

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 629.7.085, 629.764.7

DOI 10.18698/0536-1044-2017-4-86-95

Аналитическая модель эффективной технологии температурной подготовки ракетного топлива в емкостях заправочных систем наземных комплексов

А.А. Александров, И.В. Бармин, С.К. Павлов, В.В. Чугунков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

An Analytical Model of the Effective Technology for Thermal Preparation of Rocket Propellant in Tanks of Filling Systems of Ground-Based Complexes

A.A. Aleksandrov, I.V. Barmin, S.K. Pavlov, V.V. Chugunkov

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: rector@bmstu.ru, sm8@sm8.bmstu.ru



Температурная подготовка ракетного топлива, предшествующая его заправке в топливные баки ракет-носителей, разгонных блоков и космических аппаратов, является одним из самых энергоемких и длительных процессов, происходящих на стартовых и технических комплексах космодромов. При проведении такой подготовки необходимо применять эффективные технологии и режимы охлаждения (нагрева) ракетного топлива. Для прогнозирования проектных и эксплуатационных характеристик систем температурной подготовки предпочтительнее использовать аналитические модели, позволяющие определять параметры процессов охлаждения (нагрева) топлива при конкретных условиях и требованиях к выполнению этой операции оборудованием наземных комплексов. Представлена аналитическая модель эффективной технологии температурной подготовки ракетного топлива в емкостях заправочных систем наземных комплексов, где его охлаждение (нагрев) осуществляется в теплообменнике при теплообмене в емкости с антифризом. Процесс охлаждения топлива основан на барботаже антифриза жидким азотом, а режим нагрева обеспечен электронагревательными элементами, размещенными в емкости с антифризом. Приведены расчетные зависимости и результаты моделирования температуры топлива в емкости заправочной системы, а также относительных затрат жидкого азота при выполнении операции охлаждения в сравнении с другими технологиями.

Ключевые слова: ракетное топливо, температурная подготовка, охлаждение и нагрев, резервуар с антифризом, теплообменник в антифризе, жидкий азот.



Thermal preparation of rocket propellant prior to filling the tanks of launch vehicles, upper stages and spacecraft, is among the most energy-intensive and lengthy processes tak-

ing place at launch pads and technical areas of launch sites. The thermal preparation stage requires the use of efficient technologies and modes of cooling (heating) rocket fuel. To forecast the design and performance characteristics of the thermal preparation systems, analytical models are preferred. They allow the determination of parameters of the fuel cooling (heating) processes under specific conditions and requirements defined by the equipment of ground-based systems. This paper presents an analytical model of the effective technology of rocket propellant thermal preparation in the tanks of ground-based filling systems where the propellant is cooled (heated) in a heat exchanger, with the heat exchange process taking place in the tank with antifreeze. The cooling process of the propellant is based on bubbling of the antifreeze by liquid nitrogen; and the heating mode is provided by electric heating elements placed in the tank with the antifreeze. The calculated dependencies and the results of modelling the propellant temperature in filling tanks are presented, as well as relative consumption of liquid nitrogen in the cooling process as compared with other technologies.

Keywords: rocket fuel, thermal preparation, cooling and heating, tank with antifreeze, heat exchanger in antifreeze, liquid nitrogen.

Требования, предъявляемые к ракетному топливу перед заправкой топливных баков ракетносителей, разгонных блоков и космических аппаратов, предполагают выполнение подготовительных операций с компонентами ракетного топлива (КРТ) технологическим оборудованием наземных комплексов. Одной из таких операций является температурная подготовка КРТ, обеспечивающая охлаждение (нагрев) топлива до требуемой температуры.

Подготовку КРТ по температуре в емкостях наземных комплексов можно осуществлять с помощью встроенных во внутреннее пространство и внешних по отношению к емкости теплообменников, используя в качестве теплопередающих сред антифриз, воздух или жидкий азот (ЖА) [1]. При проведении такой подготовки необходимо применять эффективные технологии и режимы охлаждения (нагрева) ракетного топлива.

Обзор информационных источников. Вопросы создания и многофакторного анализа систем подготовки ракетного топлива, входящих в состав оборудования наземных комплексов, рассмотрены в работах [1–6]. В ряде статей по температурной подготовке топлива [7–9] отмечена возможность использования для охлаждения КРТ жидкого азота, получаемого из воздуха при производстве на космодромах жидкого кислорода, широко применяемого в ракетах космического назначения (РКН) в качестве окислителя вместе с углеводородными горючими и жидким водородом. В стартовом оборудовании РКН «Зенит-3SL», «Союз» и «Рокот» используются три варианта построения систем

охлаждения, основанных на теплообменных процессах с ЖА [1, 9, 10]: непосредственный ввод ЖА через барботер в резервуар хранения КРТ; бесконтактное охлаждение топлива кипящим ЖА в теплообменнике; понижение температуры КРТ путем теплообмена в теплообменнике с антифризом, охлаждаемым в отдельном резервуаре при барботаже ЖА.

Характеристики систем температурной подготовки с охлаждением ракетного горючего при непосредственной подаче ЖА в емкости с углеводородным ракетным топливом, а также особенности взаимодействия криогенных жидкостей с жидкими средами, рассмотрены в публикациях [10–16]. В работах [3, 7, 11] показана эффективность технологии охлаждения топлива методом криогенного барботажа по относительным затратам ЖА и времени выполнения операции охлаждения. Однако возможность охлаждения КРТ при подаче ЖА в массу топлива применима только к углеводородным ракетным горючим (керосину, нафтилу, синтину).

