
doi: <https://doi.org/10.15407/knit2017.04.046>

УДК 536.483, 621.565.93/95

И. В. Селезнёва, Р. А. Мочёнов, Я. В. Семененко, М. П. Сало, Г. М. Иваницкий

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля»,
Днепро, Украина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА В КРИОГЕННОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ

Для отработки процесса охлаждения газа, заправляемого в шаробаллоны ракеты-носителя, на стендовой базе ГП «КБ «Южное» создана экспериментальная установка. Выполнена проверка технологии охлаждения гелия в змеевиковом теплообменнике, погружённом в жидкий азот. По результатам испытаний выработаны рекомендации по практическому применению технологии охлаждения гелия, заправляемого в шаробаллоны ракеты-носителя.

Ключевые слова: криогенный теплообменник, охлаждение газа, гелий, жидкий кислород, керосин, жидкий азот, шаробаллон, испытания, наддув.

ВВЕДЕНИЕ

Система питания двигательной установки компонентами топлива во многом определяет облик, массовые и эксплуатационные характеристики всего ракетного комплекса [1, 4–6].

В настоящее время для ракет-носителей (РН) в качестве топлива жидкостных ракетных двигателей широкое применение нашел жидкий кислород и керосин. Эта топливная пара применяется в современных РН «Зенит», «Falcon-9», а также в перспективных разработках ГП «КБ «Южное» семейства РН «Маяк» и РН «Циклон-4М». В качестве рабочего тела наддува баков РН используется гелий из погруженных в жидкий кислород шаробаллонов.

Для заправки шаробаллонов на вход в РН должен подаваться охлажденный гелий с температурой, близкой к температуре жидкого кислорода. Данное требование обусловлено необходимостью

исключения негативных факторов, возникающих при попадании теплой фазы в криогенную среду: дополнительный тепловой поток, возможные тепловые удары в системе подачи гелия, предотвращения интенсивного кипения и испарения кислорода и т.д.

С целью реализации данного требования в составе стартового комплекса необходимо иметь оборудование для охлаждения гелия.

Обзор в работе [2] показал, что вопрос охлаждения гелия в наземном технологическом оборудовании освещен недостаточно, и имеются только отдельные сведения по проектному построению криогенных теплообменников.

Учитывая данное обстоятельство, а также то, что условия работы криогенного теплообменника отличаются от условий работы стандартного их ряда, ввиду множества механизмов теплообмена: плёночное и пузырьковое кипение, конвекция, а также переходные процессы, вопрос охлаждения гелия перед подачей его в РН является актуальным и требующим дополнительной проработки.

© И. В. СЕЛЕЗНЁВА, Р. А. МОЧЁНОВ, Я. В. СЕМЕНЕНКО,
М. П. САЛО, Г. М. ИВАНИЦКИЙ, 2017

ОПИСАНИЕ СТЕНДОВОЙ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ РАБОТ

Для отработки процесса охлаждения газа криогенным теплоносителем на стендовой базе ГП «КБ «Южное» была создана стендовая установка (рис. 1) и проведены исследовательские испытания.

Задача испытаний заключалась в проверке технологии охлаждения гелия при различных расходах до температур от -172 до -183 °С с использованием теплообменника змеевикового типа, погруженного в жидкий азот.

Внешний вид змеевикового теплообменника, устанавливаемого в емкость Е1 объемом 150 л, показан на рис. 2–3.

Змеевиковый теплообменник обладал следующими характеристиками:

| | |
|--|-----------------|
| материал | сталь 12Х18Н10Т |
| трубопровод, мм | 25 × 2.5 |
| длина трубопровода, м | 13 |
| внешняя площадь контакта теплообмена, м ² | 1.2 |
| количество витков, шт. | 17 |
| зазор между витками, мм | 5–10 |

В качестве источника подачи газа использовалось два баллона гелия по 40 л каждый с исходным давлением 140 кгс/см². Баллоны были объединены одной магистралью, на выходе из которой стоял понижающий редуктор с возможностью регулирования давления на выходе от 0 до 30 кгс/см².

Для измерения параметров в стендовой установке использовались следующие контрольно-измерительные приборы:

- датчики температуры ДТ1, ДТ2 – ТСП Метран – 206 02 100П/В3,
- датчики температуры ДТ3 – ДТ6 – РеМик ТСП – 02,
- датчики давления ДД1 – ДД2 – Метран 100 – ДД1440,
- датчики давления ДД3 – ДД4 – Метран – 55 ДИ 515.

