

Характеристики охлаждения ракетного топлива жидким азотом в емкостях наземных комплексов с теплообменной рубашкой

© А.А. Александров¹, И.В. Бармин^{1,2}, К.И. Денисова^{1,2},
А.В. Золин¹, С.К. Павлов³, В.В. Чугунков¹

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

²АО «ЦЭНКИ», Москва, 107996, Россия

³ПАО «Криогенмаш», г. Балашиха, Московская обл., 143907, Россия

На основе разработанных методик расчета и численного моделирования процессов теплообмена в емкостях наземных комплексов, оборудованных теплообменной рубашкой, получены характеристики охлаждения ракетного топлива с использованием жидкого азота, которым осуществляется барботаж антифриза в полостях теплообменной рубашки. Приведены данные по оценке эффективности охлаждения ракетного топлива в зависимости от массового расхода жидкого азота для различных вариантов организации перемешивания топлива в емкости-хранилище в процессе охлаждения.

Ключевые слова: ракетное топливо, охлаждение, емкость с теплообменной рубашкой, жидкий азот, барботаж

Введение. Для повышения эффективности ракет космического назначения (РКН) компоненты ракетного топлива (КРТ) перед заправкой в топливные баки ракет должны подвергаться температурной подготовке с использованием оборудования наземных комплексов космодромов. Температурная подготовка ракетного топлива является одной из многих технологических операций, которые выполняются с применением оборудования наземных комплексов при эксплуатации ракетно-космической техники [1–8].

Процессы температурной подготовки КРТ имеют существенное значение для надежной и эффективной работы их двигательных установок [9–12]. Проведение температурной подготовки КРТ осуществляется также перед испытаниями жидкостных ракетных двигателей на испытательных стендах ракетных баз. При этом, как правило, для повышения плотности требуется проводить охлаждение топлива массой от нескольких сотен килограмм до нескольких сотен тонн.

В наземных комплексах в большинстве существующих систем температурной подготовки топлива для охлаждения КРТ используется жидкий азот. Применение на многих стартовых комплексах жидкого азота обусловлено его производством на космодромах в больших объемах, значительными массами ракетного топлива, подвергаемого охлаждению в относительно короткие промежутки времени, а также

невысокой интенсивностью пусков, выполняемых различными стартовыми комплексами (как правило, несколько пусков в год) [12].

Вопросы построения и эксплуатации систем охлаждения топлива, в том числе основанных на теплообменных процессах с жидким азотом, рассмотрены в работах [9–18]. Процессы взаимодействия жидкого азота и других криогенных продуктов с жидкими средами исследованы в публикациях [19–24].

Подготовка КРТ по температуре является длительной и энергозатратной операцией, требующей применения рациональных технологий и режимов охлаждения топлива.

На практике реализовано несколько вариантов построения систем охлаждения, основанных на теплообменных процессах с жидким азотом. Среди них можно выделить охлаждение топлива при непосредственном вводе в него через барботер жидкого азота [13, 14], бесконтактное охлаждение топлива жидким азотом в теплообменниках «труба в трубе» [15], а также понижение температуры топлива в рекуперативном теплообменнике посредством теплообмена с антифризом, охлаждаемым в отдельном резервуаре при барботаже жидким азотом [13, 17, 18].

Контактное охлаждение топлива жидким азотом характеризуется изменением состава топлива и приводит к его некондиционности по газосодержанию с необходимостью проведения дегазации топлива перед его заправкой в топливные баки [12].

Бесконтактное охлаждение топлива жидким азотом наиболее часто осуществляется в системах с теплообменниками типа «труба в трубе» перекачиванием топлива насосами через внутреннюю трубу теплообменника по замкнутому контуру при подаче жидкого азота во внешнюю трубу теплообменника. После охлаждения топлива азот отводится в окружающую среду. Эксплуатация подобных систем характеризуется высокой недорекуперацией температуры газообразного азота на выходе из теплообменника, составляющей более 100 К, и как следствие, повышенными затратами жидкого азота на охлаждение топлива [12, 15].

В ряде существующих систем температурной подготовки КРТ охлаждение (нагрев) ракетного топлива осуществляется посредством процессов теплообмена во внешних по отношению к резервуарам хранения КРТ теплообменниках. При этом эксплуатация систем с применением внешних теплообменников и жидкого азота характеризуется недостаточной эффективностью, что приводит к повышенным затратам жидкого азота на выполнение операции охлаждения топлива, особенно в тех случаях, когда требуется охладить КРТ до температур, близких к температуре замерзания топлива [12]. Данное обстоятельство связано со значительными энергозатратами на процесс

циркуляции топлива через теплообменник при повышенной вязкости топлива.

Техническое решение системы охлаждения топлива в емкости при размещении в ней встроенного теплообменника, заполненного антифризом, и барботаже антифриза жидким азотом позволяет улучшить характеристики охлаждения [10–12, 16].

Разновидностью совмещения конструкции емкости с теплообменником, предназначенным для охлаждения топлива в емкости, является емкость, оборудованная теплообменной рубашкой (рис. 1).