В статьях [1, 3, 7] приведены схемы построения и аналитические модели систем охлаждения кипящим ЖА с использованием внешних по отношению к емкости с КРТ теплообменников типа «труба в трубе». Проблемными вопросами охлаждения КРТ кипящим ЖА в теплообменниках являются возможность кристаллизации топлива на охлажденных поверхностях и недоиспользование охлаждающей способности испаряющегося азота вследствие ограничений скорости его течения в каналах секций теплообменников [3], что приводит к повышенному расходу ЖА на проведение операции охлаждения КРТ.

Публикации [9, 10, 16] посвящены описанию схемных построений, моделей и характеристик систем температурной подготовки КРТ, в которых их охлаждение реализовано путем теплообмена топлива во внешних по отношению к емкости с КРТ теплообменниках с антифризами, охлаждаемыми при барботаже ЖА. В представленных схемах предусмотрены два контура циркуляции через теплообменник топлива и антифриза при использовании двух насосов, выделяющих в процессе работы теплоту, что также приводит к повышенному расходу ЖА на выполнение операции охлаждения КРТ.

В статье [17] рассмотрено построение одноконтурной системы охлаждения КРТ с применением теплообменника, помещенного в резервуар с антифризом, охлаждаемым путем барботажа ЖА, в котором использован только один насос. Предложенная авторами технология охлаждения применима для любых КРТ и обладает большей эффективностью по относительным затратам ЖА и времени на выполнение операции подготовки по сравнению с теми системами, в которых топливо охлаждается с помощью жидкого азота и теплообменника. Рассмотренные в публикациях [10, 16, 17] модели, основанные на численной реализации определений характеристик процессов охлаждения КРТ, предпочтительнее использовать для про-

ведения поверочных расчетов систем температурной подготовки ракетного топлива.

Постановка задачи. Для выполнения проектных и эксплуатационных расчетов характеристик одноконтурной системы подготовки КРТ повышенной эффективности лучше применять аналитическую модель, которая позволит определять необходимые значения расхода и массы ЖА, а также времени охлаждения (нагрева) топлива при конкретных условиях и требованиях к выполнению операции его температурной подготовки в емкостях заправочных систем наземных комплексов.

Цель работы — разработка аналитической модели одноконтурной системы температурной подготовки ракетного топлива в емкостях заправочных систем наземных комплексов, основанной на аналитических решениях уравнений теплообмена и позволяющей определять режимные параметры процессов такой подготовки при проектировании и эксплуатации систем заправки РКН, разгонных блоков и космических аппаратов.

На рис. 1 приведена схема системы заправки РКН с реализацией эффективной технологии температурной подготовки КРТ в емкости заправочной системы с использованием теплообменника, размещенного в резервуаре с антифризом, который охлаждается путем барботажа

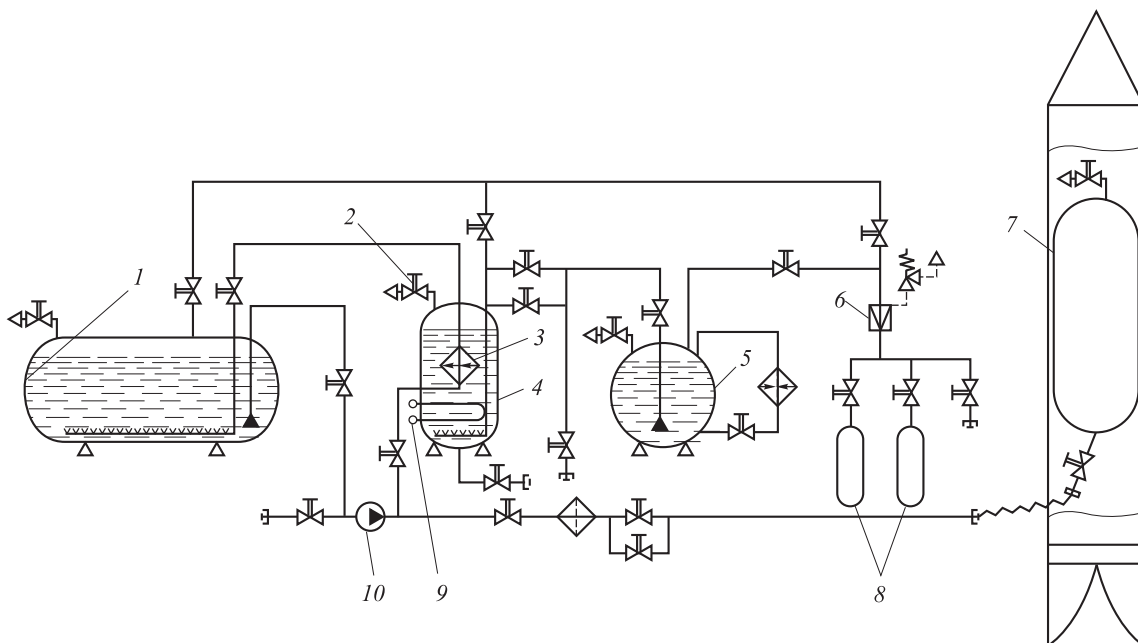


Рис. 1. Схема системы заправки РКН с температурной подготовкой КРТ с использованием теплообменника, размещенного в резервуаре с антифризом, который охлаждается путем барботажа ЖА и нагревается с помощью электрических нагревателей

ЖА и нагревается с помощью трубчатых электрических нагревателей.