Датчики температуры имеют диапазон измерения от -196 до $+40$ °С. Датчики давления имеют диапазон измерения от 0 до 30 кгс/см². Допустимая погрешность измерений ± 2.5 %.

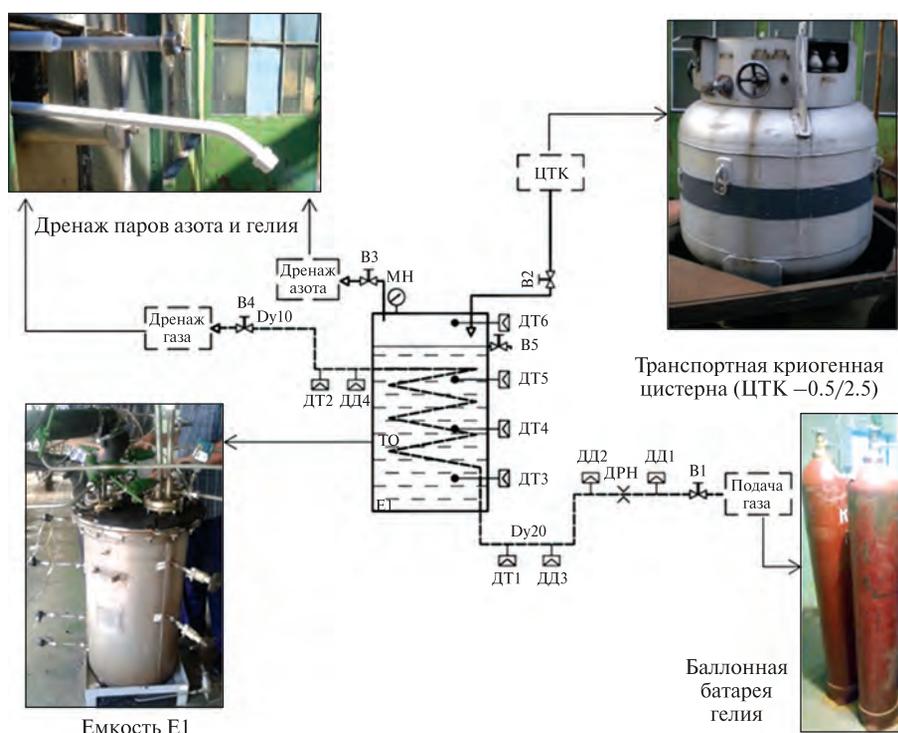


Рис. 1. Схема стендовой установки: ДД1–ДД4 – датчики давления, ДТ1–ДТ6 – датчики температуры, ДРН – расходная шайба, В1–В3 – вентили, Е1 – емкость, ЦТК – транспортная криогенная цистерна, МН – манометр, ТО – теплообменник



Рис. 3. Внешний вид теплообменника, смонтированного на крышке ёмкости

← Рис. 2. 3D-модель

Для обеспечения требуемого расхода газа, поступающего в теплообменник, применялись жиклёрные узлы, в состав которых входили расходные шайбы. Внешний вид жиклёров с различным диаметром проходного сечения представлен на рис. 4. Расходная характеристика шайб проверялась путем их предварительной продувки с наддувом емкости Е1.

Технология работ заключалась в следующем.

Перед началом проведения испытаний емкость Е1 заполнялась жидким азотом от ЦТК —0.5/2.5 до перелива через вентиль В5, что соответствовало 80 % заполнения и полному погружению теплообменника в жидкий азот. Дренаж паров жидкого азота осуществлялся в окружающую атмосферу по дренажному трубопроводу за пределы помещения, в котором была смонтирована стендовая установка.

После заполнения емкости Е1 на вход в теплообменник одновременно из двух баллонов подавался гелий. Для контроля параметров газа на входе и выходе из теплообменника были установлены датчики давления ДД3, ДД4 и температуры ДТ1, ДТ2.

