Статья поступила в редакцию 28.10.15. Ред. рег. № 2381 The article has entered in publishing office 28.10.15. Ed. reg. No. 2381

УДК 629.7.036.54 doi: 10.15518/isjaee.2015.21.020

К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ПРЕДСТАРТОВОМ ЗАХОЛАЖИВАНИИ РАСХОДНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК РАЗГОННЫХ БЛОКОВ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

А.Г. Галеев, В.П. Фирсов, И.В. Антюхов, А.В. Галеев

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)
125993, Москва, ГСП-3, А-80, Волоколамское ш., д. 4
Тел.: (8-499) 158-91-36; e-mail: galant1992@mail.ru

Заключение совета рецензентов: 01.11.15 Заключение совета экспертов: 05.11.15 Принято к публикации: 09.11.15

В работе проведены исследования процессов теплообмена при предстартовом захолаживании расходных магистралей двигательных установок (ДУ) разгонных блоков (РБ) ракет-носителей (РН) и в криогенных системах испытательного стенда (ИС).

На основе рассмотрения уравнений сохранения массы и энергии применительно к газовой подушке бака и объему бака, заполненного криогенной жидкостью, предложены методы математического моделирования процессов захолаживания. По результатам стендовых и летных испытаний ДУ уточняются коэффициенты замыкающих зависимостей для решения уравнений по теплоотдаче и трению в элементах систем подачи ИС и ДУ.

Результаты расчетно-экспериментальных исследований процессов захолаживания расходных водородных и кислородных магистралей, полученные при стендовых и летных испытаниях РБ 12КРБ, могут быть использованы для верификации компьютерных моделей расчета теплообмена криогенных систем ИС и ДУ.

Ключевые слова: теплообмен, предстартовое захолаживание, разгонный блок, двигательная установка, испытание, водород.

TO THE QUESTION OF RESEARCH OF PROCESSES OF HEAT EXCHANGE AT PRE-START COOLING DOWN THE SERVICE TUBES PU UPPER BLOCK LV

A.G. Galeev, V.P. Firsov, I.V. Antyukhov, A.V. Galeev

Moscow Aviation Institute (National Research University)
4 Volokolamskoe sh., Moscow, 125993, GSP-3, A-80, Russia
Tel.: (8-499) 158-91-36; e-mail: galant1992@mail.ru

Referred: 01.11.15 Expertise: 05.11.15 Accepted: 09.11.15

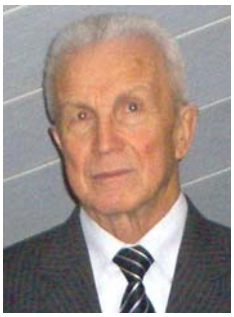
The paper presents the study of heat transfer processes during prelaunch decreasing expenditure highways propulsion units (PU) upper stage (US) launch vehicles (LV) and cryogenic systems of the test bench (TB).

Based on the consideration of the equations of conservation of mass and energy as applied to gas-cushion tank and the volume of the tank is filled with cryogenic fluid, the methods of mathematical simulation of processes of cooling. According to the results of bench and flight tests control coefficients are specified closing dependences on heat transfer and friction in heat capacity of the elements. TB and PU.

The results of calculation and experimental studies of the processes of cooling consumable hydrogen and oxygen arteries obtained at bench and flight tests of RB, can be used for verification of computer models calculate during cryogenic systems TB and PU.

Keywords: heat transfer, the pre-start cooling down, upper block, propulsion units, testing, hydrogen.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"



Айвенго Гадыевич Галеев
Aivengo G. Galeev

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, лауреат премии Совета Министров СССР в области науки и техники, действительный член Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, главный научный сотрудник ФКП «НИЦ РКП», профессор кафедры «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» МАИ; научно-педагогический стаж более 40 лет.

Участвовал в отработке ряда систем по ракетно-космическим программам «Космос-1», «Космос-3», «Н1Л3», «Энергия-Буран», «GSLV», «Ангара» и др.

Образование: Казанский авиационный институт (1961).

Область научных интересов: теория и практика наземных испытаний ракетных двигателей и двигательных установок, гидро- и газодинамика процессов в энергоустановках, исследования в области водородной технологии.

Публикации: более 190, в том числе 7 монографий, 6 учебных пособий, 44 авторских свидетельства и патента на изобретения.

Information about the author: Doctor of Science (Engineering Science), Professor, Laureate of USSR Council of Ministers in the field of science and technology, member of the K.E. Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics, Chief Researcher of the PCF “SIC RSI”, professor of “Management of operation of rocket and space systems” of Moscow Aviation Institute (National Research University); scientific and pedagogical experience of 40 years.

Participated in working out a number of systems for missile and space programs “Space-1”, “Space-3”, “N1L3”, “Energia-Buran”, “GSLV”, “Angara” and others.

Education: Kazan Aviation Institute (1961).

Research area: theory and practice ground tests of rocket engines and moving-enforcement units, hydro and gas dynamics processes in power plants, research in the field of water-native technology.

Publications: more than 190, including 7 monographs, 6 textbooks, 44 patents for inventions.

Валерий Петрович Фирсов
Valery P. Firsov

Сведения об авторе: сотрудник кафедры авиационной и космической теплотехники, руководитель отдела криогенных систем НИЦ НТ МАИ, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, научный стаж более 40 лет.

Участвовал в отработке ряда систем по ракетно-космическим программам «Н1Л3», «Протон», «Энергия-Буран», «Ангара» и др.

Образование: МАИ (1971).

Область научных интересов: исследования процессов теплообмена и гидродинамики в криогенных системах ДУ РКТ и сверхпроводящих криогенных энергоустановках.

Публикации: более 90, в том числе 15 патентов и авторских свидетельств и на изобретения.

Information about the author: Department of aviation and space thermal engineering, head of cryogenic systems SIC MAI, winner of the RF Government prize in science and technology, scientific experience over 40 years.

Participated in the development of a number of systems for missile and space programs “NL”, “Proton”, “Energy-Buran”, “Angara”, etc.

Education: MAI (1971)..

Research area: research of processes of heat transfer and hydrodynamic in cryogenic systems DO RCT and a super-conductive cryogenic power plants.