Температурная подготовка КРТ в емкости хранилище 1 перед заправкой топливных баков 7 РКН осуществляется в теплообменнике 3, размещенном в резервуаре с антифризом 4, путем циркуляции топлива через теплообменник при работе насоса 10 и теплообмена с антифризом. Режим охлаждения КРТ происходит при теплообмене с антифризом, охлаждаемым путем барботажа жидкого азота, который поступает из резервуара 5 при подаче в него под давлением газообразного азота из хранилища 8 через газовый редуктор 6. ЖА через барботер вводится в нижнюю часть резервуара 4 и вследствие теплообмена с антифризом переходит в газообразное состояние в виде множества азотных пузырей, которые при движении к поверхности антифриза обеспечивают его интенсивное охлаждение и перемешивание, интенсифицируя теплообмен на внешней поверхности теплообменника 3. При этом из резервуара 4 газообразный азот отводится через дренажный клапан 2 в соответствующую магистраль заправочной системы. Режим нагрева КРТ происходит при теплообмене с антифризом, нагретым с помощью трубчатых электрических нагревателей 9, установленных в резервуаре 4.

Модели температурной подготовки КРТ в емкостях заправочных систем наземных комплексов с использованием предложенной технологии. Температурная подготовка КРТ начинается с охлаждения (нагрева) антифриза до температуры, при которой гарантированно исключается фазовый переход топлива на внутренних поверхностях теплообменника.

Процесс охлаждения антифриза при барботаже ЖА с постоянным расходом в предположении о квазистационарности теплообмена с окружающей средой резервуара, заполненного антифризом, можно представить уравнением

$$k_{p,ан} F_{p,ан} (T_{у,н} - T_{ан}) - G_a [r_a + c_a (T_{ан} - T_{к,а})] = (m_{ан} c_{ан} + m_{p,ан} c_{p,ан} + m_t c_t + m_n c_n) \frac{dT_{ан}}{d\tau}, \quad (1)$$

где $k_{p,ан}$ и $F_{p,ан}$ — коэффициент теплопередачи и площадь поверхности резервуара антифриза; $T_{у,н}$ — условная наружная температура, $T_{у,н} = T_n + A_{н,р,а} q_c / \alpha_{\Sigma н,р,а}$ (T_n — температура наружного воздуха; $A_{н,р,а}$ — поглощательная способность наружной поверхности резервуара

антифриза; q_c — средняя по поверхности резервуара антифриза плотность потока солнечной радиации; $\alpha_{\Sigma н,р,а}$ — суммарный коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности резервуара антифриза); $T_{ан}$ — температура антифриза; $G_a, r_a, c_a, T_{к,а}$ — массовый расход, удельная теплота кипения, удельная теплоемкость, температура кипения азота соответственно; $m_{ан}, m_{p,ан}$ и $c_{ан}, c_{p,ан}$ — массы и удельные теплоемкости антифриза и его резервуара соответственно; m_t, m_n и c_t, c_n — массы и удельные теплоемкости теплообменника и электрических нагревателей соответственно; τ — время.

Из уравнения (1) получены зависимости для определения времени охлаждения антифриза $\tau_{о,ан}$ от начальной температуры $T_{ан,н,о}$ до требуемой конечной $T_{ан,к,о}$:

$$\tau_{о,ан} = - \frac{m_{ан} c_{ан} \left(1 + \frac{m_{p,ан} c_{p,ан} + m_t c_t + m_n c_n}{m_{ан} c_{ан}} \right)}{k_{p,ан} F_{p,ан} + G_a c_a} \times \ln \frac{T_{ан,к,о} - T_{ан,п,о}}{T_{ан,н,о} - T_{ан,п,о}}, \quad (2)$$

где

$$T_{ан,п,о} = \frac{k_{p,ан} F_{p,ан} T_{у,н} - G_a r_a + G_a c_a T_{к,а}}{k_{p,ан} F_{p,ан} + G_a c_a}. \quad (3)$$

Процесс нагрева антифриза в предположении о квазистационарности теплообмена с окружающей средой резервуара, заполненного антифризом, можно представить уравнением

$$Q_n - k_{p,ан} F_{p,ан} (T_{ан} - T_n) = (m_{ан} c_{ан} + m_{p,ан} c_{p,ан} + m_t c_t + m_n c_n) \frac{dT_{ан}}{d\tau}, \quad (4)$$

где Q_n — мощность трубчатых электрических нагревателей.

Из уравнения (4) определяется зависимость для вычисления времени нагрева антифриза $\tau_{н,ан}$ до требуемой температуры при задании мощности трубчатых электрических нагревателей Q_n

$$\tau_{н,ан} = - \frac{m_{ан} c_{ан} + m_{p,ан} c_{p,ан} + m_t c_t + m_n c_n}{k_{p,ан} F_{p,ан}} \times \ln \frac{T_{ан,к,н} - T_n - Q_n / (k_{p,ан} F_{p,ан})}{T_{ан,н,н} - T_n - Q_n / (k_{p,ан} F_{p,ан})}, \quad (5)$$

где $T_{ан,н,н}$ и $T_{ан,к,н}$ — начальная и конечная температура антифриза при выполнении операции нагрева.

