расходном режиме способствует увеличению ресурса баллона. В соответствии с рис. 3 естественный рост давления, обусловленный испарением жидкой фазы, не является препятствием для использования баллона в любой момент его параметрического состояния, т. е. при запуске дроссельной системы охлаждения

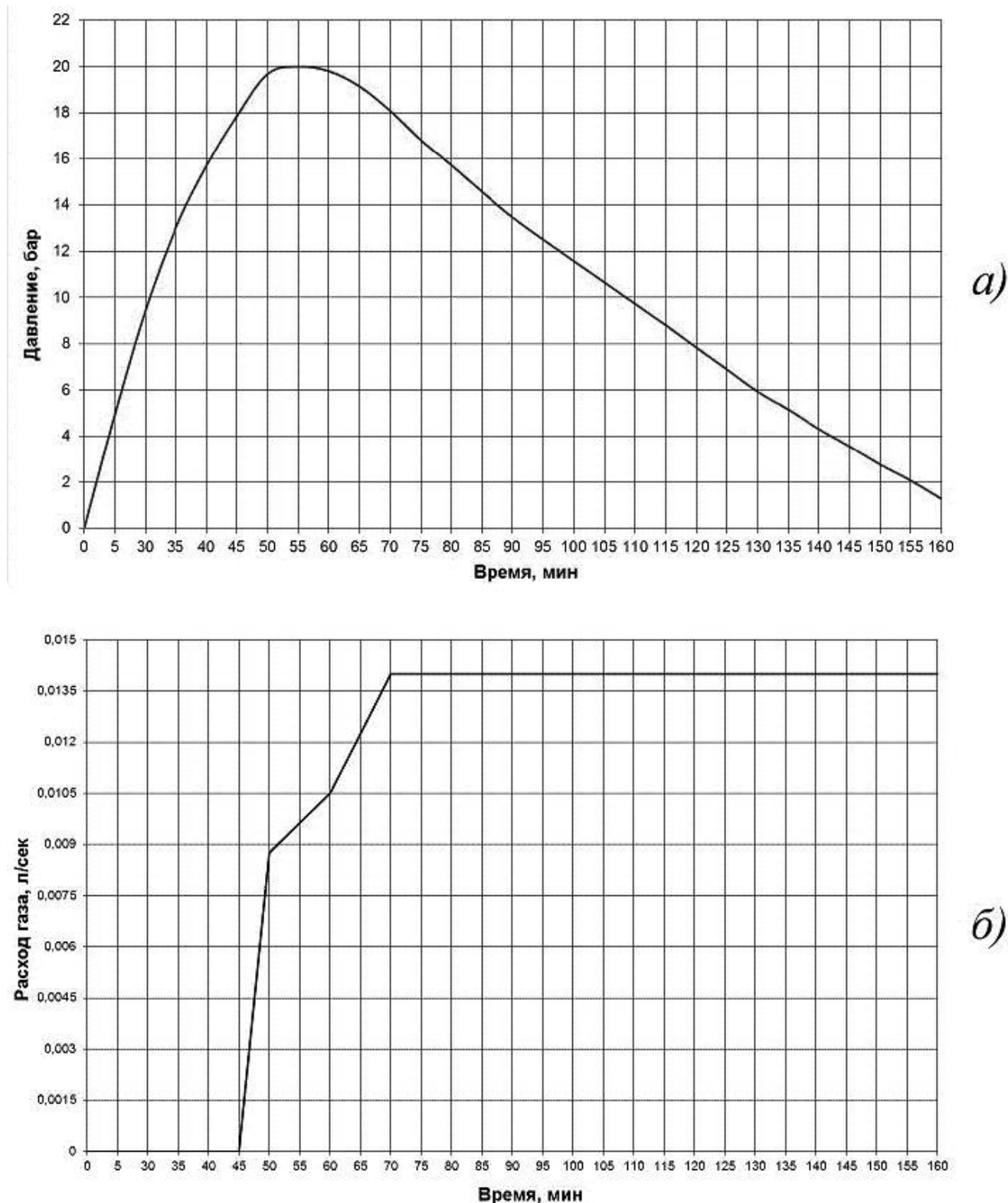


Рис. 4. Характеристики установки: а) — зависимость давления газа в баллоне с криогенной заправкой от времени; б) — зависимость расхода рабочего тела криопродукта в расходном режиме от времени (условия заправки — масса азота 250г).

Таблица 1

Сравнительный анализ характеристик двух систем с одинаковой массой заправки рабочим телом для базовой холодопроизводительности $Q_0=5$ Вт.

Вид дроссельной системы охлаждения	Время работы системы τ	Начальное давление в баллоне P_0 , МПа	Конечное давление в баллоне P_k , МПа	Конечная масса рабочего тела в баллоне m_3 , кг	Начальная температура рабочего тела в баллоне T , К	Масса баллона m_0 , кг	Масса заправки m_3 , кг	Масса теплообменника m_m , кг	Площадь теплообменника F , м ²	Время работы системы, к массе баллона $\chi = \tau$	Время работы системы к массе системы $\chi_{co} = \tau$	Средняя за время работы системы удельная холодопроизводительность, кДж/кг
Система с баллоном высокого давления	48	19,6	5,1	0,47	300	16,6	2,5	1,45	0,007	2,89	2,33	$1,08 \cdot 10^4$
Система с криогенным баллоном	88	4,0	0,98	0,21	130	18,9	2,5	0,25	0,0012	4,7	4,11	$4,66 \cdot 10^4$