Перед теплообменником на линии подачи газа устанавливалась расходная шайба ДРН, обеспечивающая необходимый расход гелия путем заданной величины перепада давления на ней. Определение расходной характеристики шайбы осуществлялось расчетным путем по показаниям датчиков давления ДД1, ДД2.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате проведенных испытаний по охлаждению газообразного гелия в криогенном теплообменнике получены графические зависимости изменения температуры газа на входе и выходе из теплообменника змеевикового типа (рис. 5), которые являются обобщением экспериментальных данных, полученных при расходах гелия 3.8 и 6.4 г/с.

Проведенный в работе [3] анализ изменения температуры на выходе из теплообменника выявил несоответствия разработанной методики расчета процесса тепло- и массообмена с результатами экспериментальных данных, которые заключаются в следующем:

- по результатам испытаний на теплообменнике змеевикового типа не удалось добиться охлаждения гелия до требуемых значений температуры;
- при постепенном увеличении расхода гелия его температура на выходе из теплообменника принимает всё более низкие значения. Но обязательно наступает момент, когда снижение температуры газа прекращается, т. е. уже не зависит от величины расхода.

На рис. 6 приведена расчетная зависимость изменения температуры газообразного гелия на выходе из теплообменника в зависимости от скорости потока, с учётом погрешности определения коэффициента теплоотдачи на внешней границе стенки с жидким азотом. Погрешность коэффициента теплоотдачи в зависимости от механизмов теплообмена: плёночное и пузырьковое кипения, конвекция, а также переходных процессов может достигать величины $\epsilon = \pm 35\%$ [3].

Таким образом, кривые температур, с положительной и отрицательной погрешностью определения коэффициента теплоотдачи на границе стенки с жидким азотом образуют коридор действительных значений, достигаемых газообразным гелием на выходе из теплообменника.

Значения скоростей потока соответствующих экспериментальным расходам гелия с учетом давления на входе и выходе из теплообменника находились в диапазоне от 40 до 55 м/с. При этом расчетные значения температур от -168 до -164 °С не сопоставляются с экспери-

Рис. 4. Внешний вид расходных шайб мм: 1 — $dy = 1.5$, 2 — $dy = 5$, 3 — $dy = 4$, 4 — $dy = 3$, 5 — $dy = 2$, 6 — $dy = 1$

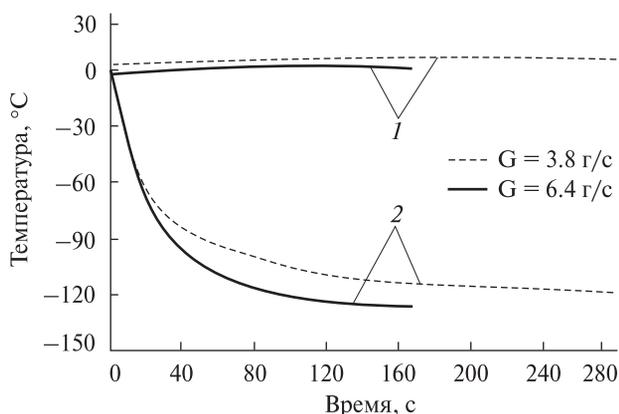
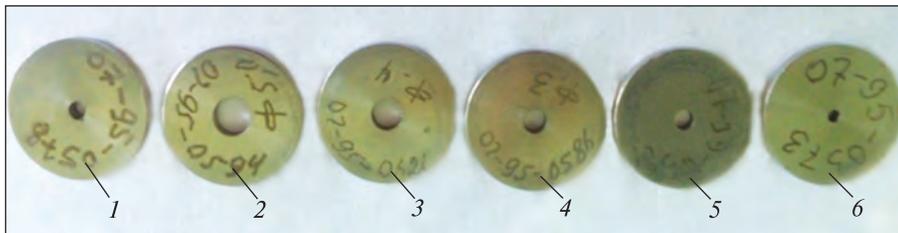


Рис. 5. Обобщенные экспериментальные зависимости изменения температуры от времени на входе и выходе из теплообменника: 1 — показания датчиков температуры на входе в теплообменник, 2 — показания датчиков температуры на выходе из теплообменника

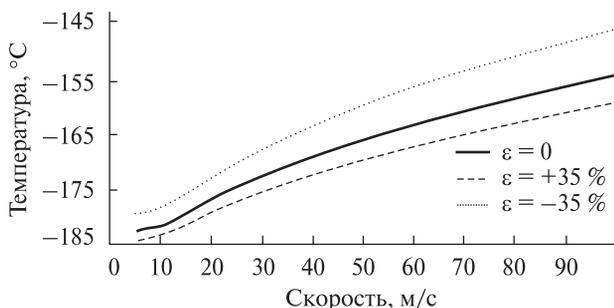


Рис. 6. Расчетная зависимость минимальной температуры газообразного гелия на выходе из теплообменника от скорости потока в трубе теплообменника