Для проведения расчетов по зависимостям (2)–(5) предварительно находятся значения теплофизических характеристик антифриза и коэффициентов теплопередачи стенок его резервуара для средних температур, соответствующих операции охлаждения $\bar{T}_{ан.о} = (T_{ан.н.о} + T_{ан.к.о})/2$ и нагрева антифриза $\bar{T}_{ан.н} = (T_{ан.н.н} + T_{ан.к.н})/2$.

После достижения требуемой температуры антифриза включается насос заправочной системы, который прокачивает КРТ через теплообменник и возвращает топливо в емкость-хранилище системы заправки. При этом достигается охлаждение (нагрев) КРТ. В процессе температурной подготовки КРТ температура антифриза поддерживается на постоянном уровне путем изменения расхода ЖА в режиме охлаждения КРТ или мощности трубчатых электрических нагревателей в режиме нагрева КРТ.

Процесс охлаждения КРТ в емкости-хранилище системы заправки РКН при теплообмене с антифризом в теплообменнике, охлаждаемом при прямой подаче в антифриз ЖА через барботер в предположении о квазистационарности теплообмена емкости-хранилища с окружающей средой, можно представить уравнением

$$k_e F_e (T_{у.н} - T_k) \left(1 + \frac{\sum k_i F_i}{k_e F_e} \right) + Q_{н.з.с} - k_T F_T (T_k - T_{ан.к.о}) = (m_k c_k + m_e c_e + \sum m_i c_i) \frac{dT_k}{d\tau}, \quad (6)$$

где k_e и F_e — коэффициент теплопередачи и площадь поверхности емкости-хранилища; T_k — температура компонента топлива; k_i, F_i, m_i, c_i — коэффициент теплопередачи, площадь поверхности, масса и удельная теплоемкость элементов циркуляционного контура (трубопроводов, клапанов, насоса) КРТ соответственно; m_k, m_e и c_k, c_e — массы и удельные теплоемкости КРТ и емкости-хранилища КРТ соответственно; $Q_{н.з.с}$ — тепловой поток от насоса заправочной системы; k_T и F_T — коэффициент теплопередачи и площадь поверхности теплообменника.

Из уравнения (6) с учетом постоянства температуры антифриза определяются зависимости для оценки времени охлаждения КРТ $\tau_{о.к}$ от начальной температуры $T_{к.н.о}$ до требуемой конечной $T_{к.к.о}$:

$$\tau_{о.к} = - \frac{m_k c_k + m_e c_e + \sum m_i c_i}{k_e F_e \left(1 + \frac{\sum k_i F_i}{k_e F_e} \right) + k_T F_T} \ln \frac{T_{к.к.о} - T_{к.п.о}}{T_{к.н.о} - T_{к.п.о}}, \quad (7)$$

где

$$T_{к.п.о} = \frac{k_e F_e \left(1 + \frac{\sum k_i F_i}{k_e F_e} \right) T_{у.н} + Q_{н.з.с} + k_T F_T T_{ан.к.о}}{k_e F_e \left(1 + \frac{\sum k_i F_i}{k_e F_e} \right) + k_T F_T}. \quad (8)$$

При охлаждении КРТ для поддержания постоянной температуры в резервуаре с антифризом с учетом изменения температуры КРТ в соответствии с уравнением (7) необходимо обеспечить подачу ЖА в резервуар с антифризом с изменяемым массовым расходом

$$G_a = \frac{k_{р.а} F_{р.а} (T_{у.н} - T_{ан.к.о}) + k_T F_T (T_{к.п.о} - T_{ан.к.о})}{r_a + c_a (T_{ан} - T_{к.а})} + \frac{k_T F_T (T_{к.н.о} - T_{к.п.о}) e^{-A\tau}}{r_a + c_a (T_{ан} - T_{к.а})}, \quad (9)$$

где

$$A = \frac{k_e F_e \left(1 + \frac{\sum k_i F_i}{k_e F_e} \right) + k_T F_T}{m_k c_k + m_e c_e + \sum m_i c_i}. \quad (10)$$

Масса азота, необходимая для охлаждения КРТ от начальной температуры $T_{к.н.о}$ до требуемой конечной $T_{к.к.о}$, определяется по выражению

$$m_{а.к} = \int_0^{\tau_{о.к}} G_a d\tau = \frac{k_{р.а} F_{р.а} (T_{у.н} - T_{ан.к.о}) + k_T F_T (T_{к.п.о} - T_{ан.к.о})}{r_a + c_a (T_{ан.к.о} - T_{к.а})} \tau_{о.к} + \frac{k_T F_T (T_{к.н.о} - T_{к.п.о})}{A [r_a + c_a (T_{ан.к.о} - T_{к.а})]} (1 - e^{-A\tau_{о.к}}). \quad (11)$$