Publications: more than 90, including 15 patents for inventions.

Илья Владимирович Антюхов
Ilya V. Antyukhov

Сведения об авторе: научный сотрудник кафедры авиационной и космической теплотехники МАИ.

Образование: МАИ (1994).

Область научных интересов: исследования процессов теплообмена и гидродинамики в криогенных системах двигателей ЛА.

Публикации: более 20, в том числе 4 патента на изобретения.

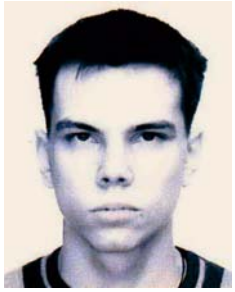
Information about the author: researcher at the Department of aviation space thermotechnics, MAI.

Education: MAI (1994).

Research area: research of processes of heat transfer and hydrodynamic in cryogenic systems engines.

Publications: more than 20, including 4 patents for inventions.

International Publishing House for scientific periodicals “Space”
Международный издательский дом научной периодики “Спейс”



Антон Валерьевич Галеев
Anton V. Galeev

Сведения об авторе: аспирант кафедры «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» МАИ.
Образование: Московский авиационный институт (2014).
Область научных интересов: теория и практика наземных испытаний ракетных двигателей и двигательных установок.
Публикации: 5.

Information about the author: graduate student Department of "Management of operation of rocket and space systems" Moscow Aviation Institute (National Research University).
Education: Moscow Aviation Institute (2014).
Research area: theory and practice ground tests of rocket engines and propulsion systems.
Publications: 5.

Введение

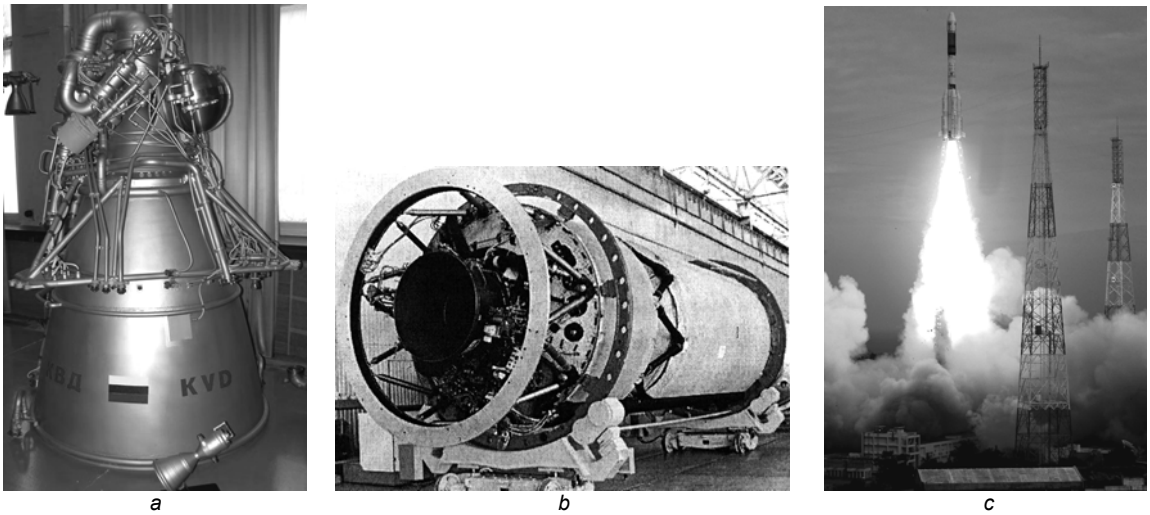
Двигательные установки, работающие на криогенных компонентах топлива, используются как для первых ступеней РН, так и для разгонных блоков (РБ), обеспечивающих вывод космических аппаратов (КА) на целевые орбиты. Криогенные ДУ создают высокий удельный импульс и являются экологически чистыми, что обеспечивает все возрастающий интерес к их применению. Низкая температура криогенных компонентов топлива создает значительные проблемы при заправке и опорожнении баков, захолаживании магистралей питания и запуске ДУ, особенно в условиях невесомости, хранении компонентов при длительных полетах. Для решения этих проблем создаются сложные экспериментальные установки (ЭУ) и методики испытаний, разрабатываются физические и математические модели расчета нестационарных многофазных процессов с интенсивными фазовыми превращениями. Наибольшие сложности возникают при создании криогенных РБ, поскольку в наземных условиях отсутствуют возможности имитации условий полета при проведении операций захолаживания и запуска ДУ [1, 2].

Одним из первых в мире (1962 г.) в США был создан и успешно эксплуатировался до настоящего времени кислородно-водородный РБ «Центавр» с двигателем RL-10 (тяга 66,7 кН).

Одновременно в СССР, в 1962-1977 гг., на кислороде и углеводородном топливе был создан разгонный блок «Д» («ДМ») с двигателем РД-58 (тяга 70 кН), который обеспечил большинство космических полетов. Позднее для КА «Буран» была создана объединенная двигательная установка (ОДУ) на кислороде и углеводородном топливе с использованием модификации этого двигателя (17Д12).

Для разгонного блока «Р» ракеты «Н-1» в КБХМ им. А.М. Исаева был создан первый в мире кислородно-водородный двигатель РД-56 (тяга 73,5 кН) замкнутой схемы. В дальнейшем он был модифицирован (КВД1) и с 2001 г. используется в составе разгонного блока 12КРБ РН GSLV (Индия).

Кислородно-водородный двигатель КВД1, разгонный блок 12КРБ при подготовке в монтажно-испытательном корпусе (МИК) и старт РН GSLV представлены на рис. 1.



a *b* *c*

Рис. 1. Двигатель КВД1 (*a*), разгонный блок 12КРБ при подготовке к старту (*b*) и старт РН GSLV (*c*)
Fig. 1. Engine КВД1 (*a*), upper block 12КРБ in preparation for launch (*b*) and launch LV GSLV (*c*)

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Двигатель КВД1 – это уникальный однокамерный ЖРД многократного включения (до 3 включений) с турбонасосной подачей компонентов топлива и дожиганием восстановительного (с избытком водорода) генераторного газа, удельный импульс тяги составляет 4532 м/с.