ментальными значениями $-128\text{ }^{\circ}\text{C}$ при расходе гелия 6.4 г/с и $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ при расходе гелия 3.8 г/с . Это было обусловлено конструктивной особенностью экспериментальной установки и тем, что чувствительный элемент датчика тем-



Рис. 7. 3D-модель теплообменника пакетного типа

Рис. 8. Внешний вид изготовленного теплообменника пакетного типа для экспериментальной обработки

пературы ДТ2 соприкасался с металлом трубопровода из-за того, что он имел малый диаметр внутреннего сечения — 10 мм . Место установки ДТ2 — на расстоянии примерно 0.3 м от выхода из теплообменника. Таким образом, на выходе из теплообменника осуществлялось измерение температуры стенки трубопровода, а не потока гелия.

Для учета конструктивных особенностей и места установки датчика, разработанная методика расчета процесса тепло- и массообмена в криогенном теплообменнике была доработана. Введены дополнительные расчетные зависимости учитывающие наличие внешнего теплового потока подводимого к металлу трубопровода и время стабилизации температуры в месте установки датчика [3]. Проведенные расчеты с использованием доработанной методики показали удовлет-

ворительную сходимость с измерением температуры, зафиксированным при экспериментах.

Однако даже с учетом данного эффекта температура газообразного гелия на выходе из теплообменника не достигает требуемого диапазона от -172 до -183 °С. Для более глубокого охлаждения гелия необходимо, чтобы скорость потока не превышала 5 м/с.

Это может быть реализовано за счет применения других конфигураций теплообменников. В этом плане наиболее эффективным может быть теплообменник пакетного типа, состоящий из большого числа тонких труб (рис. 7, 8). В подобном теплообменнике за счёт деления потока газа скорость течения в отдельной трубке не будет превышать 5 м/с, что соответствует условию наибольшего охлаждения газа. В то же время суммарная площадь поверхности теплообмена с жидким азотом (даже при малом диаметре трубок) будет больше, чем в теплообменнике змеевикового типа.

Характеристики теплообменника пакетного типа:

| | |
|--|-----------------|
| Материал | сталь 12Х18Н10Т |
| Количество секций, шт. | 8 |
| Количество трубок в одной секции, шт. | 7 |
| Трубопровод, мм | 14 × 2 |
| Высота трубопровода в секции, м. . . . | 0.6 |
| Диаметр трубок в основаниях, мм . . . | 25–2.5 |
| Внешняя площадь контакта теплообмена, м ² | 1.7 |

Сравнительный анализ конструктивного исполнения двух видов теплообменников показывает, что суммарная площадь проходного сечения трубок в пакетном теплообменнике составляет $4.39 \cdot 10^{-3}$ м², что на порядок превышает площадь проходного сечения змеевикового теплообменника $3.14 \cdot 10^{-4}$ м². Это в свою очередь приводит к уменьшению скорости потока газа до 3 м/с. Теплообменник пакетного типа, который был изготовлен взамен змеевикового теплообменника, согласно проведенным расчётам по методике [3] удовлетворяет необходимым требованиям по скорости потока и значениям температуры гелия на выходе из него (от -172 до -183 °С).

ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ

1. В ходе экспериментальной отработки проверена технология охлаждения газообразного гелия жидким азотом при использовании теплообменника змеевикового типа.

2. В ходе экспериментальной отработки определено время стабилизации температуры на выходе из теплообменника в зависимости от расхода газообразного гелия. Установлено, что время стабилизации температуры имеет обратно пропорциональную зависимость от величины расхода.

3. Установлено, что измеряемая температура на выходе из теплообменника в значительной мере зависит от конструктивных особенностей и технологии монтажа стендовой установки. Это привело к несоответствию измеряемого параметра по сравнению с разработанной методикой расчета процессов тепло- и массообмена в криогенном теплообменнике. Доработанная методика расчета позволила достоверно определить этот факт.

4. Определена степень охлаждения газообразного гелия в криогенном теплообменнике в зависимости от скорости потока. Установлено, что наибольшая степень охлаждения газа достигается при малых значениях, до 5 м/с.