Процесс нагрева КРТ в емкости-хранилище системы заправки РКН при теплообмене в теплообменнике с антифризом при подводе теплоты от трубчатых электрических нагревателей в предположении о квазистационарности теплообмена емкости-хранилища с окружающей средой, можно представить уравнением

$$k_T F_T (T_{ан.к.н} - T_k) + Q_{н.з.с} - k_e F_e (T_k - T_{н}) \times \left(1 + \frac{\sum k_i F_i}{k_e F_e} \right) = (m_k c_k + m_e c_e + \sum m_i c_i) \frac{dT_k}{d\tau}, \quad (12)$$

из которого определяется зависимость для времени нагрева КРТ $\tau_{н.к}$ от начальной температуры $T_{к.н.н}$ до требуемой конечной $T_{к.к.н}$:

$$\tau_{н.к} = - \frac{m_k c_k + m_e c_e + \sum m_i c_i}{k_e F_e \left(1 + \frac{\sum k_i F_i}{k_e F_e} \right) + k_T F_T} \ln \frac{T_{к.к.н} - T_{к.п.н}}{T_{к.н.н} - T_{к.п.н}}, \quad (13)$$

где

$$T_{к.п.н} = \frac{k_e F_e \left(1 + \frac{\sum k_i F_i}{k_e F_e} \right) T_n + Q_{н.з.с} + k_T F_T T_{ан.к.н}}{k_e F_e \left(1 + \frac{\sum k_i F_i}{k_e F_e} \right) + k_T F_T}. \quad (14)$$

Полученные зависимости являются основой для проведения расчетов и проектирования оборудования систем температурной подготовки КРТ.

Для выполнения расчетов по зависимостям (7)–(14) предварительно находят значения теплофизических характеристик КРТ и коэффициентов теплопередачи стенок емкости-хранилища заправочной системы для средних температур, соответствующих операции охлаждения $\bar{T}_{к.о} = (T_{к.н.о} + T_{к.к.о})/2$ и нагрева КРТ $\bar{T}_{к.н} = (T_{к.н.н} + T_{к.к.н})/2$.

Анализ результатов расчетов. На рис. 2 приведены результаты расчетов изменения температуры горючего РГ-1 в емкости заправочной системы и антифриза А-65 в резервуаре с расположенным в нем теплообменником при подаче ЖА через барботер в массу антифриза применительно к операции охлаждения горючего для последующей заправки его в топливный бак третьей ступени РКН «Союз» [7].

Как видно из рис. 2, общее время выполнения операции охлаждения горючего РГ-1 массой 10 500 кг от начальной температуры 34 °С до конечной –29 °С не превышает 6 ч, включая предварительный этап охлаждения антифриза

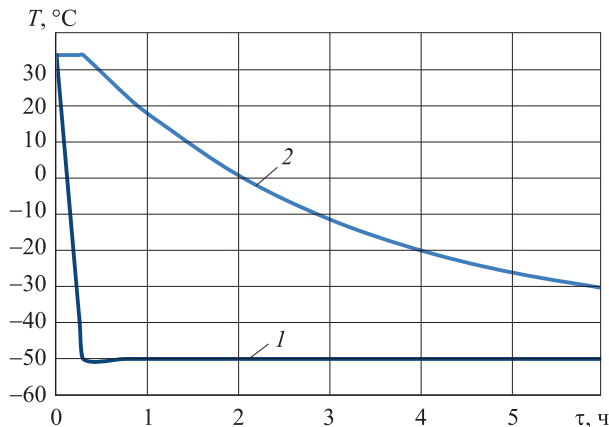


Рис. 2. Зависимость температуры T антифриза А-65 (1) и горючего РГ-1 (2) от времени охлаждения τ

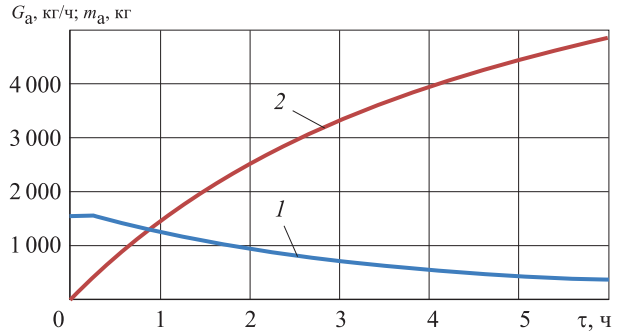


Рис. 3. Зависимость массового расхода G_a (1) и затрат m_a (2) ЖА от времени охлаждения τ горючего РГ-1 на стартовом комплексе «Союз»

до температуры –50 °С, что соответствует требованиям технического задания на разработку системы охлаждения горючего РГ-1 на стартовом комплексе РКН «Союз СТ» и адекватно согласуется с результатами численных вычислений [17].

На рис. 3 представлены результаты расчетов изменения массового расхода и затрат ЖА в разработанной системе при охлаждении горючего РГ-1.

В предложенном варианте системы общие затраты ЖА при охлаждении горючего РГ-1 массой 10 500 кг на 63 °С составили около 4 700 кг, что на 27 % меньше, чем в существующей системе охлаждения. При этом металлоемкость снижена более чем в 3 раза, а занимаемая площадь оборудования — в 10 раз.