Таблица 2

Сравнительный анализ характеристик массы баллонов двух систем с одинаковым временем работы t

Вид дроссельной системы охлаждения	Время работы системы τ	Начальное давление в баллоне P_0 , МПа	Конечное давление в баллоне P_k , МПа	Конечная масса рабочего тела в баллоне m_3 , кг	Начальная температура рабочего тела в баллоне T , К	Масса баллона m_0 , кг	Масса заправки m_3 , кг	Масса теплообменника m_m , кг	Площадь теплообменника F , м ²	Время работы системы, к массе баллона $\chi = \tau$	Время работы системы к массе системы $\chi_{co} = \tau$	Средняя за время работы системы удельная холодопроизводительность, кДж/кг
Система с баллоном высокого давления	88	31,4	5,1	0,47	300	24,5	4	1,45	0,007	3,55	2,9	$1,08 \cdot 10^4$
Система с криогенным баллоном	88	8,5	0,98	0,21	130	18,9	2,5	0,25	0,0012	4,7	4,11	$4,66 \cdot 10^4$

* Для баллонов объёмом 8 л.

(в момент открытия расходного органа). При этом изменение термодинамических параметров будет соответствовать логике процессов, а время функционирования дроссельной системы все равно будет выше, чем у баллона с заправкой компримированием. Эксперимент показывает, что в расходном режиме время подачи криогента увеличивается по сравнению с временем опорожнения баллона с газом высокого давления в два раза (до 80 мин.)

Это подтверждает перспективность использования баллона как возможную технологию ис-

пользования двухфазной термодинамической системы на примере предлагаемого баллона с криогенной заправкой.

Расчёты показывают [5], что ресурс БКЗ выше ресурса баллона высокого давления в 2 раза.

Сравнительный анализ

На основании результатов выполненных экспериментов был проведён сравнительный анализ технических характеристик системы охлаждения на основе баллона высокого давления (БВД)

и дроссельной системы охлаждения на основе баллона с криогенной заправкой (БКЗ). Сравнительный расчет и анализ выполнялся для двух случаев работы выше указанных систем:

1 — две системы с одинаковой массой заправки рабочим телом m_3 (табл. 1);

2 — две системы с одинаковым временем работы (табл. 2).

Расчет выполнялся на основании методик, представленных в работах [1, 6].

Анализ представленных в табл. 1 данных позволяет сделать следующие выводы:

– время работы ДСО БКЗ в 1,8 раза больше, чем время работы ДСО БВД;

– средняя за время работы системы удельная холодопроизводительность у ДСО БКЗ в 1,5 раза выше;

Анализ представленных в табл. 2 данных позволяет сделать следующие выводы:

– масса заправки ДСО БКЗ в 1,6 раза меньше, чем масса заправки ДСО БВД;

– масса баллона ДСО БКЗ в 1,3 раза меньше массы баллона ДСО БВД;

– масса ДСО БКЗ, по сравнению с БВД, меньше массы ДСО БВД на 1,4 раза.

Заключение

Из приведённых данных исследований следует, что объективно полезным и своевременным

будет применение БКЗ в составе бортовых систем охлаждения ИК-приёмников излучения. БКЗ может удовлетворять существующим технологиям использования сжатых газов и криогенных жидкостей. Время функционирования системы охлаждения увеличивается в 1,8 раза, либо снижается масса и габариты системы охлаждения, что особо актуально для беспилотных летательных аппаратов.

Литература

1. Барон Р.Ф. Криогенные системы.— М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Довгялло А.И., Лукачев С.В. и др.// Топливный баллон. Патент № 2163699, Россия, МПК 7F17C9/02, 99114577//06 заявл. 02.07.1977, опубл. 27.02.2001. Бюл. № 6
3. Сычёв В.В., Вассерманн А.А., Козлов А.Д., и др.. Термодинамические свойства азота.— М., Издательство стандартов, 1977.
4. Жуковский В.А. Термодинамика.— М.: Энергоатомиздат, 1983.
5. Довгялло А.И., Угланов Д.А., Ашихмина Т.В. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королева. 2007. № 2. С. 83
6. Довгялло А.И., Логашкин А.П., Сармин Д.В., Угланов Д.А., // Прикладная физика. 2010. № 6. С. 75
7. Довгялло А.И., Сармин Д.В., Угланов Д.А.// Вестник СГАУ. 2009. № 3 (Ч.2). С. 143ё

Imitations tests of throttle cooling system with cryogenic refueling tank and its comparative characteristics

A.I. Dovgyallo, S.O. Nekrasova, D.V. Sarmin, and D.A. Uglanov
S.P. Korolev Samara State Aerospace University (The National Research University),
34 Moscow highway, Samara, 443086, Russia
E-mail: d.a.i@mail.ru; sarmin.d.v@mail.ru

In this paper, the results of experimental investigations of processes in balloon with cryogenic refueling are represented. The results could be used in the throttle cryogenic cooling system. Also, there is a comparative analysis of its characteristics with the parameters of the throttle cooling system based on high-pressure balloon.

PACS: 6.20.— r

Keywords: infrared receiver, throttle, cooling systems, cryogenic refueling tank, experimental stand.

Bibliography — 7 references

Received August 20, 2012