5. Уточнены конструктивные параметры теплообменника. Конструкция теплообменника змеевикового типа недостаточно эффективна. Поэтому для охлаждения газов рекомендуется применять теплообменники других конфигураций, в частности пакетного типа, состоящего из большого числа отдельных трубок.

6. При разработке полномасштабных объектов установка датчика температуры должна осуществляться максимально близко к выходу из теплообменника, а контакт чувствительного элемента датчика с трубопроводом должен быть исключен.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Беляев Н. М.* Расчет пневмогидравлических систем ракет. — М.: Машиностроение, 1983.—219 с.
2. Разработка эффективной технологии охлаждения газов в криогенном теплообменнике: LTC YZH PRT 002 00. — Днепр, 2017. — 130 с.
3. *Технический отчёт по результатам экспериментальной отработки технологии охлаждения газов в кри-*

огенном теплообменнике: LTC YZH PRT 005 00. — Днепр, 2017. — 274 с.

4. Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники: Инж. пособ. / Под ред. И. В. Бармина. — М.: Полиграфис РПК, 2005. — Кн. 1. — 417 с
5. Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники: Инж. пособ. / Под ред. И. В. Бармина. — М.: Полиграфис РПК, 2006. — Кн. 2. — 376 с.
6. Челомей В. Н. Пневмогидравлические системы двигателных установок с жидкостными ракетными двигателями. — М.: Машиностроение, 1978.—240 с.

Стаття надійшла до редакції 28.08.17

REFERENCES

1. Belyaev N. M. Raschet pnevmogidravlicheskih sistem raket [Calculation of pneumohydraulic missile systems], 219 p. (Mashinostroenie, M., 1983) [in Russian].
2. Development of an effective technology for cooling gases in a cryogenic heat exchanger: LTC YZH PRT 002 00, 130 p. (Dnepr, 2017) [in Russian].
3. Technical report on the results of experimental testing of the gas cooling technology in a cryogenic heat exchanger: LTC YZH PRT 005 00, 274 p. (Dnepr, 2017) [in Russian].
4. Barmin I. V. (Eds.) Technological objects of ground infrastructure of rocket and space technology: Engineering assistance. Book 1, 417 p. (Poligrafis RPK, M., 2005) [in Russian].
5. Barmin I. V. (Eds.) Technological objects of the ground infrastructure of rocket and space technology: Engineering assistance. Book 2, 376 p. (Poligrafis RPK, M., 2006) [in Russian].
6. Chelomey V. N. Pnevmoгidравлические системы двигателных установок с жидкостными ракетными двигателями [Pneumohydraulic systems of propulsion systems with liquid rocket engines], 240 p. (Mashinostroenie, M., 1978) [in Russian].

I. V. Selezniyova, P. O. Mochionov,
Ya. V. Semenenko, M. P. Salo, G. M. Ivaniytskiy

Державне підприємство «Конструкторське бюро
«Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпро, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ ГАЗУ В КРИОГЕННОМУ ТЕПЛОБМІННИКУ

Для відпрацювання процесу охолодження газу, що заправляється в кулебалони ракети-носія на стендовій базі ДП «КБ «Південне» створено експериментальну установку. Виконано перевірку технології охолодження гелію в змієвиковому теплообміннику, зануреного в рідкий азот. За результатами випробувань наведені рекомендації щодо практичного застосування технологій охолодження гелію, який заправляють у кулебалони ракети-носія.

Ключові слова: криогенний теплообмінник, охолодження газу, гелій, рідкий кисень, газ, рідкий азот, кулебалон, випробування, наддув.

I. V. Selezniyova, R. A. Mochionov,
Ya. V. Semenenko, M. P. Salo, G. M. Ivaniytskiy

Yangel Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, Ukraine

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF GAS COOLING IN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER

The paper deals with an experimental setup for testing the process of cooling the gas fueled up to the launch vehicle gas bottle, which was created at the test stand of the Yangel Yuzhnoye State Design Office. The technology of helium cooling in a coil-type heat exchanger, immersed in liquid nitrogen was verified. The results of tests to elaborate the recommendations for practical application of this technology have permitted.

Keywords: cryogenic heat exchanger, gas cooling, helium, liquid oxygen, kerosene, liquid nitrogen, gas bottle, supercharging.