Относительные затраты ЖА при охлаждении горючего РГ-1 на 1 К, полученные с использованием существующей системы охлаждения на стартовом комплексе «Союз» [7], составили 0,0098...0,0100 1/К, а вычисленные по зависимостям аналитической модели, — 0,0071 1/К. Сравнение значений относительных затрат свидетельствует об эффективности предлагаемой системы охлаждения КРТ, а также об ее технических и эксплуатационных преимуществах.

Выводы

1. Предложенный вариант системы температурной подготовки ракетного топлива в емкости заправочной системы с использованием теплообменника, размещенного в резервуаре с антифризом, который охлаждается путем барботажа ЖА и нагревается с помощью электрических нагревателей, имеет большую эффективность, а также улучшенные технические

и эксплуатационные показатели по сравнению с существующими системами температурной подготовки углеводородного ракетного горючего на стартовых комплексах РКН «Союз».

2. Результаты вычислений по разработанным зависимостям аналитической модели адекватно подтверждаются данными численного решения и по сравнению с ним значительно упрощают порядок выполнения проектных и эксплуатационных расчетов процессов температурной подготовки КРТ. Их применение поз-

воляет анализировать эффективность операций нагрева и охлаждения КРТ в зависимости от конструктивных параметров теплообменника, тепловой мощности нагревательных устройств, расхода азота, массы топлива, а также определять требуемую массу ЖА и время выполнения операции охлаждения (нагрева) топлива в процессе эксплуатации систем заправки стартовых комплексов при различных параметрах окружающей среды, начальных и требуемых конечных значениях температуры топлива.

Литература

- [1] Александров А.А., Гончаров Р.А., Игрицкий В.А., Чугунков В.В. Методика выбора рациональных режимов охлаждения углеводородного горючего стартовым оборудованием перед заправкой топливных баков ракеты-носителя. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, № 1, с. 40–46.
- [2] Денисов О.Е., Золин А.В., Денисова К.И. Методика проектирования базы хранения и подготовки высококипящих компонентов ракетного топлива космодрома «Восточный». *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 11. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/732218.html> (дата обращения 20 декабря 2016).
- [3] Александров А.А., Бармин И.В., Кунис И.Д., Чугунков В.В. Особенности создания и развития криогенных систем ракетно-космических стартовых комплексов «Союз». *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2016, № 2, с. 7–27.
- [4] Кобызев С.В. Методика расчета коэффициентов массоотдачи при осушке углеводородного ракетного топлива. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2011, № 11. URL: <http://technomag.neicon.ru/doc/245147.html> (дата обращения 20 декабря 2016).
- [5] Кобызев С.В. Моделирование массообменных процессов при обезвоживании углеводородного ракетного горючего барботированием азотом. *Актуальные проблемы российской космонавтики. Тр. XXXVI Академических чтений по космонавтике*, Москва, Комиссия РАН, 2012, с. 356–357.
- [6] Кобызев С.В. Методика поверочного расчета процесса осушки углеводородного горючего методом барботажа газообразным азотом. *Актуальные проблемы российской космонавтики. Тр. XXXVII Академических чтений по космонавтике*. Москва, Комиссия РАН, 2013, с. 385–386.
- [7] Денисова К.И., Золин А.В., Павлов С.К., Чугунков В.В. Анализ вариантов охлаждения компонентов ракетного топлива в составе оборудования наземных комплексов с использованием жидкого азота. *Сб. тез. XI Академических чтений по космонавтике*, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, с. 238–239.
- [8] Кобызев С.В., Золин А.В., Чугунков В.В. Построение рациональной схемы подготовки углеводородного горючего по температуре и влагосодержанию с использованием жидкого и газообразного азота на стартовом и техническом комплексах космодрома. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2012, № 10. URL: <http://technomag.neicon.ru/doc/486647.html> (дата обращения 20 декабря 2016).
- [9] Комлев Д.Е., Соловьев В.И. Охлаждение нефтила методом криогенного барботажа. *Новости техники: сб.*, Москва, КБТМ, 2004, с. 137–141.
- [10] Денисов О.Е., Золин А.В., Чугунков В.В. Методика моделирования охлаждения компонентов ракетного топлива с применением жидкого азота и промежуточного теплоносителя. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 3, с. 145–161. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/699941.html> (дата обращения 21 декабря 2016).
- [11] Золин А.В., Чугунков В.В. Моделирование процессов температурной подготовки ракетного горючего в системе заправки стартового комплекса. *Аэрокосмический научный журнал*, 2015, № 6. URL: <http://aerospjournal.ru/doc/826690.html> (дата обращения 21 декабря 2016).

- [12] Wen D.S., Chen H.S., Ding Y.L., Dearman P. Liquid nitrogen injection into water: Pressure build-up and heat transfer. *Cryogenics*, 2006, vol. 46, no. 10, pp. 740–748.
- [13] Домашенко А.М., Блинова И.Д. Исследования тепломассообмена при сбросе криогенных продуктов в воду. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2007, № 12, с. 17–19.
- [14] Накоряков В.Е., Цой А.Н., Мезенцев И.В., Мелешкин А.В. Вскипание струи жидкого азота, инжектированного в воду. *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*, 2013, № 1(12), с. 260–264.
- [15] Накоряков В.Е., Цой А.Н., Мезенцев И.В., Мелешкин А.В. Экспериментальные исследования процесса инъекции жидкого азота в воду. *Теплофизика и аэромеханика*, 2014, № 3, с. 293–298.
- [16] Павлов С.К., Чугунков В.В. Математическая модель процесса температурной подготовки компонентов жидкого ракетного топлива с использованием теплообменника и теплоносителя, охлаждаемого жидким азотом. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 12, с. 128–136. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/744330.html> (дата обращения 21 декабря 2016).
- [17] Павлов С.К., Чугунков В.В. Повышение эффективности системы охлаждения ракетного топлива с использованием теплообменника и антифриза, охлаждаемого жидким азотом. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 1(49). URL: <http://engjournal.ru/catalog/arise/teje/1461.html> (дата обращения 21 декабря 2016).