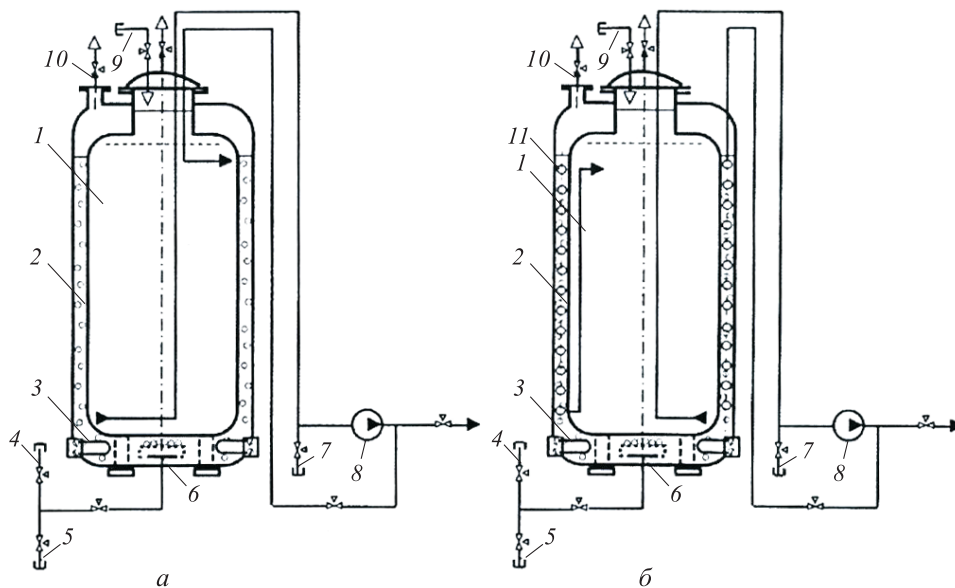


Рис. 1. Схемы емкости с теплообменной рубашкой:

а — без витого теплообменника; *б* — с витым теплообменником; 1 — емкость с топливом; 2 — теплообменная рубашка, заполненная антифризом; 3 — трубчатый электронагреватель; 4 — штуцер подвода жидкого азота; 5 — штуцер подачи (слива) антифриза; 6 — барботер жидкого азота; 7 — штуцер подвода топлива; 8 — насос; 9 — штуцер подвода газа наддува; 10 — дренажный клапан газообразного азота; 11 — витой теплообменник

Охлаждение топлива в емкости 1 происходит за счет теплопередачи через ее поверхности к антифризу в теплообменной рубашке 2. Антифриз охлаждается жидким азотом при его подаче через барботер 6, расположенный в нижней части теплообменной рубашки. Образующиеся при кипении диспергированного жидкого азота пузыри газообразного азота всплывают в среде антифриза к его поверхности, обеспечивая активное перемешивание антифриза и нагреваясь при этом до его текущей температуры. Отвод газообразного азота из теплообменной рубашки осуществляется через дренажный клапан 10. Для интенсификации теплопередачи при охлаждении топлива в емкости можно использовать насос 8, обеспечивающий перемешивание

топлива в емкости, и встроенный в теплообменную рубашку витой теплообменник 11.

При необходимости нагрева топлива в емкости включаются трубчатые нагреватели 3, расположенные в нижней части теплообменной рубашки, что приводит к нагреву антифриза в теплообменной рубашке и теплопередаче к топливу в емкости. Для перемешивания антифриза в теплообменной рубашке в режиме нагрева используют подачу через барботер воздуха или газообразного азота, а для перемешивания топлива в емкости можно включить насос 8.

Постановка задач исследования. Целью представленной работы является оценка характеристик охлаждения топлива жидким азотом в емкостях с теплообменной рубашкой и анализ возможностей их улучшения благодаря перемешиванию компонента в емкости, а также использованию в теплообменной рубашке витого теплообменника, через который осуществляется циркуляция топлива насосом системы.

Для количественной оценки эффективности охлаждения топлива жидким азотом в емкостях с теплообменной рубашкой использованы следующие показатели [12]:

общий показатель эффективности системы охлаждения

$$\eta = \frac{m_f c_f (T_{fs} - T_{ff})}{m_a \left[r_a + c_a \left(\frac{T_{fs} + T_{ff}}{2} - T_{ba} \right) \right]}; \quad (1)$$

относительная масса жидкого азота, затрачиваемого на охлаждение в заданном интервале температур единицы массы топлива,

$$\bar{m}_a = \frac{m_a}{m_f}; \quad (2)$$

время охлаждения в заданном интервале температур единицы массы топлива, ч/т,

$$\bar{\tau}_{em_f} = \frac{\tau_{of}}{m_f}, \quad (3)$$

где m_f, c_f — масса и удельная теплоемкость топлива; T_{fs}, T_{ff} — начальная и конечная температуры топлива при проведении операции охлаждения; m_a — масса жидкого азота, затраченного на процесс охлаждения; r_a, c_a, T_{ba} — удельная теплота кипения, удельная теплоемкость и температура кипения азота; τ_{of} — время охлаждения топлива от начальной до конечной температуры.

Общий показатель эффективности системы охлаждения η является основным показателем, который характеризует КПД системы охлаждения при использовании жидкого азота в качестве охлаждающей среды.

Другие два показателя, которые зависят от интервала температур при охлаждении определенного вида топлива, являются дополнительными характеристиками, которые использовались при сравнении различных вариантов построения систем и технологий охлаждения КРТ.