В перспективных разгонных блоках КВТК РН «Ангара-А5» тяжелого класса предусматривается использование кислородно-водородного двигателя РД0146Д (разработка КБХА). Схема запуска и захолаживания этого двигателя в составе РБ КВТК создана по аналогии с двигателем РБ 12КРБ.

В связи с вышеизложенным исследования процессов теплообмена при предстартовом захолаживании расходных магистралей ДУ разгонных блоков представляют интерес и являются актуальными.

Исследование процессов теплообмена при предстартовом захолаживании расходных магистралей ДУ

Захолаживание систем ИС и двигателя может проводиться по различным схемам и режимам, которые представлены на рис. 2:

– с большим расходом жидкости (рис. 2, *a*) (при этом возможны значительные пульсации давления);

– с уменьшенным расходом жидкости (рис. 2, *b*). Достоинства данного способа: отсутствие пульсации давлений и расхода в процессе захолаживания, небольшие затраты компонентов топлива на захолаживание. Среди недостатков этого способа следует выделить большое время захолаживания и необходимость использования дополнительного оборудования;

– газом (рис. 2, *c*). Используется переохлажденный газ, как правило, газообразный гелий. Способ применяется для предстартового захолаживания трактов РБ;

– парогазом (рис. 2, *d*). Этот вариант используется в полете для уменьшения времени захолаживания и затрат компонентов;

– с использованием циркуляционных систем (рис. 2, *e*), обеспечивающих захолаживание и криостатирование магистралей только при наличии массовой силы, например, в условиях предстартовой подготовки. К достоинствам этого способа следует отнести простоту, а к недостаткам – дополнительные потери компонентов топлива в баке, которые компенсируются дозаправкой бака. Применяются в условиях предстартовой подготовки для первой и второй ступеней ракет [2].

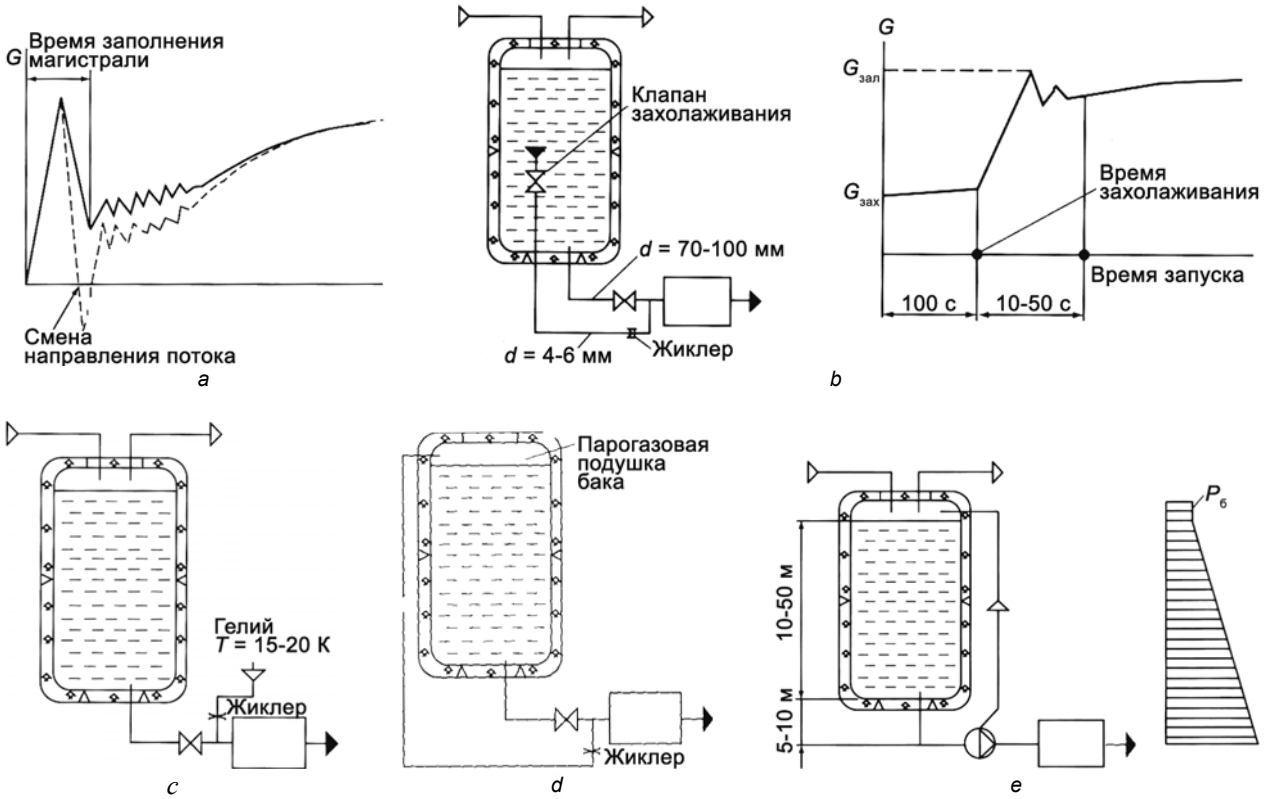


Рис. 2. Варианты проведения захолаживания магистралей ДУ и ИС: *a* – изменение массового расхода компонента при захолаживании жидкостью; *b* – захолаживание с уменьшенным расходом жидкости; *c* – захолаживание газом с низкой температурой; *d* – захолаживание парогазом; *e* – схема циркуляционного захолаживания и криостатирования

Fig. 2. Carrying options of cooling highways PU and TB: *a* – the change in mass flow of the component when the cooling down the liquid; *b* – cooling down with a reduced consumption of liquid; *c* – cooling gas with low temperature; *d* – cooling down steam-gas; *e* – diagram of the circulation of cooling and cryostatting

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Анализ рассмотренных схем и режимов захолаживания показывает, что в криогенных системах в основном используются:

– схемы захолаживания паром, малым расходом и большим расходом жидкости в системах подачи ИС;

– холодным гелием, парожидкостным потоком и применением циркуляционной схемы при предстартовом захолаживании в системах ДУ.