References

- [1] Aleksandrov A.A., Goncharov R.A., Igritskii V.A., Chugunkov V.V. Metodika vybora ratsional'nykh rezhimov okhlazhdeniia uglevodorodnogo goriuchego startovym oborudovaniem pered zapravkoi toplivnykh bakov rakety-nositelia [Methodology of Selection of Rational Regimes for Cooling the Hydrocarbon Fuel by Launch Equipment before Filling of Fuel Tanks of Launch Vehicle]. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering]. 2011, no. 1, pp. 40–46.
- [2] Denisov O.E., Zolin A.V., Denisova K.I. Metodika proektirovaniia bazy khraneniia i podgotovki vysokopiashchikh komponentov raketnogo topliva kosmodroma «Vostochnyi» [Design Technique for the High-Boiling Propellant Storage and Preparation Facility at the Cosmodrome «Vostochnyi»]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Bauman* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2014, no. 11, pp. 378–398. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/732218.html> (accessed 20 December 2016).
- [3] Aleksandrov A.A., Barmin I.V., Kunis I.D., Chugunkov V.V. Osobennosti sozdaniia i razvitiia kriogennykh sistem raketno-kosmicheskikh startovykh kompleksov «Soyuz» [Characteristic features of creating and developing cryogenic systems of space-rocket launch complex «Soyuz»]. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering]. 2016, no. 2, pp. 7–27.
- [4] Kobyzhev S.V. Metodika rascheta koeffitsientov massootdachi pri osushke uglevodorodnogo raketnogo topliva [Method of calculation of mass transfer coefficients at drainage of hydrocarbon rocket propellant]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Bauman* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2011, no. 11. Available at: <http://technomag.neicon.ru/doc/245147.html> (accessed 20 December 2016).
- [5] Kobyzhev S.V. Modelirovanie massoobmennykh protsessov pri obezvozhivaniu uglevodorodnogo raketnogo goriuchego barbotirovaniem azotom [Modeling mass transfer processes during dehydration of hydrocarbon rocket fuel by sparging with nitrogen]. *Aktual'nye problemy rossiiskoi kosmonavтики. Tr. 36 Akademicheskikh chtenii po kosmonavtike* [Actual problems of Russian cosmonautics. Proceedings 36 academic readings on cosmonautics]. Moscow, Komissiiia RAN publ., 2012, pp. 356–357.
- [6] Kobyzhev S.V. Metodika poverochnogo rascheta protsessosa osushki uglevodorodnogo goriuchego metodom barbotazha gazoobraznym azotom [The method of calibration calculation process of dehydration of hydrocarbon fuels a method of sparging gaseous nitrogen]. *Aktual'nye problemy Rossiiskoi kosmonavтики. Materialy 37 akademicheskikh chtenii po kosmonavtike* [Actual problems of Russian cosmonautics. Proceedings 37 academic readings on cosmonautics]. Moscow, Komissiiia RAN publ., 2013, pp. 385–386.