Математические модели охлаждения топлива в емкостях с теплообменной рубашкой. Для создания единого алгоритма и программы расчетов, а также оценки изменения температуры топлива в емкостях с теплообменной рубашкой уравнения теплообмена представлены в виде системы уравнений, записанных для временных изменений температуры антифриза и топлива, включая различные режимы его перемешивания в емкости в процессе охлаждения или нагрева. Процесс охлаждения топлива во внутреннем пространстве емкости при теплообмене с жидким азотом при его подаче через барботер в теплообменную рубашку с антифризом в предположении о квазистационарности теплообмена между топливом и антифризом, а также между емкостью-хранилищем и окружающей средой можно представить следующей системой уравнений:

$$k_{ts}F_{ts}(T_{oc} - T_f) \left(1 + \frac{\sum k_i F_i}{k_{ts} F_{ts}} N_p \right) + N_p Q_p - (k_h F_h + N_p n_{he} k_{he} F_{he})(T_f - T_{an}) = (m_f c_f + m_t c_t + N_p \sum m_i c_i) \frac{dT_f}{d\tau}; \quad (4)$$

$$k_r F_r (T_{oc} - T_{an}) + (k_h F_h + N_p n_{he} k_{he} F_{he})(T_f - T_{an}) - G_a [r_a + c_a (T_{an} - T_{ba})] + Q_{teh} = (m_{an} c_{an} + m_h c_h + N_p n_{he} m_{he} c_{he} + \sum m_{oi} c_{oi}) \frac{dT_{an}}{d\tau}; \quad (5)$$

$$T_f = T_{fs} \quad \text{при } \tau = 0; \quad (6)$$

$$T_{an} = T_{ans} \quad \text{при } \tau = 0, \quad (7)$$

где k_{ts}, F_{ts} — коэффициент теплопередачи и площадь поверхности емкости-хранилища, не имеющей контакта с теплообменной рубашкой; $T_{oc} = T_{oa} + \frac{A_{oi} q_s}{\alpha_{\sum oa}}$ — условная наружная температура (T_{oa} — температура наружного воздуха; A_{oi} — поглощательная способность

наружной поверхности емкости; q_s — средняя по поверхности плотность потока солнечной радиации; $\alpha_{\sum oa}$ — суммарный коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности емкости); T_f — температура топлива; k_i, F_i, m_i, c_i — коэффициент теплопередачи, площадь поверхности, масса и удельная теплоемкость элементов циркуляционного контура (трубопроводов, клапанов, насоса) топлива при перемешивании; N_p — единичная функция ($N_p = 1$ при насосном перемешивании топлива в емкости, $N_p = 0$ при естественно-конвективном перемешивании топлива в емкости); Q_p — тепловой поток, подводимый к топливу от насоса при перемешивании; k_h, F_h — коэффициент теплопередачи и площадь поверхности емкости-хранилища, имеющей контакт с теплообменной рубашкой; T_{an} — температура антифриза; n_{he} — единичная функция ($n_{he} = 1$ при наличии витого теплообменника в теплообменной рубашке, $n_{he} = 0$ — при его отсутствии); k_{he}, F_{he} — коэффициент теплопередачи и площадь поверхности витого теплообменника; m_f, c_f — масса и удельная теплоемкость топлива; m_t, c_t — масса и удельная теплоемкость емкости; k_r, F_r — коэффициент теплопередачи и площадь наружной поверхности теплообменной рубашки; Q_{teh} — тепловой поток, подводимый к антифризу трубчатыми электронагревателями в режиме нагрева топлива; τ — время; G_a — массовый расход жидкого азота; m_{an}, c_{an} — масса и удельная теплоемкость антифриза; m_h, c_h — масса и удельная теплоемкость теплообменной рубашки; m_{he}, c_{he} — масса и удельная теплоемкость витого теплообменника; m_{oi}, c_{oi} — масса и удельная теплоемкость элементов конструкций (барботера, трубчатых электронагревателей, опор емкости), расположенных в теплообменной рубашке; T_{fs}, T_{ans} — начальные температуры топлива и антифриза.

При проведении расчетов представленные зависимости были дополнены критериальными зависимостями для определения коэффициентов теплоотдачи, расчетными зависимостями коэффициентов теплопередачи стенок емкости, теплообменной рубашки, составляющих элементов контура циркуляции топлива, а также зависимостями температурных изменений теплофизических характеристик различных видов КРТ и антифризов. Изменение температур топлива T_f в емкости-хранилище и температуры антифриза T_{an} в теплообменной

рубашке определяли при совместном решении уравнений (4) и (5) для различных вариантов проведения процессов охлаждения топлива. При этом эффективность охлаждения топлива жидким азотом оценивали по показателям эффективности системы охлаждения (1)–(3).

Обоснованность разработанной математической модели охлаждения топлива в емкостях со встроенными теплообменниками при одновременном охлаждении антифриза и топлива подтверждена результатами экспериментов на физической модели емкости при охлаждении углеводородного топлива ТС-1 с использованием жидкого азота и антифриза А-65 [9, 11].

Результаты анализа. Характеристики охлаждения топлива жидким азотом в емкости с теплообменной рубашкой оценивали для одновременной технологии изменения температуры антифриза, барботируемого жидким азотом, и углеводородного топлива «нафтил» массой 10 500 кг от начальной температуры 34 °С до конечной температуры –29 °С при температуре окружающей среды 34 °С. При этом вводили ограничения: температура антифриза в конце охлаждения должна быть выше температуры его замерзания не менее чем на 5 °С, а температура поверхности теплообменника со стороны топлива должна быть выше температуры замерзания топлива.

На рис. 2 приведены расчетные характеристики эффективности охлаждения топлива «нафтил» в емкости с теплообменной рубашкой при выполнении ее конструкции из различных материалов, заполнении теплообменной рубашки антифризом А-65, отсутствии витого теплообменника в теплообменной рубашке и естественно-конвективном перемешивании топлива в вертикальной емкости, выполненной по приведенной на рис. 1 схеме.

При анализе результатов и их сравнении с аналогичными показателями существующей системы охлаждения нафтила жидким азотом в теплообменниках «труба в трубе» выявлено:

- в пределах незначительного различия, оцениваемого в 2,6 %, лучшие показатели охлаждения топлива получены при выполнении емкости и ее теплообменной рубашки из алюминий-магниевого сплава, худшие — для емкости из коррозионно-стойкой стали;
- охлаждение топлива жидким азотом в емкостях с теплообменной рубашкой при его естественно-конвективном перемешивании в емкости характеризуется более высокими показателями эффективности по сравнению с охлаждением жидким азотом в теплообменниках «труба в трубе»: по общему показателю эффективности — на 23,7...33,5 %, затратам жидкого азота — на 22,7...25,9 % и времени охлаждения — на 3,2...13,6 %.

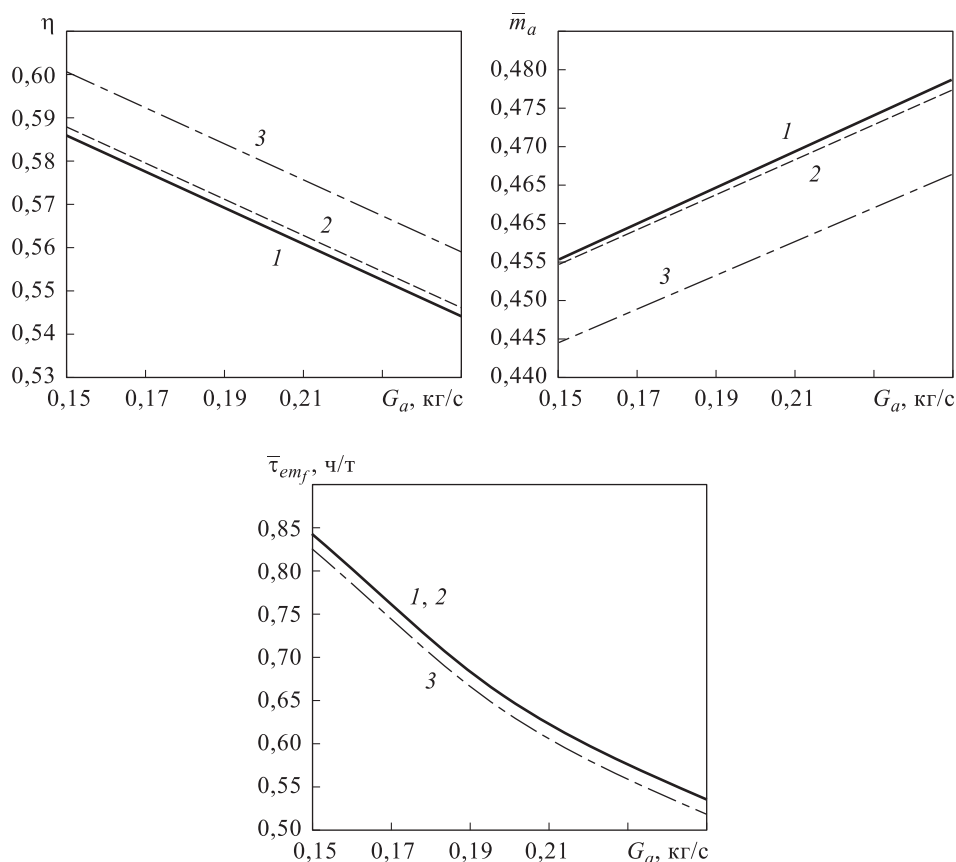


Рис. 2. Изменение показателей эффективности охлаждения топлива «нафтил» жидким азотом в емкости с теплообменной рубашкой при изменении расхода жидкого азота, подаваемого в среду антифриза А-65, заполняющего полость теплообменной рубашки, при отсутствии витого теплообменника в теплообменной рубашке и естественно-конвективном перемешивании топлива в емкости из различных материалов:

1 — из коррозионно-стойкой стали; 2 — из низкоуглеродистой конструкционной стали;
3 — из алюминивно-магниевого сплава

При организации в процессе охлаждения насосного перемешивания в емкости 1 (см. рис. 1) с закруткой его течения относительно теплообменных поверхностей улучшаются теплоотдача и показатели эффективности охлаждения топлива с использованием жидкого азота (рис. 3).

Благодаря эффекту от перемешивания топлива насосом с закруткой топлива во внутренней полости емкости можно увеличить расход жидкого азота, подаваемого на охлаждение антифриза А-65 в теплообменной рубашке, и уменьшить время охлаждения КРТ в 1,7 раза при одинаковых значениях общего показателя эффективности охлаждения и затрат жидкого азота на процесс охлаждения КРТ.

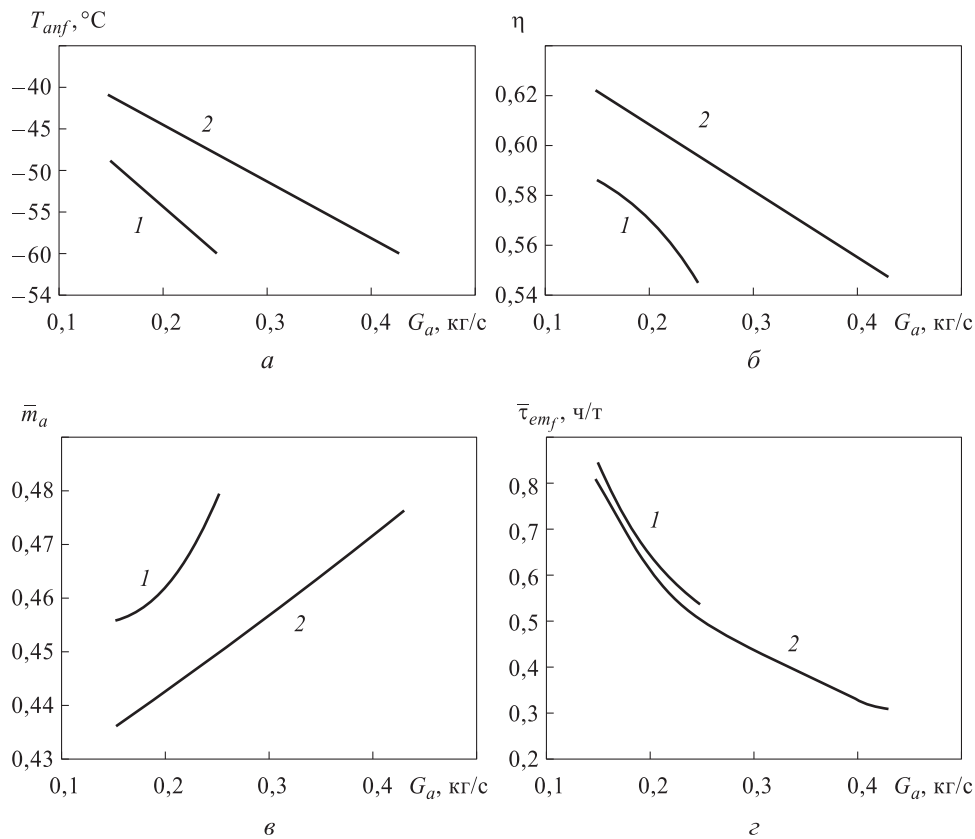


Рис. 3. Изменение конечной температуры антифриза T_{anf} (а), общего показателя эффективности охлаждения η (б), относительных затрат жидкого азота \bar{m}_a (в) и времени охлаждения единицы массы КРТ $\bar{\tau}_{емf}$ (г) от расхода жидкого азота при охлаждении топлива массой 10 500 кг с 34 °С до –29 °С в емкости из коррозионно-стойкой стали с теплообменной рубашкой без витого теплообменника, барботаже жидким азотом антифриза А-65, естественно-конвективном перемешивании топлива 1 и перемешивании топлива насосом 2 с закруткой топлива во внутренней полости емкости

Размещение в теплообменной рубашке витого теплообменника с организацией циркуляции через него топлива при насосном перемешивании с закруткой его течения относительно внутренних теплообменных поверхностей емкости позволяет увеличить подачу жидкого азота в теплообменную рубашку и улучшить показатели эффективности охлаждения топлива с использованием жидкого азота (рис. 4).

Охлаждение топлива жидким азотом в емкостях с витым теплообменником в теплообменной рубашке при насосном перемешивании с закруткой его течения относительно внутренних теплообменных поверхностей емкости характеризуется более высокими показателями

эффективности, чем охлаждение жидким азотом в теплообменниках «труба в трубе»: по общему показателю эффективности и затратам жидкого азота — на 41 %, по времени охлаждения — в 4,7 раза.

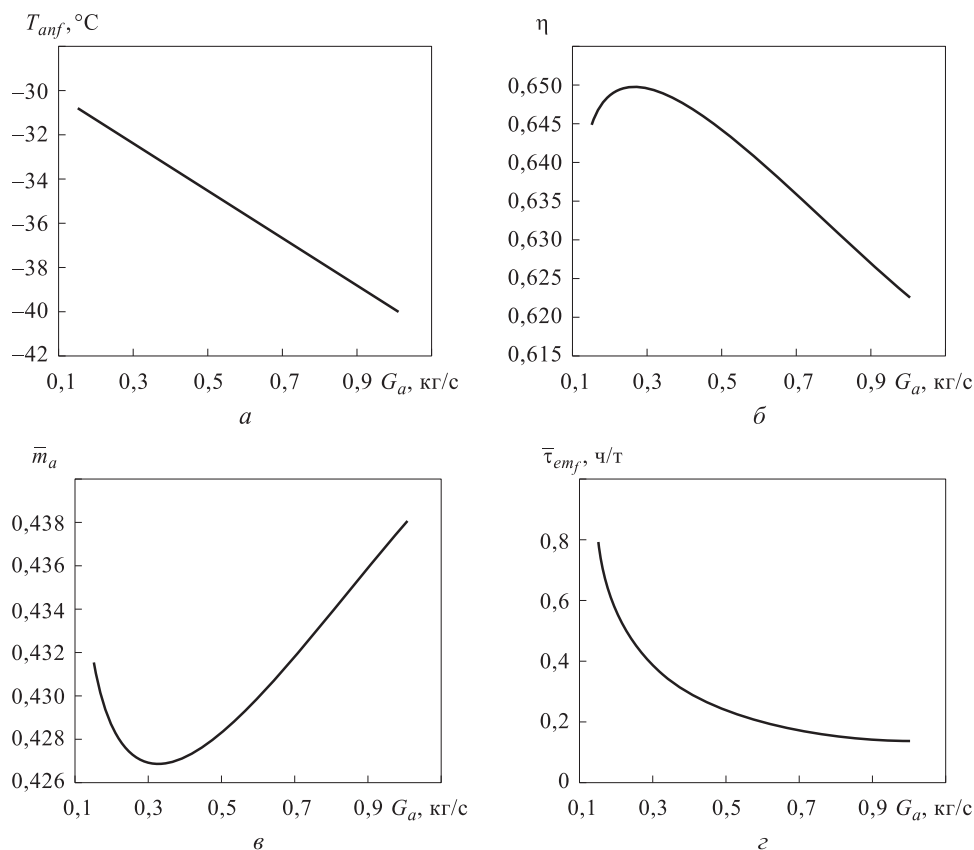


Рис. 4. Изменение конечной температуры антифриза T_{anf} (а), общего показателя эффективности охлаждения η (б), относительных затрат жидкого азота \bar{m}_a (в) и времени охлаждения единицы массы КРТ $\bar{\tau}_{emf}$ (г) от расхода жидкого азота при охлаждении топлива массой 10 500 кг с 34 °С до -29 °С в емкости из коррозионно-стойкой стали с витым теплообменником в теплообменной рубашке, барботаже жидким азотом антифриза А-65 и перемешивании топлива насосом с закруткой топлива во внутренней полости емкости

В случае необходимости более глубокого охлаждения топлива — до температур, близких к температуре его замерзания (около -55 °С), при использовании в теплообменной рубашке антифриза А-65, имеющего предельно низкую его рабочую температуру на уровне -60 °С, из-за малой разности температур топлива и антифриза время охлаждения τ увеличивается до нескольких десятков часов (рис. 5), что свидетельствует о необходимости применения в этих случаях антифризов с более низкой температурой замерзания.

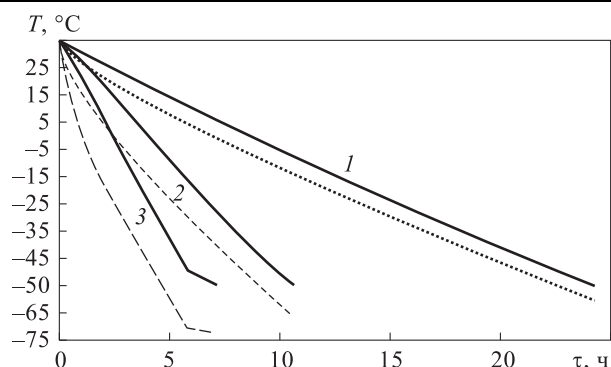


Рис. 5. Изменение температуры топлива «нафтил» (—) и антифриза (----) в процессе охлаждения жидким азотом до температуры $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$:

1 — при использовании в теплообменной рубашке антифриза А-65 и подаче жидкого азота с расходом $0,075\text{ кг/с}$; 2 — при использовании в теплообменной рубашке эвтектического водного раствора этиленгликоля и подаче жидкого азота с расходом $0,22\text{ кг/с}$; 3 — при использовании в теплообменной рубашке эвтектического водного раствора этиленгликоля и подаче жидкого азота на первом этапе с расходом $0,3\text{ кг/с}$ при охлаждении топлива до температуры $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, на втором этапе — с расходом $0,07\text{ кг/с}$ при охлаждении топлива до температуры $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В качестве такого антифриза можно использовать эвтектическую смесь этиленгликоля и воды с температурой замерзания $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$. В случае применения данного антифриза в теплообменной рубашке в сочетании с организацией двухэтапного охлаждения топлива жидким азотом с предельно высоким расходом на первом этапе и пониженным расходом азота на завершающем этапе охлаждения время охлаждения топлива до требуемой температуры сокращается в 3,4 раза (см. рис. 4) по сравнению с применением антифриза А-65.

Заключение. Охлаждение топлива жидким азотом в емкостях с теплообменной рубашкой при насосном перемешивании топлива в емкости характеризуется более высокими показателями эффективности, чем охлаждение жидким азотом в теплообменниках «труба в трубе», что позволяет уменьшить затраты жидкого азота на 25 % и сократить время охлаждения топлива в 1,7 раза. При размещении в теплообменной рубашке витого теплообменника и насосном перемешивании топлива в емкости процесс охлаждения топлива характеризуется уменьшением затрат жидкого азота на 41 % при сокращении времени охлаждения топлива в 4,7 раза.

В случае необходимости более глубокого охлаждения топлива — до температур, близких к температуре его замерзания (около $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$), при использовании в теплообменной рубашке эвтектического водного раствора этиленгликоля в сочетании с организацией двухэтапного охлаждения топлива жидким азотом время охлаждения топлива до требуемой температуры может быть уменьшено в 3,4 раза.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Золин А.В., Чугунков В.В. Методика анализа теплообменных процессов компонентов ракетного топлива при выполнении операции заправки топливных баков ракеты на стартовом комплексе. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, № 12, с. 8–12.
- [2] Удовик И.С., Золин А.В. Обоснование выбора точек подвеса транспортно-установочной тележки канатами механизма подъема на стартовых комплексах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 7 (103), с. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-7-1998>
- [3] Матвеева О.П., Романяк А.Ю., Удовик И.С. Анализ вариантов сокращения энергопотребления в процессах поддержания тепловых режимов космических аппаратов на стартовых комплексах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 12 (96). <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-12-1942>
- [4] Сова А.Н., Воробьев Е.В., Денисов О.Е., Макаренко М.В. Научно-методический подход к анализу риска возникновения нештатных ситуаций при транспортировке компонентов ракетного топлива. *Двойные технологии*, 2019, № 3 (88), с. 19–22.
- [5] Kozlov V.V., Shadrin V.S. Podchufarov A.A. Express analysis of technological processes of compression and drying of wet air at the stages of design and operation of compressor stations. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2141, Art. no. 030029. DOI: 10.1063/1.5122079
- [6] Игрицкий В.А., Игрицкая А.Ю., Зверев В.А. Методика выбора параметров приводов подъема установщиков и транспортно-установочных агрегатов ракет космического назначения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 8. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-8-2005>
- [7] Igritskaia A.Yu., Igritsky V.A., Zverev V.A. Diagnostics of the launch system structures by analyzing the video footage of their motion. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2171, Art. no. 110015 (2019). DOI: 10.1063/1.5133249
- [8] Matveeva O., Romanyak A., Udovik I. Improving the processes of missile preparation at launch complexes on the basis of system design of interacting elements. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2195, Art. no. 020067. DOI: 10.1063/1.5140167
- [9] Александров А.А., Бармин И.В., Павлов С.К., Чугунков В.В. Результаты экспериментальных исследований процессов температурной подготовки углеводородного топлива с использованием теплообменника, размещенного в антифризе. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 1. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-1-1842>
- [10] Chugunkov V.V., Denisova K.I., Pavlov S.K. Effective models of using liquid nitrogen for cooling liquid media. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2171, Art. no. 200002. DOI: 10.1063/1.5133360
- [11] Chugunkov V.V., Denisova K.I. Fuel cooling with liquid nitrogen in a tank with a built-in heat exchanger. *AIP Conference Proceedings*, 2021, vol. 2318, Art. no. 100003. DOI: 10.1063/5.0036228
- [12] Александров А.А., Бармин И.В., Денисова К.И., Чугунков В.В. Показатели эффективности охлаждения топлива с использованием жидкого азота в емкостях со встроенными теплообменниками. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 3. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-3-2064>
- [13] Комлев Д.Е., Соловьев В.И. Охлаждение нафтила методом криогенного барботажа. *Новости техники: сб.* Москва, КБТМ, 2004, с.137–141.
- [14] Золин А.В., Чугунков В.В. Моделирование процессов температурной подготовки ракетного горючего в системе заправки стартового комплекса. *Аэрокосмический научный журнал*, 2015, № 6, с. 27–38.

- [15] Александров А.А., Бармин И.В., Золин А.В., Чугунков В.В. Анализ эффективности охлаждения углеводородного топлива с использованием жидкого азота и комбинации рекуперативных теплообменников. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 3. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-3-1965>
- [16] Александров А.А., Бармин И.В., Денисова К.И., Чугунков В.В. Инновационная модель применения жидкого азота для охлаждения ракетного топлива в емкостях заправочных систем наземных комплексов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2017, № 3, с. 4–17.
- [17] 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: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 3, с. 145–161.
- [18] 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: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 12, с. 136–150.
- [19] 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.
- [20] Домашенко А.М., Блинова И.Д. Исследования тепломассообмена при сбросе криогенных продуктов в воду. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2007, № 12, с. 17–19.
- [21] 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.
- [22] Nakoryakov V.E., Tsoi A.N., Mezentsev I.V., Meleshkin A.V. Boiling-up of liquid nitrogen jet in water. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, vol. 21, iss. 3, pp. 279–284.
- [23] Накоряков В.Е., Цой А.Н., Мезенцев И.В., Мелешкин А.В. Экспериментальные исследования процесса инжекции жидкого азота в воду. *Теплофизика и аэромеханика*, 2014, № 3, с. 293–298.
- [24] Александров А.А., Бармин И.В., Павлов С.К., Чугунков В.В. Исследование параметров теплообмена витого теплообменника в двухфазной среде. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2019, № 3, с. 22–33. DOI: 10.18698/1812-3368-2019-3-22-33

Статья поступила в редакцию 04.03.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Александров А.А., Бармин И.В., Денисова К.И., Золин А.В., Павлов С.К., Чугунков В.В. Характеристики охлаждения ракетного топлива жидким азотом в емкостях наземных комплексов с теплообменной рубашкой. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 3. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-3-2163>

Александров Анатолий Александрович — д-р техн. наук, президент МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 100 научных работ в области обеспечения безопасности, организации хранения и транспортирования углеводородного топлива. e-mail: kafsm8@bmstu.ru

Бармин Игорь Владимирович — д-р техн. наук, член-корр. РАН, профессор, заведующий кафедрой «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, советник по науке генерального директора АО «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры»; автор более 300 научных работ в области ракетно-космической техники. e-mail: kafsm8@bmstu.ru

Денисова Ксения Игоревна — старший преподаватель кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор 16 публикаций в области ракетно-космической техники. e-mail: kafsm8@bmstu.ru

Золин Анатолий Владимирович — старший преподаватель кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор 27 публикаций в области ракетно-космической техники. e-mail: kafsm8@bmstu.ru

Павлов Семен Константинович — канд. техн. наук, инженер, ПАО «Криогенмаш»; автор 17 публикаций в области ракетно-космической техники.

Чугунков Владимир Васильевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 150 научных работ в области наземного оборудования ракетно-космической техники. e-mail: kafsm8@bmstu.ru

Characteristics of rocket fuel cooling by means of liquid nitrogen in ground complex tanks equipped with heat exchange jackets

© A.A. Alexandrov¹, I.V. Barmin^{1,2}, K.I. Denisova^{1,2},
A.V. Zolin¹, S.K. Pavlov³, V.V. Chugunkov¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow 105005, Russia

²FSUE TsENKI (Centre for Operation of Space Ground-based Infrastructure),
Moscow, 107996, Russia

³PJSC Cryogenmash, Balashikha, Moscow Region, 143907, Russia

The authors developed dedicated computational techniques and combined those with numerical simulation of heat transfer processes in ground complex tanks equipped with heat exchange jackets to discover the specifics of how rocket fuel may be cooled with liquid nitrogen used to sparge antifreeze in the cavities of the heat exchange jackets. The paper provides estimation data for rocket fuel cooling efficiency as a function of mass flow rate of liquid nitrogen for various options of setting up fuel mixing in the storage tank during cooling.

Keywords: rocket fuel, cooling, tank featuring a heat exchange jacket, liquid nitrogen, sparging

REFERENCES

- [1] Zolin A.V., Chugunkov V.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2012, no. 12, pp. 8–12.
- [2] Udovik I.S., Zolin A.V. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2020, iss. 7 (103), p. 7.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-7-1998>
- [3] Matveeva O.P., Romanyak A.Yu., Udovik I.S. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 12 (96).
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-12-1942>
- [4] Sova A.N., Vorobyov E.V., Denisov O.E., Makarenko M.V. *Dvoynye tekhnologii — Dual Technology*, 2019, no. 3 (88), pp. 19–22.
- [5] Kozlov V.V., Shadrin V.S., Podchufarov A.A. Express analysis of technological processes of compression and drying of wet air at the stages of design and operation of compressor stations. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2141, Art. no. 030029. DOI: 10.1063/1.5122079
- [6] Igritskiy V.A., Igritskaya A.Yu., Zverev V.A. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2020, iss. 8.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-8-2005>
- [7] Igritskaia A.Yu., Igritskiy V.A., Zverev V.A. Diagnostics of the launch system structures by analyzing the video footage of their motion. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2171, Art. no. 110015. DOI: 10.1063/1.5133249
- [8] Matveeva O., Romanyak A., Udovik I. Improving the processes of missile preparation at launch complexes on the basis of system design of interacting elements. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2195, Art. no. 020067. DOI: 10.1063/1.5140167
- [9] Aleksandrov A.A., Barmin I.V., Pavlov S.K., Chugunkov V.V. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 1. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-1-1842>

- [10] Chugunkov V.V., Denisova K.I., Pavlov S.K. Effective models of using liquid nitrogen for cooling liquid media. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2171, Art. no. 200002. DOI: 10.1063/1.5133360
- [11] Chugunkov V.V., Denisova K.I. Fuel cooling with liquid nitrogen in a tank with a built-in heat exchanger. *AIP Conference Proceedings*, 2021, vol. 2318, Art. no. 100003. DOI: 10.1063/5.0036228
- [12] Alexandrov A.A., Barmin I.V., Denisova K.I., Chugunkov V.V. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2021, iss. 3. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-3-2064>
- [13] Komlev D.E., Solovyev V.I. Okhlazhdenie naftila metodom kriogenogo barbotazha [Naphthyl cooling by cryogenic sparging]. *Novosti tekhniki: sb. [Engineering news: Collected papers]*. Moscow, Nudelman Precision Engineering Design Bureau Publ., 2004, pp. 137–141.
- [14] Zolin A.V., Chugunkov V.V. *Aerokosmicheskiy nauchny zhurnal — Aerospace scientific journal*, 2015, no. 6, pp. 27–38.
- [15] Alexandrov A.A., Barmin I.V., Zolin A.V., Chugunkov V.V. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2020, iss. 3. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-3-1965>
- [16] Alexandrov A.A., Barmin I.V., Denisova K.I., Chugunkov V.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2017, no. 3, pp. 4–17.
- [17] Denisov O.E., Zolin A.V., Chugunkov V.V. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education: Scientific Edition of Bauman MSTU*, 2014, no. 3, pp. 145–161.
- [18] Pavlov S.K., Chugunkov V.V. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education: Scientific Edition of Bauman MSTU*, 2014, no. 12, pp. 136–150.
- [19] Wen D.S., Chen H.S., Ding Y.L., Dearman P. *Cryogenics*, 2006, vol. 46, no. 10, pp. 740–748.
- [20] Domashenko A.M., Blinova I.D. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie — Chemical and Petroleum Engineering*, 2007, no. 12, pp. 17–19.
- [21] Nakoryakov V.E., Tsoi A.N., Mezentssev I.V., Meleshkin A.V. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezultaty, tekhnologii — Modern science: researches, ideas, results, technologies*, 2013, no. 1 (12), pp. 260–264.
- [22] Nakoryakov V.E., Tsoi A.N., Mezentssev I.V., Meleshkin A.V. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, vol. 21, no. 3, pp. 279–284.
- [23] Nakoryakov V.E., Tsoi A.N., Mezentssev I.V., Meleshkin A.V. *Teplofizika i aeromekhanika - Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, no. 3, pp. 293–298.
- [24] Aleksandrov A.A., Barmin I.V., Pavlov S.K., Chugunkov V.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*, 2019, no. 3, pp. 22–33. DOI: 10.18698/1812-3368-2019-3-22-33

Aleksandrov A.A., Dr. Sc. (Eng.), President, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 100 scientific publications in the field of hydrocarbon fuel safety, storage management and transportation. e-mail: kafsm8@bmstu.ru

Barmin I.V., Dr. Sc. (Eng.), Corresponding Member, Russian Academy of Sciences; Professor, Head of the Department of Rocket Launch Complexes, Bauman Moscow State Technical University; Scientific Advisor to the Director General, FSUE TsENKI (Centre for Operation of Space Ground-based Infrastructure), author of more than 300 scientific publications in the field of aerospace technology. e-mail: kafsm8@bmstu.ru

Denisova K.I., Senior Lecturer, Department of Rocket Launch Complexes, Bauman Moscow State Technical University, author of 16 publications in the field of aerospace technology. e-mail: kafsm8@bmstu.ru

Zolin A.V., Senior Lecturer, Department of Rocket Launch Complexes, Bauman Moscow State Technical University, author of 27 publications in the field of aerospace technology. e-mail: kafsm8@bmstu.ru

Pavlov S.K., Cand. Sc. (Eng.), Engineer, PJSC Cryogenmash, 143907, Moscow Region, Balashikha, author of 17 publications in the field of aerospace technology.

Chugunkov V.V., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Rocket Launch Complexes, Bauman Moscow State Technical University, author of more than 150 scientific publications in the field of ground-based infrastructure in aerospace technology. e-mail: kafsm8@bmstu.ru