Захолаживание горячих элементов криогенных систем происходит как в условиях интенсивного парообразования при кипении, так и при конвективном охлаждении однофазными газовыми или жидкостными средами [2].

Температура жидкости при кипении изменяется от температуры тройной точки до критической температуры ($T_{тр} < T < T_{кр}$).

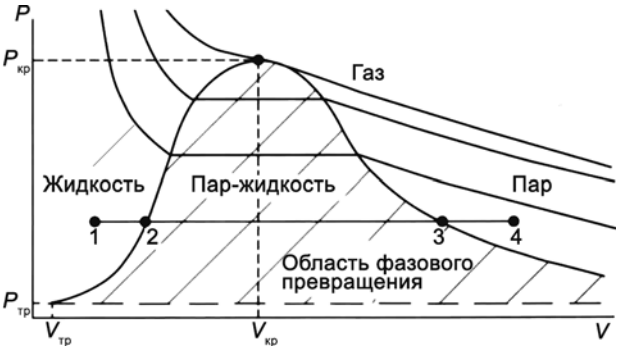


Рис. 3. *P–V*-диаграмма среды
Fig. 3. *P–V*-diagram environment

Рис. 4. Кривая насыщения:
$P_{тр}$, $T_{тр}$ – давление и температура в тройной точке;
$P_{кр}$, $T_{кр}$ – давление и температура в критической точке
Fig. 4. Saturation curve:
$P_{тр}$, $T_{тр}$ – pressure and temperature at the triple point;
$P_{кр}$, $T_{кр}$ – pressure and temperature at the critical point

На рис. 3 и 4 показаны *P–V*-диаграмма среды и кривая насыщения.

Заштрихованная область на рис. 3 определяет термодинамические параметры, где возможны процессы фазового превращения, т.е. возможна реализация процессов кипения или конденсации.

Используются следующие виды кипения.

1. По типу конвекции. Кипение при свободной конвекции (при естественной конвекции, кипение в большом объеме) и кипение при вынужденной конвекции (при вынужденном течении жидкости).

2. По температуре жидкости (рис. 5)

Рис. 5. Кипение в большом объеме: *a* – кипение насыщенной жидкости; *b* – кипение недогретой жидкости
Fig. 5. Boiling in a large volume: *a* – boiling of saturated liquid; *b* – boiling of subcooled liquid

Кипение насыщенной жидкости – когда температура жидкости равна или незначительно превышает температуру насыщения (рис. 5, *a*). Кипение недогретой жидкости (местное или поверхностное кипение) – когда температура жидкости меньше температуры насыщения (рис. 5, *b*). Под недогревом жидкости понимают разность температуры насыщения ($T_ж - T_s$) и температуры жидкости. Величина недогрева жидкости определяет потенциальную способность конденсации пара на межфазной поверхности, которая определяется отводом тепла в толщу жидкости.

3. По условиям взаимодействия с теплоотдающей поверхностью. В зависимости от температуры и теплофизических свойств теплоотдающей поверхности могут реализовываться пузырьковое, переходное или пленочное кипение, как показано на рис. 6.

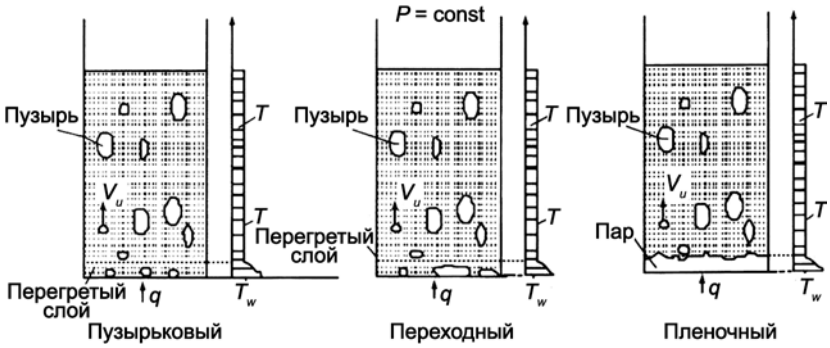


Рис. 6. Режимы кипения на теплоотдающей поверхности: *q* – плотность теплового потока; T_w – температура теплоотдающей поверхности; *T* – температура среды; V_u – скорость всплытия пузырей; *P* – давление
Fig. 6. Boiling regimes on heat-transfer surfaces: *q* – heat flux density; T_w – temperature heat-transfer surface; *T* – temperature of the medium; V_u – the speed of ascent of bubbles; *P* – pressure;

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Указанные виды кипения встречаются как при естественной, так и при вынужденной конвекции жидкости. Пленочное кипение характеризуется образованием пленки пара, обладающей большим тепловым сопротивлением, которая препятствует контакту жидкости с поверхностью нагрева и передаче энергии к жидкости. При пленочном кипении в условиях вынужденной конвекции в трубе движение жидкости или парожидкостного потока происходит в центре, а на стенке существует кольцевой слой пара.

Пузырьковое кипение при вынужденной конвекции сопровождается движением жидкости вдоль горячей поверхности; при этом пузыри, отрываясь от теплоотдающей поверхности, увлекаются ядром потока.

При кипении с недогревом (рис. 7, *a*) возможна полная или частичная конденсация пузырей. Кипение насыщенной жидкости (рис. 7, *b*) при вынужденной конвекции сопровождается слиянием и дроблением пузырей.

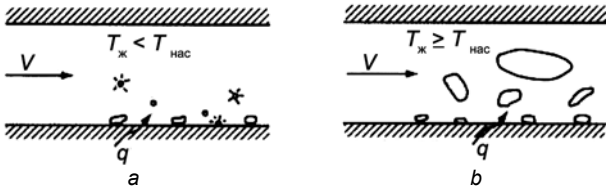


Рис. 7. Кипение при вынужденной конвекции: *a* – кипение при недогреве (местное или поверхностное кипение); *b* – кипение насыщенной жидкости (кипение с движением пара в ядре потока)
Fig. 7. Boiling with forced convection: *a* – boiling in the subcooling (local or surface boiling); *b* – boiling of saturated liquid (boiling with the movement of vapor in the flow core)

Термограмма захолаживания элемента конструкции магистрали I в виде конвекции – кривая захолаживания показана на рис. 8. Дальнейшее охлаждение элемента конструкции магистрали происходит при естественной или вынужденной конвекции жидкости.

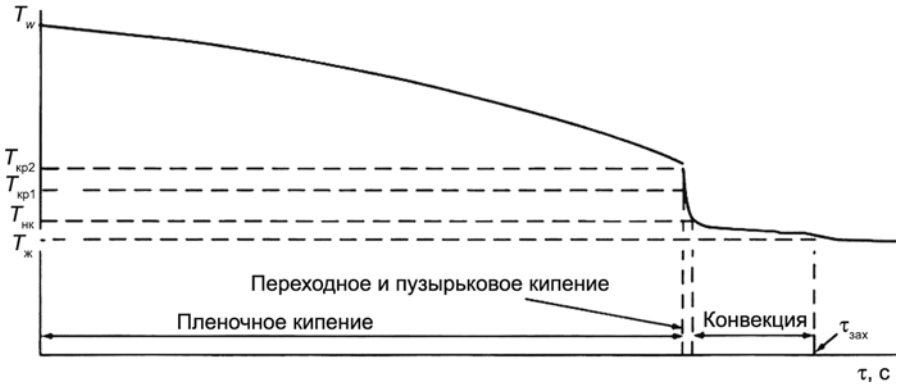


Рис. 8. Кривая захолаживания: $T_ж$ – температура жидкости на входе в систему; τ – время захолаживания
Fig. 8. The curve of cooling: $T_ж$ – temperature fluid at the inlet of the system; τ – the time of cooling

Рис. 9. Режимы течения парожидкостного потока в элементе магистрали при захолаживании
Fig. 9. Flow regimes of liquid-vapor flow in the element of the highway when cooling down

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

В зависимости от параметров процесса захолаживания (расхода G, давления подачи P, температуры жидкости T, температуры стенок магистрали T_w, ее геометрии) в магистрали возникают различные режимы течения парожидкостного потока, представленные на рис. 9.

При пленочном кипении можно выделить стержневые, переходные, дисперсно-кольцевые, дисперсные структуры потока. Они могут существовать как по всей длине магистрали, так и в отдельных элементах системы.

Результаты экспериментальных исследований процессов захолаживания и запуска ДУ РБ 12КРБ

Магистрали двигателя и расходные магистрали ДУ состоят из соединенных между собой прямых гладких труб, клапанов, насосов, фильтров, колен и т.п., произвольно ориентированных относительно вектора массовых сил, действующих на блок**.** Принципиальная схема водородной магистрали разгонного блока 12КРБ представлена на рис. 10 [3, 4].

Она состоит из бака, байпасной магистрали с клапаном 01 и жиклером 02, байпасной магистрали газового захолаживания 2.1-2.7, расходной магистрали ДУ 1.1-1.10 и расходной магистрали двигателя 1.11-1.17. Сечение «Д» определяет принадлежность участков магистрали между РБ и двигателем.

Диаметр расходной магистрали составляет 60-70 мм. Элемент 1.17 (см. рис. 10) является изолирующим соплом магистрали, обеспечивающим дренаж потока в космическое пространство. Бустерные насосы магистралей водорода и кислорода установлены в баках.

Большие проблемы возникают при стендовой отработке процессов захолаживания ДУ, так как при этом не удается полностью имитировать условия полета. При стендовых испытаниях необходим обдув газообразным азотом двигательного отсека, что приводит к существенному прогреву магистралей и элементов двигателя, установленных за насосами, по сравнению с условиями полета. Значительно отличаются также стендовые и полетные перегрузки, температуры и давления компонентов в баках и т.п. Поэтому длительность предпусковых операций захолаживания в стендовых условиях может превышать полетные значения в 5-10 раз. Отработку предпусковых операций решают математическим моделированием процессов захолаживания с использованием верифицированных программных комплексов (ПК), разработанных в МАИ под руководством В.П. Фирсова [4, 5]. В расчетной модели рассматриваются основные уравнения сохранения массы и энергии применительно к магистралям питания, газовой подушке бака и объему бака, заполненного криогенной жидкостью. По результатам стендовых и летных испытаний ДУ уточняются коэффициенты замыкающих зависимостей по теплоотдаче и трению в теплоемких элементах (насосах, клапанах и т.п.).

Перед запуском двигателя происходит подготовка трактов РБ в три этапа: 1 – предстартовое захолаживание; 2 – предпусковое захолаживание; 3 – заливка магистралей.

На этапе 1 начинается процесс предстартового захолаживания двигателя и расходных магистралей. Для этого от наземных систем в магистраль подается газообразный гелий с температурой 50-75 К и массовым расходом 7-8 г/с. Гелий подается под давлением 4-6 бар через жиклеры диаметром 5 мм, а дренируется на входе в бустерные насосы, т.е. направление потока гелия противоположно направлению движения водорода и кислорода в двигатель. Через 30-45 минут температура конструкции трактов двигателя и расходных магистралей снижается ниже 100 К.

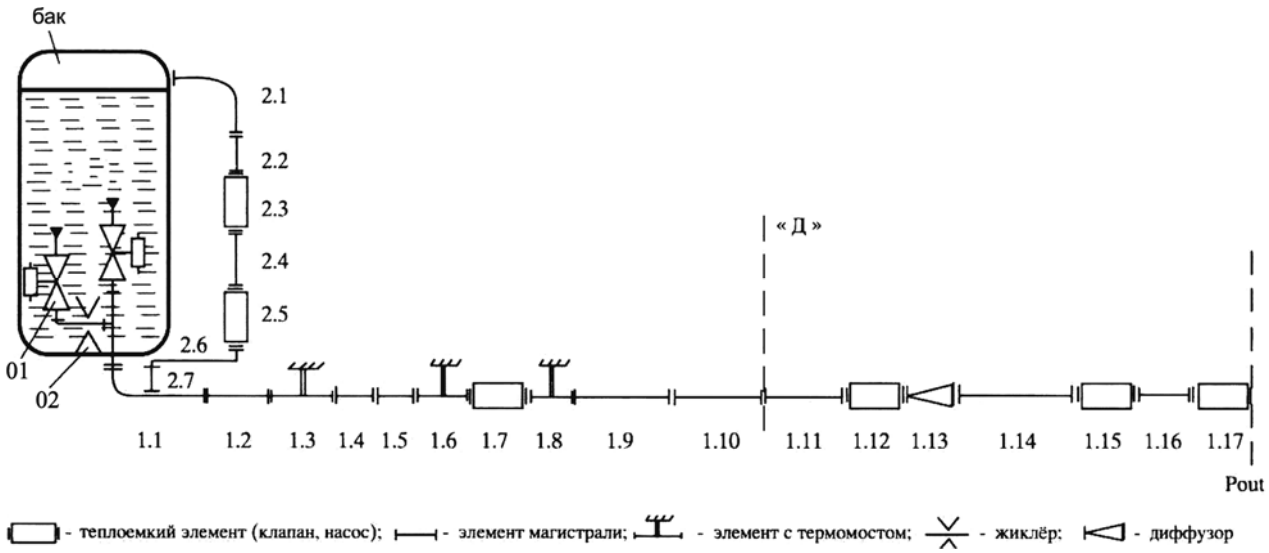


Рис. 10. Схема водородной магистрали блока 12КРБ
Fig. 10. The scheme of the hydrogen highway block 12 KRB

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Этап 2 начинают через 90 с после старта РН. Для этого жидкие водород и кислород подаются через байпасные магистрали малого диаметра на вход в основные магистрали двигателя за бустерными насосами. Байпасные магистрали с клапанами и жиклерами располагаются в баках и погружены в жидкость. На выходе из дренажных магистралей РБ установлены изолирующие устройства, открывающиеся для сброса парового или парожидкостного потока в космическое пространство через специальные сопла. Массовый расход водорода не превышает 6-15 г/с, а кислорода 20-50 г/с. Снижение температуры конструкции от 100-120 К происходит за 120-500 с.

Технологии захолаживания трактов магистралей окислителя и горючего на втором этапе отличаются.

В магистраль горючего дополнительно к потоку жидкости, поступающей через байпасную магистраль, подается в течение 50-80 с водород из паровой подушки бака водорода (операция парожидкостного захолаживания). Газообразный водород поступает из бака с массовым расходом 8-20 г/с при температуре 25-50 К, образующийся при этом парожидкостный поток с массовым паросодержанием 0,3-0,8 обеспечивает захолаживание конструкции до температуры 40-60 К. Затем прекращается подача газообразного водорода и продолжается захолаживание только водородом через байпасную магистраль (этап жидкостного захолаживания малым расходом).

Захолаживание магистрали кислорода происходит синхронно с захолаживанием магистрали водорода.

При захолаживании с момента подачи жидкости или парожидкостного потока в магистраль происходит интенсивное испарение жидкости в условиях пленочного кипения, которое реализуется при температуре ее конструктивных элементов выше 25-50 К. Поэтому до 90% времени (при исходной температуре магистрали 100 К) захолаживание на водороде происходит при пленочном режиме кипения, а 10% – при переходном или пузырьковом кипении и конвективном охлаждении однофазной средой.

Пленочное кипение кислорода в магистрали поддерживается при температуре ее конструктивных элементов выше 110-130 К. Поэтому не более 10% времени (при исходной температуре магистрали, не превышающей 130 К) захолаживание кислородом происходит при пленочном режиме кипения, а 90% – при переходном или пузырьковом кипении и конвективном охлаждении однофазной средой.

По длине магистрали в процессе захолаживания из-за различия в массах элементов и коэффициентов теплоотдачи, а следовательно, скоростей захолаживания, возможно сочетание различных условий теплового взаимодействия потока со стенкой (пленочное, переходное, пузырьковое кипение). Одновременно по длине магистрали могут существовать пленочное кипение в теплоемких элементах магистралей, переходное или течение однофазной жидкости в трубах.

Образующийся парожидкостный поток за счет испарения на стенке канала и «самоиспарения» (кипение за счет падения давления) после открытия клапана подачи жидкости перемещается к выходу из магистрали с постоянным ускорением. «Самоиспарение» жидкости возникает, если температура жидкости из-за падения давления по длине магистрали может оказаться выше температуры насыщения. В процессе заполнения магистралей изменение расхода определяется потерями на ускорение потока, потерями на преодоление сил трения на стенке канала, гидравлическими потерями в местных сопротивлениях, а также преодолением инерционных сил, возникающих за счет присоединенной массы жидкости от емкости хранения до клапана подачи жидкости в магистраль.

Давление в магистралях меняется незначительно при проведении операции их заполнения (менее 10-20% от абсолютной величины начального значения) до момента прохождения парожидкостным фронтом первого определяющего местного сопротивления (обычно диффузора насоса, клапана, форсунки или изолирующего устройства – сопла). С этого момента начинается интенсивный рост давления в магистрали и происходит резкое повышение давления (гидроудар при малых величинах объемного паросодержания). Если в этот момент давление в магистрали превышает давления подачи, то возможен обратный выброс парожидкостного потока из магистрали («гейзерный» эффект). После выброса процесс заполнения повторяется. Поскольку на стадии «заливки» расходных магистралей блока температура элементов конструкций незначительно превышает температуру жидкостей в баках, то обратного выброса не происходит.

В местных сопротивлениях (клапан подачи, диффузор насоса, клапаны за насосом ТНА, диафрагмы, сопла) возможна реализация критического и докритического режимов течения потока.

По мере охлаждения магистрали увеличивается расход (снижаются гидравлические потери в «горячей» части магистрали), уменьшается амплитуда пульсаций давления и расхода.

Тепловое состояние магистрали и ее гидравлические характеристики взаимосвязаны. Только в ограниченных случаях расход можно считать независимым от процесса захолаживания (организация критического истечения через форсунки, клапаны и т.п. на входе в магистраль).

На заключительном этапе 3 за 5-20 секунд до запуска двигателя закрываются клапаны подачи жидкого водорода и кислорода через байпасные магистрали и открываются расходные клапаны магистралей. С этого момента начинается операция заполнения магистралей компонентом (операция «заливка»). Массовый расход достигает максимального значения, и происходит дозахолаживание всех элементов расходных магистралей, насосов ТНА и агрегатов. Дозахолаживание магистралей и их заполнение со-

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

провождается снижением объемного паросодержания на входе в насосы ТНА от 0,7 до 0. При этом к 280-й секунде на входе и в полости основного насоса горючего находится жидкость с минимальными паровыми включениями (менее 3%).

Результаты изменения основных параметров предпускового захолаживания магистралей блока 12КРБ представлены на рис. 11.

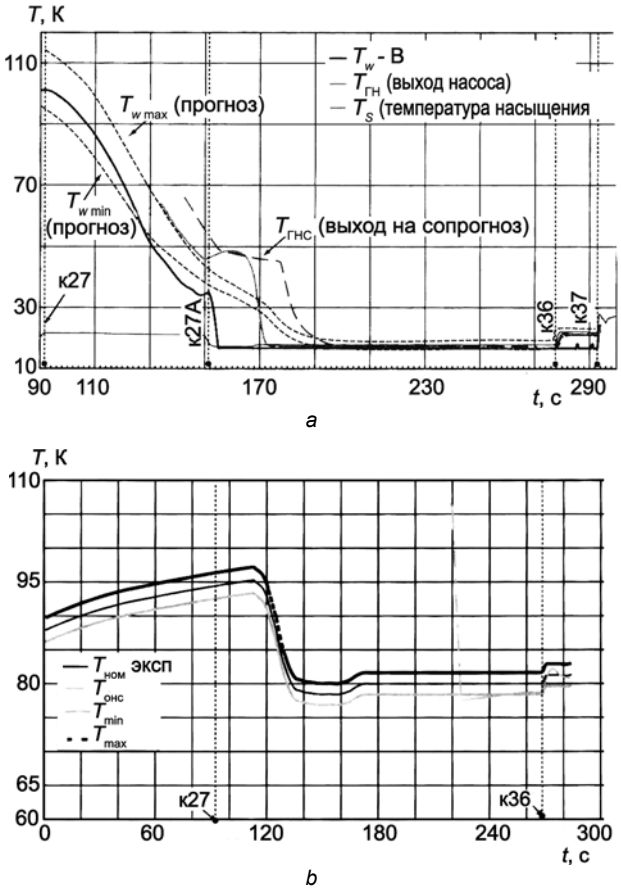


Рис. 11. Захолаживание расходных магистралей блока: *a* – водородной магистрали; *b* – кислородной магистрали: T_w – температура стенки магистрали; $T_{гн}$ и $T_{он}$ – температура среды на выходе из насоса

Fig. 11. The cooling down of expenditure highways unit: *a* – the hydrogen highway; *b* – oxygen backbone: T_w – temperature wall of the trunk; $T_{гн}$ and $T_{он}$ – medium temperature at the outlet of the pump

На рис. 12 представлена сравнительная оценка захолаживания таких элементов магистрали, как насос, расходомер, клапан и изолирующий элемент.

Видно, что максимальное время захолаживания приходится на насос, в то время как изолирующий элемент и клапан, установленные за насосом, захолаживаются раньше, чем насос.

С 90-й по 268-ю секунды (команда “36”) происходит захолаживание жидкостью, поступающей через байпасную магистраль с массовым расходом 35–45 г/с. К 140-й секунде полета температура магистрали близка к температуре насыщения кислорода.

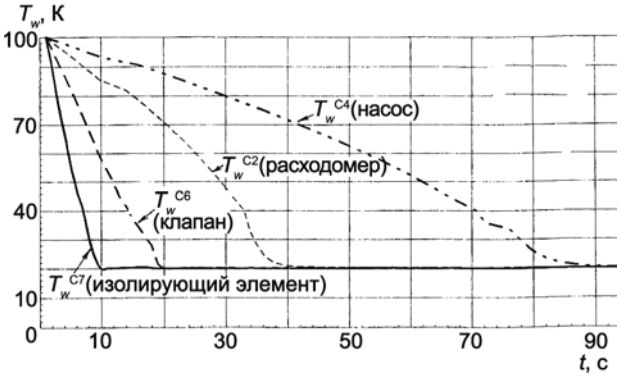


Рис. 12. Результаты расчета захолаживания различных элементов водородной магистрали в полете через байпасную магистраль

Fig. 12. The results of the calculation of cooling of the various elements of the hydrogen highway in flight through the bypass line

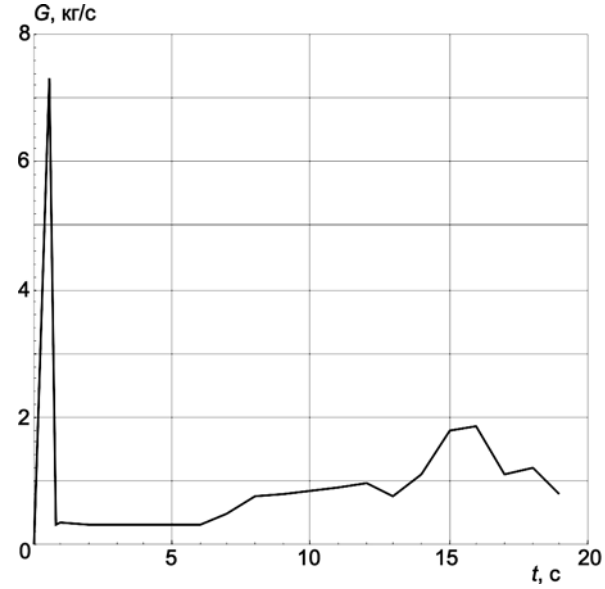


Рис. 13. Результаты расчета изменения массового расхода кислорода при «заливке» магистрали

Fig. 13. The results of the calculation of the change of mass flow of oxygen when the “filling” of the highway

После подачи команды “36” на выполнение операции заливки магистрали (открывается расходный клапан окислителя) происходит заполнение магистрали в течение 15 секунд. При этом происходит дозахолаживание стенок магистрали до температуры жидкости в баке. На рис. 13 показано, как изменяется массовый расход кислорода после открытия расходного клапана кислорода. Видно, что в первые полсекунды происходит резкое увеличение расхода до момента достижения жидкостным фронтом сечения выходного диффузора сопла. Процесс заполнения является нестационарным по расходу и стабилизируется через 7-10 секунд, т.е. после дозахолаживания насоса и теплоемких элементов за насосом.

International Publishing House for scientific periodicals “Space”
Международный издательский дом научной периодики “Спейс”

Таблица 1
Показатели захолаживания водородных магистралей
Table 1
Indicators of cooling hydrogen highways

Параметр	Значение
Продолжительность жидкостного захолаживания магистрали водорода, с	127
Температура стенки расходной магистрали перед насосом, К	18
Температура среды на выходе из основного насоса «Г» ($T_{гн}$), К	17
Давление в расходной магистрали водорода, бар	0,38-0,46
Затраты жидкого водорода на захолаживание, кг	1,3

Таблица 2
Показатели захолаживания кислородных магистралей
Table 2
Indicators of cooling oxygen highways

Параметр	Значение
Продолжительность жидкостного захолаживания магистрали кислорода, с	187
Температура стенки расходной магистрали перед насосом, К	79
Температура среды на выходе из основного насоса «О» ($T_{он}$), К	79
Давление в расходной магистрали кислорода, бар	0,5
Затраты жидкого кислорода на захолаживание, кг	8,4

В табл. 1 и 2 представлены результаты испытаний РБ 12КРБ в полете при захолаживании расходных водородных и кислородных магистралей.

Выводы

Таким образом, по результатам расчетно-экспериментальных исследований процессов теплообмена и захолаживания криогенных систем можно сделать следующие выводы:

1. В криогенных системах в основном используются:

– схемы захолаживания паром, малым расходом и большим расходом жидкости в системах подачи ИС;

– холодным гелием, парожидкостным потоком и применением циркуляционной схемы при предстартовом захолаживании в системах ДУ.

2. Для сокращения расхода криогенного компонента – водорода на захолаживание расходных магистралей ДУ и продолжительности процесса целесообразно при предстартовом захолаживании использовать газообразный гелий, охлажденный до температуры 20-21 К.

3. В процессе проведения захолаживания необходимо контролировать температуры среды на входе в насос и температуру стенки магистрали питания.

4. Результаты исследований процессов захолаживания расходных водородных и кислородных магистралей, полученные при стендовых и летных испытаниях РБ 12КРБ, могут быть использованы для верификации компьютерных моделей расчета криогенных систем ИС и ДУ.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Список литературы

1. Галеев А.Г., Денисов К.П., Ищенко В.И., Лисейкин В.А., Сайдов Г.Г., Черкашин А.Ю. Испытательные комплексы и экспериментальная отработка жидкостных ракетных двигателей / под ред. Н.Ф. Моисеева. М.: Машиностроение/Машиностроение-Полет, 2012.

2. Костюк В.В., Фирсов В.П. Теплообмен и гидродинамика в криогенных двигательных установках. М.: Наука, 2015.

3. Гордеев В.А., Партола И.С., Фирсов В.П., Иванов В.П. Оптимизация процесса отработки ПГСП ракет и разгонных блоков / Научно-технические разработки КБ «Салют», 2006-2008. М.: Машиностроение, 2010. С. 284-291.

References

1. Galeev A.G., Denisov K.P., Iŝenko V.I., Lisejkin V.A., Sajdov G.G., Čerkašin A.Û. Ispytatel'nye kompleksy i èksperimental'naâ otrabotka židkostnyh raketnyh dvigatelej / pod red. N.F. Moiseeva. M.: Mašinostroenie/Mašinostroenie-Polet, 2012.

2. Kostûk V.V., Firsov V.P. Teploobmen i gidrodinamika v kriogennyh dvigatel'nyh ustanovkah. M.: Nauka, 2015.

3. Gordeev V.A., Partola I.S., Firsov V.P., Ivanov V.P. Optimizaciâ processa otrabotki PGSP raket i razgonnyh blokov / Naučno-tehničeskie razrabotki KB «Salût», 2006-2008. M.: Mašinostroenie, 2010. S. 284-291.

4. Гордеев В.А., Фирсов В.П. Комплект математических моделей ПГСП криогенного разгонного блока / Научно-технические разработки ОКБ-23 – КБ «Салют». М.: Воздушный транспорт, 2006. С. 320-333.

5. http://www.flowvision.ru.

6. Пригожин В.И., Коваль А.И., Савич А.Р. Опыт применения водорода в ОАО КБХА при проведении испытаний жидкостных ракетных двигателей, их агрегатов и энергоустановок // Альтернативная энергетика и экология – ISJAEE. 2008. № 3. С. 87-94.

7. Техника низких температур. Под ред. Е.И. Микулина, И.В. Марфениной, А.М. Архарова. М.: «Энергия», 1975.

8. Fredrik Hellström. Numerical computations of the unsteady flow in a radial turbine. March 2008 Technical Reports from Royal Institute of Technology KTH Mechanics. SE-100 44 Stockholm, Sweeden.

4. Gordeev V.A., Firsov V.P. Komplekt matematičeskih modelej PGSP kriogennogo razgonnogo bloka / Naučno-tehničeskie razrabotki OKB-23 – KB «Salût». M.: Vozdušnyj transport, 2006. S. 320-333.

5. http://www.flowvision.ru.

6. Prigožin V.I., Koval' A.I., Savič A.R. Opyt primeneniâ vodoroda v OAO KBHA pri provedenii ispytanij židkostnyh raketnyh dvigatelej, ih agregatov i ènergoustanovok // Al'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ – ISJAEE. 2008. № 3. C. 87-94.

7. Tehnika nizkih temperatur. Pod red. E.I. Mikulina, I.V. Marfeninoj, A.M. Arharova. M.: «Ènergiâ», 1975.

8. Fredrik Hellström. Numerical computations of the unsteady flow in a radial turbine. March 2008 Technical Reports from Royal Institute of Technology KTH Mechanics. SE-100 44 Stockholm, Sweeden.

Транслитерация по ISO 9:1995

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"