- [7] Denisova K.I., Zolin A.V., Pavlov S.K., Chugunkov V.V. Analiz variantov okhlazhdeniia komponentov raketnogo topliva v sostave oborudovaniia nazemnykh kompleksov s ispol'zovaniem zhidkogo azota [Analysis of cooling options for rocket fuel components in ground-based equipment using liquid nitrogen]. *Sbornik tezisov 40 Akademicheskikh chtenii po kosmonavtike* [Theses 40 Academic Conference on Astronautics]. Moscow, Bauman Press, 2015, pp. 238–239.
- [8] Kobyzhev S.V., Zolin A.V., Chugunkov V.V. Postroenie ratsional'noi skhemy podgotovki uglevodorodnogo goriuchego po temperature i vlagosoderzhaniiu s ispol'zovaniem zhidkogo i gazoobraznogo azota na startovom i tekhnicheskome kompleksakh kosmodroma [Building a rational scheme of preparation of hydrocarbon fuels according to temperature and moisture content with use of liquid and gaseous nitrogen at launch and technical spaceport complexes]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2012, no. 10. Available at: <http://technomag.neicon.ru/doc/486647.html> (accessed 20 December 2016).
- [9] Komlev D.E., Solov'ev V.I. Okhlazhdenie naftila metodom kriogenного barbotazha [Cooling naphthyl cryogenic method of bubbling]. *Novosti tekhniki: sbornik* [Technology News: collection]. Moscow, KBTM publ., 2004, pp. 137–141.
- [10] Denisov O.E., Zolin A.V., Chugunkov V.V. Metodika modelirovaniia okhlazhdeniia komponentov raketnogo topliva s primeneniem zhidkogo azota i promezhutochnogo teplonositel'ia [Simulation methods of rocket fuel refrigerating with liquid nitrogen and intermediate heat carrier]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2014, no. 3, pp. 145–161. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/699941.html> (accessed 21 December 2016).
- [11] Zolin A.V., Chugunkov V.V. Modelirovanie protsessov temperaturnoi podgotovki raketnogo goriuchego v sisteme zapravki startovogo kompleksa [Modeling the Thermal Rocket Fuel Preparation Processes in the Launch Complex Fueling System]. *Aerokosmicheskii nauchnyi zhurnal* [Aerospace scientific journal]. 2015, no. 6. Available at: <http://aerospjournal.ru/doc/826690.html> (accessed 21 December 2016).
- [12] Wen D.S., Chen H.S., Ding Y.L., Dearman P. Liquid nitrogen injection into water: pressure build-up and heat transfer. *Cryogenics*, 2006, vol. 46, no. 10, pp. 740–748.
- [13] Domashenko A.M., Blinova I.D. Issledovaniia teplomassoobmena pri sbrose kriogennykh produktov v vodu [Research of heat and mass-exchange under water burial of cryogenic products]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* [Chemical and petroleum engineering]. 2007, no. 12, pp. 17–19.
- [14] Nakoriakov V.E., Tsoi A.N., Mezentsev I.V., Meleshkin A.V. Vskipanie strui zhidkogo azota, inzhektirovannogo v vodu [Boiling-up of liquid nitrogen injected into water]. *Sovremennaiia nauka: issledovaniia, idei, rezul'taty, tekhnologii* [Modern science: researches, ideas, results, technologies]. 2013, no. 1(12), pp. 260–264.
- [15] Nakoriakov V.E., Tsoi A.N., Mezentsev I.V., Meleshkin A.V. Eksperimental'nye issledovaniia protsessa inzhektsii zhidkogo azota v vodu [Boiling-up of liquid nitrogen jet in water]. *Teplofizika i aeromekhanika* [Thermophysics and Aeromechanics]. 2014, no. 3, pp. 293–298.
- [16] Pavlov S.K., Chugunkov V.V. Matematicheskaia model' protsessa temperaturnoi podgotovki komponentov zhidkogo raketnogo topliva s ispol'zovaniem teploobmennika i teplonositel'ia, okhlazhdaemogo zhidkim azotom [Mathematical Model-Based Temperature Preparation of Liquid-Propellant Components Cooled by Liquid Nitrogen in the Heat Exchanger with a Coolant]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2014, no. 12, pp. 128–136. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/744330.html> (accessed 21 December 2016).
- [17] Pavlov S.K., Chugunkov V.V. Povyshenie effektivnosti sistemy okhlazhdeniia raketnogo topliva s ispol'zovaniem teploobmennika i antifrizha, okhlazhdaemogo zhidkim azotom [Enhancing the efficiency of the propellant cooling system using a heat exchanger and antifreeze being cooled by liquid nitrogen]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation]. 2016, is. 1(49). Available at: <http://engjournal.ru/catalog/arise/teje/1461.html> (accessed 21 December 2016).

Информация об авторах

АЛЕКСАНДРОВ Анатолий Александрович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Стартовые ракетные комплексы», ректор МГТУ им. Н.Э. Баумана. (105005, Москва, Российская Федерация, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, e-mail: rector@bmstu.ru).

БАРМИН Игорь Владимирович (Москва) — доктор технических наук, член-корреспондент РАН, генеральный конструктор предприятия «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры», профессор, зав. кафедрой «Стартовые ракетные комплексы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, e-mail: sm8@sm8.bmstu.ru).

ПАВЛОВ Семен Константинович (Москва) — аспирант кафедры «Стартовые ракетные комплексы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, e-mail: sm8@sm8.bmstu.ru).

ЧУГУНКОВ Владимир Васильевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Стартовые ракетные комплексы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, e-mail: sm8@sm8.bmstu.ru).

Information about the authors

ALEKSANDROV Anatoliy Aleksandrovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Launch Complexes, Rector, Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: rector@bmstu.ru).

BARMIN Igor Vladimirovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Designer, Center for Ground-Based Space Infrastructure Operation; Professor, Head of Department of Launch Rocket Complexes. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: sm8@sm8.bmstu.ru).

PAVLOV Semyon Konstantinovich (Moscow) — Postgraduate, Department of Launch Rocket Complexes. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: sm8@sm8.bmstu.ru).

CHUGUNKOV Vladimir Vasilievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Launch Rocket Complexes. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: sm8@sm8.bmstu.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышла в свет монография
под редакцией Д.А. Ягодникова
«Актуальные проблемы
ракетного двигателестроения»

Приведена классификация конверсионных технологий на основе ракетных и реактивных двигателей. Рассмотрены основные методы термо- и газодинамического расчета характеристик рабочего тела и рабочего процесса в камерах сгорания конверсионных разработок. Представлены примеры проектирования и практического использования технологических установок газопламенной обработки конструкционных материалов, сверхзвукового напыления многофункциональных покрытий, установок пожаротушения на основе генерации микродисперсного аэрозоля и газодисперсного синтеза нанодисперсных частиц оксидов и нитридов металлов. Практическое применение конверсии ракетных и реактивных двигателей изложено на примере реальных разработок.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru