

Показатели эффективности охлаждения топлива с использованием жидкого азота в емкостях со встроенными теплообменниками

© А.А. Александров¹, И.В. Бармин^{1,2}, К.И. Денисова¹, В.В. Чугунков¹

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

²АО «ЦЭНКИ», Москва, 107996, Россия

Приведено описание системы охлаждения топлива с применением жидкого азота в емкостях наземных комплексов, оборудованных встроенными теплообменниками. Представлены результаты анализа характеристик охлаждения жидкого топлива в емкостях со встроенными теплообменниками, заполненными антифризом, при барботаже антифриза жидким азотом. Введены показатели, позволяющие оценить эффективность рассматриваемых технических решений по сравнению с существующими вариантами построения данных систем. Приведена математическая модель процесса охлаждения в виде системы уравнений, записанных для временных изменений температуры антифриза и топлива, в том числе при различных режимах перемешивания топлива. Приведены результаты исследований, проводимых с целью повышения эффективности процессов охлаждения топлива при различных расходах жидкого азота посредством организации процессов его теплообмена с поверхностями встроенного теплообменника и использования антифризов различных видов.

Ключевые слова: жидкое топливо, охлаждение, теплообменник, встроенный в емкость, показатели эффективности охлаждения

Введение. Охлаждение жидкого ракетного топлива, заправляемого в топливные баки ракет космического назначения и космических объектов, является одной из многочисленных технологических операций, которые выполняются оборудованием наземных комплексов при эксплуатации ракетно-космической техники. Охлаждение топлива осуществляется также перед проведением испытаний жидкостных ракетных двигателей на испытательных стендах ракетных баз и полигонов. Операция охлаждения необходима для обеспечения требуемых свойств топлива и увеличения его плотности.

В ряде систем охлаждения топлива используется жидкий азот [1], что обусловлено производством больших объемов жидкого азота на космодромах, значительными массами топлива, подвергаемого охлаждению в относительно короткие промежутки времени, а также невысокой интенсивностью пусков, выполняемых различными стартовыми комплексами, составляющей, как правило, несколько пусков в год [2].

Особенности построения систем подготовки топлива, основанных на теплообменных процессах с жидким азотом и массообменных процессах с газообразным азотом, рассмотрены в работах [1–14].

Процессы взаимодействия жидкого азота и других криогенных продуктов с жидкими средами представлены в [4, 8, 15–19].

Построение различных систем охлаждения с применением жидкого азота. На практике реализовано несколько вариантов построения систем охлаждения, основанных на теплообменных процессах с жидким азотом: при непосредственном вводе жидкого азота в резервуар с топливом [1, 4], при бесконтактном охлаждении топлива кипящим жидким азотом в теплообменниках типа «труба в трубе» [2, 3], а также при понижении температуры топлива посредством теплообмена в рекуперативном теплообменнике с антифризом, охлаждаемым в отдельном резервуаре при барботаже жидким азотом [4, 5–8].

Следует отметить, что при контактном охлаждении жидким азотом изменяется состав топлива, в связи с чем оно становится некондиционным по газосодержанию и возникает потребность в его дегазации перед заправкой в топливные баки [4].

Бесконтактное охлаждение топлива жидким азотом, которое наиболее часто применяют в системах с теплообменниками типа «труба в трубе», осуществляется 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. Для эксплуатации подобных систем характерны высокая недорекуперация температуры паров азота на выходе из теплообменника, составляющей более 100 К, и, как следствие, повышенные затраты жидкого азота на охлаждение топлива [2, 10, 11].

В ряде систем охлаждения используются процессы теплообмена топлива с антифризом, охлаждаемым жидким азотом в отдельном резервуаре. Такие процессы идут во внешних по отношению к резервуарам хранения топлива теплообменниках [4–6]. Однако эксплуатация систем с применением внешних теплообменников и жидкого азота показала, что такое технологическое решение недостаточно эффективно, поскольку приводит к повышенным затратам жидкого азота на выполнение операции охлаждения топлива, особенно в тех случаях, когда требуется охладить топливо до температуры, близкой к температуре его замерзания. Это приведет к значительным энергозатратам на процесс циркуляции топлива через теплообменник при его повышенной вязкости и, следовательно, к необходимости увеличения мощности насоса, обеспечивающего циркуляцию топлива через теплообменники, а также затрат жидкого азота на компенсацию теплового потока, подводимого к топливу при работе насоса.

Техническое решение системы охлаждения топлива в емкости при размещении в ней встроенного теплообменника, заполненного антифризом, при барботаже антифриза жидким азотом позволяет

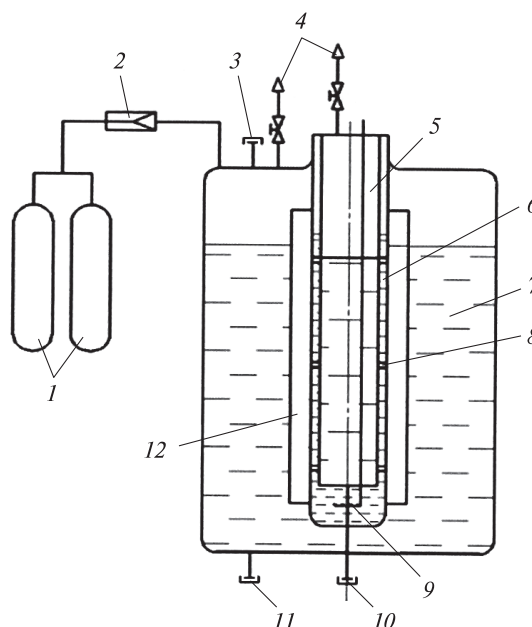
улучшить характеристики охлаждения [9, 10], в том числе за счет оребрения внешней поверхности теплообменника, контактирующей с топливом [11].

Математические модели теплообмена между топливом, антифризом и жидким азотом и результаты исследования влияния характеристик оребрения внешней поверхности теплообменника на эффективность охлаждения топлива жидким азотом при использовании антифриза А-65 в качестве промежуточного теплоносителя, находящегося в теплообменнике, рассмотрены в [9–11]. Этот теплоноситель имеет температуру замерзания $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$, представляет собой водный раствор этиленгликоля с добавлением ингибиторов коррозии металлов и присадок, препятствующих образованию пены и накипи. При этом следует иметь в виду, что его предельная рабочая температура в технологических системах обеспечения температурных режимов находится на уровне $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Если необходимо охладить топливо до температуры порядка $-55\text{...}-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, такое ограничение приводит к увеличению времени выполнения операции охлаждения до нескольких десятков часов. Приведенные обстоятельства свидетельствуют о необходимости применения в этих случаях теплоносителей с более низкой температурой замерзания.

Модернизированная схема системы охлаждения ракетного топлива в емкости со встроенным теплообменником. Дальнейшим направлением повышения эффективности охлаждения топлива в емкостях со встроенными теплообменниками является интенсификация теплообмена за счет организации течения топлива во внутренней полости таких теплообменников, встроенных в емкость-хранилище.

Рис. 1. Схема емкости со встроенным теплообменником, имеющим увеличенную площадь теплообмена, а также возможность организации движения топлива относительно своих поверхностей путем перемешивания компонента в емкости:

1 — баллоны с газообразным азотом; 2 — газовый редуктор; 3, 10, 11 — штуцеры для организации перемешивания топлива в емкости; 4 — дренаж; 5 — внутренняя полость, заполняемая топливом для увеличения площади теплообмена; 6 — полость теплообменника, заполненная антифризом; 7 — топливо; 8 — каналы для перетекания топлива в полость; 9 — барботер жидкого азота; 12 — оребрение теплообменника



Можно повысить интенсивность теплообмена между теплообменником и топливом в емкости увеличением площади теплообмена и организацией движения топлива относительно поверхностей теплообменника посредством его перемешивания либо естественно-конвективным способом, либо с помощью насоса заправочной системы. Для того чтобы увеличить поверхность теплообмена встроенного теплообменника, можно задействовать внутреннюю цилиндрическую полость, сообщающуюся с основным объемом емкости радиальными каналами (рис. 1). По ним топливо перетекает во внутренний объем полости, которая через стенку участвует в теплообмене с антифризом, охлаждаемым при барботаже жидким азотом.

Постановка задач исследования. Цель представленной работы — проанализировать эффективность охлаждения топлива жидким азотом в емкостях со встроенными теплообменниками, имеющими увеличенную площадь теплообмена, а также возможность организации движения топлива относительно поверхностей теплообменника посредством перемешивания компонента в емкости или путем использования в теплообменнике теплоносителей с пониженной по отношению к антифризу А-65 температурой замерзания.

В качестве вариантов применения в емкостях со встроенным теплообменником рассмотрены такие теплоносители, как эвтектическая смесь этиленгликоля и дистиллированной воды, содержащая 66,7 % этиленгликоля и 33,3 % дистиллированной воды, с температурой замерзания $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также водные растворы этанола и изопропилового спирта, которые имеют наиболее низкую температуру замерзания ($-117\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно).

Показатели эффективности охлаждения топлива с использованием жидкого азота. Для количественной оценки характеристик систем охлаждения топлива с применением жидкого азота введены следующие показатели, позволяющие оценить эффективность рассматриваемых технических решений по сравнению с существующими вариантами построения данных систем:

общий показатель эффективности системы охлаждения

$$\eta = \frac{m_b c_b (T_{\text{вн}} - T_{\text{вк}})}{m_a \left[r_a + c_a \left(\frac{T_{\text{вн}} + T_{\text{вк}}}{2} \right) - T_{\text{ка}} \right]}; \quad (1)$$

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

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

время охлаждения в заданном интервале температур единицы массы топлива

$$\bar{\tau}_{em_b} = \frac{\tau_{об}}{m_b} [\text{ч/т}], \quad (3)$$

где m_b, c_b — масса и удельная теплоемкость топлива; $T_{вн}, T_{вк}$ — начальная и конечная температура топлива при выполнении операции охлаждения; m_a — масса жидкого азота, затрачиваемая на охлаждение в заданном интервале температур заданной массы топлива m_b ; $r_a, c_a, T_{ка}$ — удельная теплота кипения, удельная теплоемкость и температура кипения азота; $\tau_{об}$ — время охлаждения топлива от начальной до конечной температуры.

Общий показатель эффективности системы охлаждения η , учитывающий потребный диапазон изменения температуры топлива, его теплофизические свойства, а также суммарные затраты жидкого азота при выполнении операции охлаждения топлива в заданном интервале температур, по сути является основным показателем эффективности, который характеризует коэффициент полезного действия системы охлаждения при использовании в качестве охлаждающей среды жидкого азота.

Показатели \bar{m}_a и $\bar{\tau}_{em_b}$, которые зависят от интервала температур при охлаждении топлива определенного вида, являются дополнительными характеристиками системы охлаждения. Их удобно использовать при сравнении различных вариантов построения систем и технологий охлаждения топлива и организации их эксплуатации.

Уравнения теплообмена для процесса охлаждения топлива в емкостях со встроенными теплообменниками. Для создания единого алгоритма и программы расчетов при анализе охлаждения топлива в емкостях со встроенными теплообменниками уравнения теплообмена представлены в виде системы уравнений, записанных для временных изменений температуры антифриза и топлива, включая различные режимы перемешивания топлива. Процесс охлаждения топлива во внутреннем пространстве емкости при теплообмене с жидким азотом, подаваемом через барботер в теплообменник с антифризом, в предположении о квазистационарности теплообмена между топливом и антифризом, а также между емкостью-хранилищем и окружающей средой, может быть представлен следующей системой уравнений:

$$k_e F_e (T_{yh} - T_b) \left(1 + \frac{\sum k_i F_i}{k_e F_e} N_p \right) + N_p Q_{nc} - n_t k_t F_t (T_b - T_{ah}) =$$

$$= (m_b c_b + m_e c_e + N_p \sum m_i c_i) \frac{dT_b}{d\tau}; \quad (4)$$

$$k_T F_T (T_b - T_{ан}) - \frac{G_a [r_a + c_a (T_{ан} - T_{ка})]}{n_T} = (m_{ан} c_{ан} + m_T c_T) \frac{dT_{ан}}{d\tau}; \quad (5)$$

$$T_b = T_{вн} \text{ при } \tau = 0; \quad (6)$$

$$T_{ан} = T_{ан.н} \text{ при } \tau = 0, \quad (7)$$

где k_e, F_e — коэффициент теплопередачи и площадь поверхности емкости-хранилища; $T_{ун} = T_n + \frac{A_{ен} q_c}{\alpha_{\Sigma н}}$ — условная наружная температура (T_n — температура наружного воздуха; $A_{ен}$ — поглощательная способность наружной поверхности емкости; q_c — средняя по поверхности плотность потока солнечной радиации; $\alpha_{\Sigma н}$ — суммарный коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности емкости); T_b — 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 отсутствии насосного перемешивания топлива в емкости; $Q_{нс}$ — тепловой поток, подводимый к топливу от насоса при перемешивании; n_T — количество теплообменников, встроенных в емкость; k_T, F_T — коэффициент теплопередачи и площадь поверхности теплообменника; $T_{ан}$ — температура антифриза; m_e, c_e — масса и удельная теплоемкость емкости; τ — время; G_a — массовый расход жидкого азота; $m_{ан}, c_{ан}$ — масса и удельная теплоемкость антифриза; m_T, c_T — масса и удельная теплоемкость теплообменника; $T_{вн}, T_{ан.н}$ — начальные температуры топлива и антифриза.

При проведении расчетов представленные зависимости были дополнены уравнениями, описывающими изменение теплофизических свойств топлива и антифриза в зависимости от температуры. Изменение температуры топлива T_b в емкости-хранилище и температуры антифриза $T_{ан}$ во встроенном теплообменнике находили при совместном решении уравнений (4) и (5) для различных вариантов проведения процессов охлаждения топлива. При этом эффективность

охлаждения ракетного топлива жидким азотом оценивалась по показателям эффективности системы охлаждения, определяемым по уравнениям (1), (2) и (3).

Правомерность разработанной математической модели охлаждения топлива в емкости со встроенным теплообменником при одновременном охлаждении антифриза и топлива подтверждена результатами экспериментов, проведенных на физической модели емкости при охлаждении углеводородного топлива ТС-1 с использованием жидкого азота и антифриза А-65 [11].

Результаты анализа. Характеристики охлаждения топлива с использованием встроенного в емкость теплообменника и жидкого азота оценивали для одновременной технологии изменения температуры антифриза, барботируемого жидким азотом, и для углеводородного топлива «нафтил» массой 10 500 кг от начальной температуры 34 °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.

Характерный вид кривых изменения температуры антифриза А-65 и топлива «нафтил» при технологии их одновременного охлаждения в процессе подачи в теплообменник жидкого азота с постоянным массовым расходом показан на рис. 2. Согласно приведенным графикам, отмечается значительная разность (более 30 °С) между температурами топлива и антифриза при предельном значении расхода жидкого азота; в конце операции охлаждения температура антифриза снижается до предельного значения –60 °С, что на 5 °С выше температуры его замерзания.

Расчетные характеристики эффективности охлаждения РГ-1 от температуры 34 °С до температуры –29 °С с помощью теплообменника при заполнении его антифризом А-65, а также этанолом и изопропиловым спиртом при естественно-конвективном перемешивании топлива в вертикальной емкости, выполненной по схеме, соответствующей рис. 1, и при отсутствии насосного перемешивания топлива в емкости приведены на рис. 3.

При сравнении результатов выявлено, что температуры топлива на внешней стенке теплообменника $T_{w\min}$ практически совпадают при охлаждении разными теплоносителями, конечная температура теплоносителя $T_{анк}$ несколько выше для случая охлаждения с помощью водного раствора этилового спирта. Это дает возможность использовать более широкий диапазон расхода жидкого азота до достижения температуры замерзания топлива на внешней стенке теплообменника. В случае применения этанола и изопропилового

спирта в качестве теплоносителя в теплообменнике общий показатель эффективности η выше на 3,8 %, относительные затраты жидкого азота \bar{m}_a на 4,4% ниже, а время проведения операции охлаждения топлива в 2,6 раза меньше, чем при использовании антифриза А-65, для рассмотренного варианта охлаждения топлива в емкости со встроенным теплообменником при естественно-конвективном перемешивании топлива в емкости.

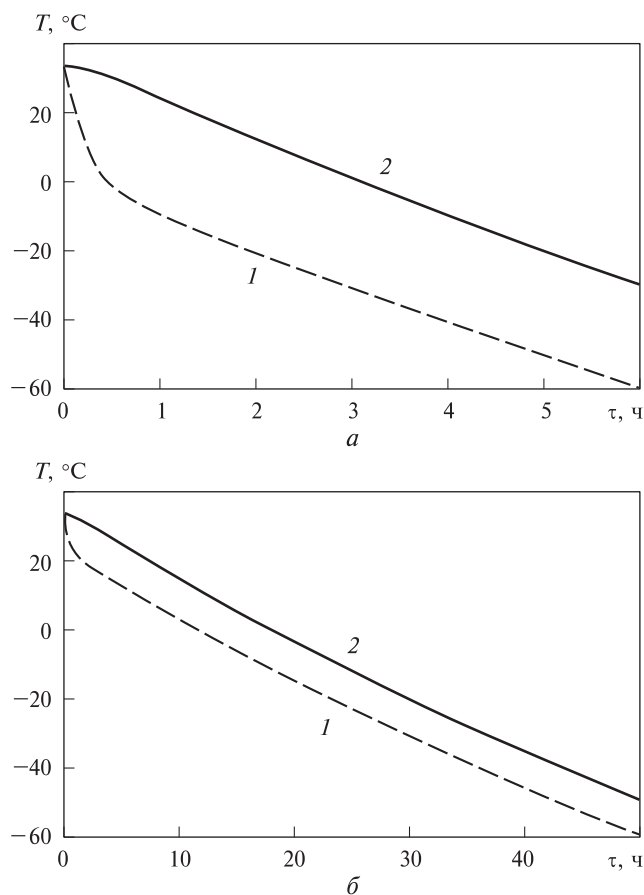


Рис. 2. Изменение температур антифриза А-65 и топлива при их одновременном охлаждении в процессе подачи в теплообменник с антифризом жидкого азота, имеющего постоянный массовый расход, при предельном значении расхода жидкого азота (*а*) и при его пониженном расходе (*б*) для охлаждения топлива до более низкой температуры:

1 — температура антифриза; *2* — температура топлива

Сравнение характеристик охлаждения топлива в емкости со встроенным теплообменником, имеющим увеличенную площадь теплообмена, и в котором предусмотрена возможность организации движения топлива относительно поверхностей теплообменника с использова-

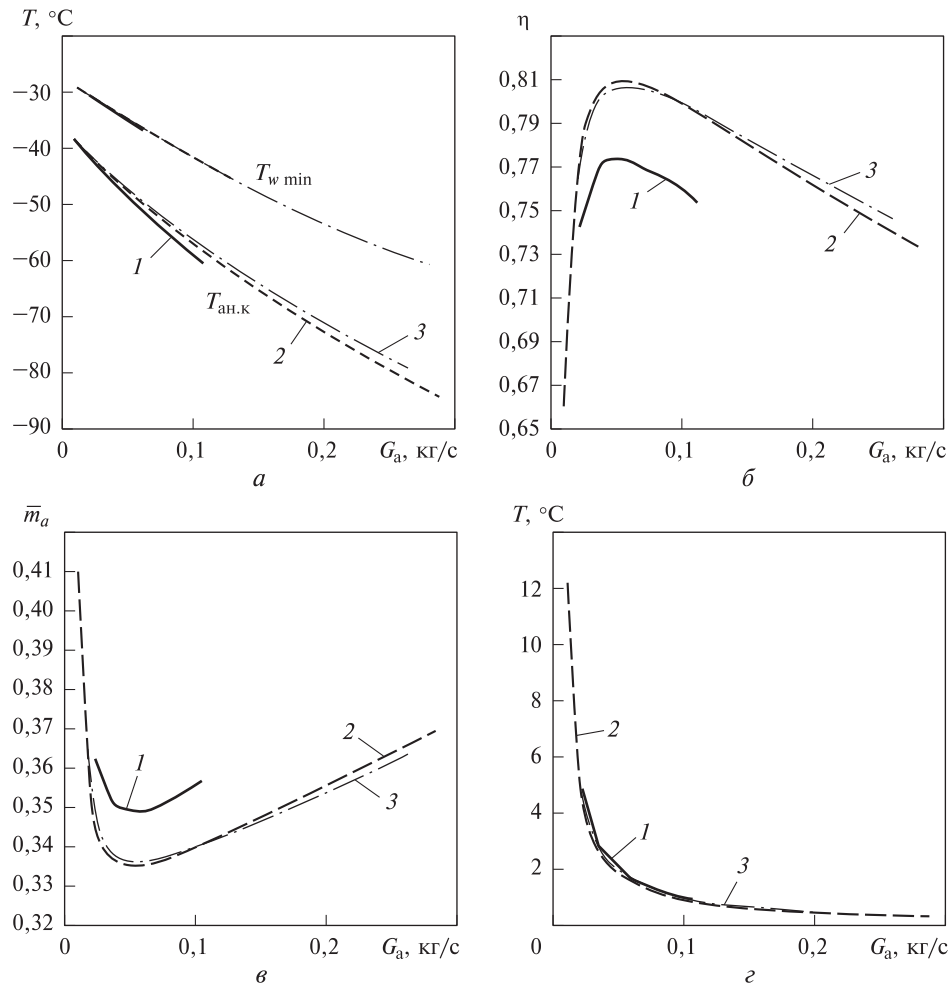


Рис. 3. Изменение минимальной температуры на поверхности теплообменника $T_{w \min}$ и конечной температуры антифриза $T_{\text{ан.к}}$ (а), общего показателя эффективности охлаждения η (б), относительных затрат жидкого азота \bar{m}_a (в) и времени охлаждения единицы массы топлива $\tau_{\text{см}}$ (г) в зависимости от расхода жидкого азота при охлаждении топлива «нафтил» массой 10 500 кг от $T = 34$ °C до $T = -29$ °C в вертикальной емкости со встроенным теплообменником при барботаже жидким азотом в теплообменнике антифриза А-65 (1), водного раствора этанола (2) и изопропилового спирта (3) при естественно-конвективном перемешивании топлива

нием естественно-конвективного перемешивания, и существующей системы охлаждения при теплообмене топлива с жидким азотом с применением теплообменников «труба в трубе» показывает, что при охлаждении топлива встроенным в емкость теплообменником затраты жидкого азота на охлаждение топлива на 40...41,5 % меньше, чем при существующей системе охлаждения. Если в качестве теплоносителя в теплообменнике применяется антифриз А-65, то в обоих

вариантах получится практически сравнимое время процесса охлаждения. Однако оно уменьшается на 31...35 %, если в качестве теплоносителя используются этанол и изопропиловый спирт.

Поскольку одним из ограничений, накладываемых на процесс охлаждения, является недопустимость снижения температуры поверхностей теплообменника ниже температуры замерзания топлива, для улучшения показателей эффективности теплообмена в целом и повышения температуры стенок теплообменника, контактирующих с топливом, требуется повышение коэффициентов теплоотдачи со стороны охлаждаемого топлива к теплообменнику, что может быть достигнуто за счет перемешивания топлива насосом заправочной системы.

Операция перемешивания компонента в емкости-хранилище является штатной и проводится перед выполнением заправки топливных баков ракет, разгонных блоков и космических аппаратов топливом.

Для вертикальной емкости со встроенным теплообменником, выполненном по схеме, приведенной на рис. 1, наиболее предпочтительным способом организации перемешивания топлива с использованием насоса является подключение всасывающей магистрали насоса к штуцеру, который связан вертикальным трубопроводом с внутренней полостью теплообменника. Выходы радиальных каналов в полости являются тангенциальными, что обеспечивает закрутку топлива в этой полости потоками, выходящими из них, относительно внутренней поверхности теплообменника. Напорная магистраль от насоса подключается к тангенциальному вводу, расположенному на боковой цилиндрической поверхности емкости ниже верхнего уровня топлива. Это также обеспечивает закрутку массы топлива в емкости относительно наружной цилиндрической поверхности теплообменника, у которой в данном случае либо не должно быть вертикальных ребер, либо должны быть кольцевые ребра.

Характеристики охлаждения топлива «нафтил» в емкости со встроенным теплообменником, заполненным антифризом А-65, при естественно-конвективном перемешивании и при перемешивании насосом с закруткой топлива в емкости и в полости теплообменника приведены для сравнения на рис. 4.

Эффект от перемешивания топлива насосом с закруткой топлива в емкости и во внутренней полости теплообменника заключается в возможности увеличения расхода жидкого азота, подаваемого на охлаждение теплоносителя в теплообменнике, и уменьшения времени операции охлаждения топлива при использовании антифриза А-65 в 1,5 раза, а при использовании этанола и изопропилового спирта в 2,8 и 2,4 раза соответственно. При этом возрастает общий показатель эффективности охлаждения на 1,5...2,1 % и сокращаются затраты жидкого азота на охлаждение топлива на 1,6...2,2 %.

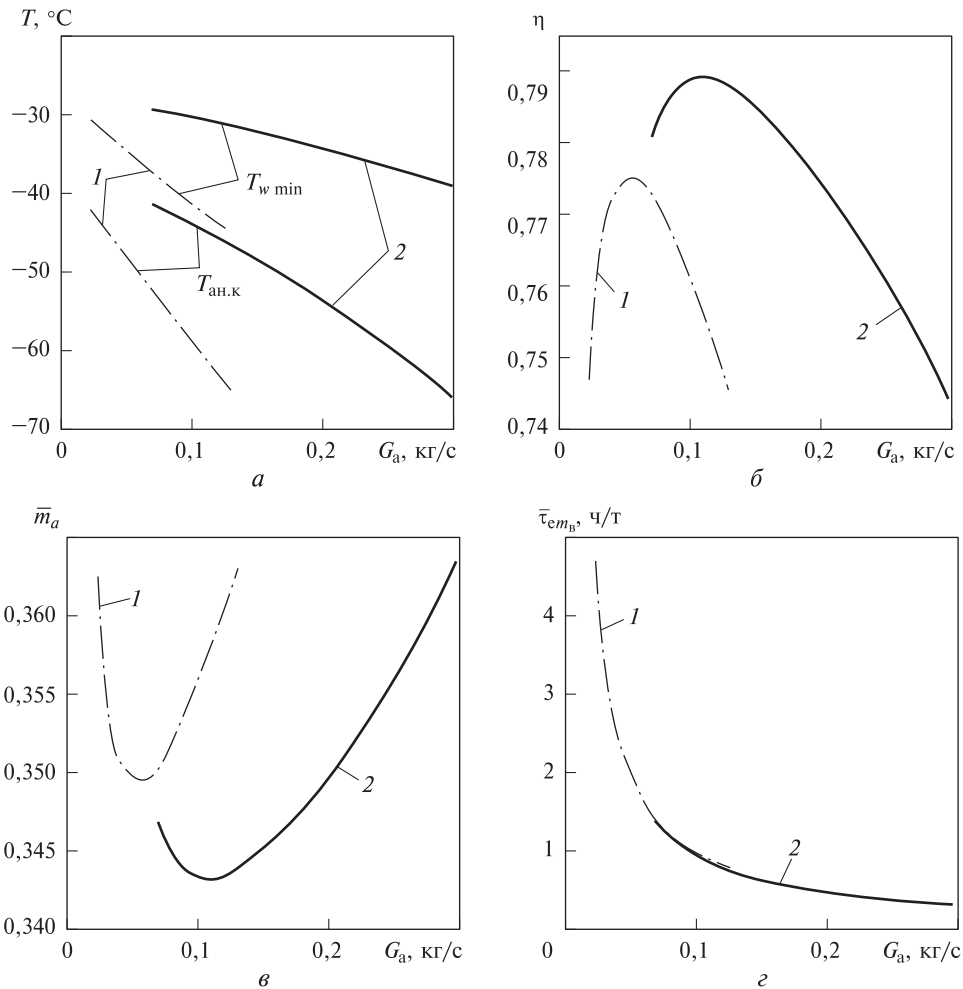


Рис. 4. Зависимость минимальной температуры теплообменника $T_{w \min}$ и конечной температуры антифриза $T_{ан.к}$ (а), общего показателя эффективности охлаждения η (б), относительных затрат жидкого азота \bar{m}_a (в) и времени охлаждения единицы массы топлива $\bar{\tau}_{см.в}$ (г) от расхода жидкого азота при охлаждении топлива массой 10 500 кг от температуры 34 °С до температуры –29 °С в вертикальной емкости со встроенным теплообменником при барботаже жидким азотом антифриза А-65 при естественно-конвективном перемешивании топлива (1) и при перемешивании топлива насосом (2) с закруткой топлива в емкости и во внутренней полости теплообменника

Закключение. По результатам проведенного исследования выявлено, что применение во встроенном теплообменнике антифризов с пониженными значениями температуры замерзания позволяет увеличить расход жидкого азота, которым барботируется антифриз в теплообменнике, и тем самым сократить время проведения операции охлаждения топлива в 2,5–2,7 раза.

Проанализированы вопросы интенсификации теплообмена между топливом и жидким азотом за счет организации движения топлива в емкости относительно поверхностей теплообменника с использованием насосного и естественно-конвективного способов перемешивания топлива в емкости.

Получены данные о возможности сокращения затрат жидкого азота на охлаждение топлива на 40...43 % по сравнению с затратами при установке системы охлаждения, оборудованной теплообменниками «труба в трубе», при использовании естественно-конвективного и насосного способов перемешивания компонента относительно поверхностей теплообменника в емкости. При этом для естественно-конвективного способа перемешивания топлива в емкости можно уменьшить продолжительность процесса охлаждения на 31...35 % при использовании в качестве теплоносителя этанола и изопропилового спирта, а для насосного способа перемешивания с закруткой топлива в емкости и во внутренней полости теплообменника добиться сокращения временных затрат на 32,5 % при использовании в качестве теплоносителя в теплообменнике антифриза А-65 и на 74 % и 77 % — при использовании в качестве теплоносителя изопропилового спирта и этанола.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Александров А.А., Денисов О.Е., Золин А.В., Чугунков В.В. Охлаждение ракетного топлива стартовым оборудованием с применением жидкого азота. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2013, № 4, с. 24–29.
- [2] 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 (99). <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-3-1965>
- [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] Комлев Д.Е., Соловьев В.И. Охлаждение нафтила методом криогенного барботажа. *Новости техники: сб.* Москва, КБТМ, 2004, с. 137–141.
- [5] 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), с. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-1-1461>
- [6] Александров А.А., Бармин И.В., Павлов С.К., Чугунков В.В. Аналитическая модель эффективной технологии температурной подготовки ракетного топлива в емкостях заправочных систем наземных комплексов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2017, № 4, с. 86–95.
- [7] Александров А.А., Бармин И.В., Павлов С.К., Чугунков В.В. Результаты экспериментальных исследований процессов температурной подготовки углеводородного топлива с использованием теплообменника, размещенно-

- го в антифризе. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 1 (85). <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-1-1842>
- [8] 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
- [9] 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.
- [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. <https://doi.org/10.1063/5.0036228>
- [12] 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).
- [13] Кобызев С.В. Моделирование массообменных процессов при обезвоживании углеводородного ракетного горючего барботированием азотом. *Актуальные проблемы Российской космонавтики. Матер. XXXVI Академических чтений по космонавтике*, Москва, Комиссия РАН, 2012, с. 356–357.
- [14] Кобызев С.В. Методика поверочного расчета процесса осушки углеводородного горючего методом барботажа газообразным азотом. *Актуальные проблемы Российской космонавтики. Матер. XXXVII Академических чтений по космонавтике*. Москва, Комиссия РАН, 2013, с. 385–386.
- [15] Домашенко А.М., Блинова И.Д. Исследования тепломассообмена при сбросе криогенных продуктов в воду. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2007, № 12, с. 17–19.
- [16] Домашенко О.Е. Системы термостатирования. В кн.: *История развития отечественной наземной ракетно-космической инфраструктуры*. Москва, ООО «Издательский дом «Столичная энциклопедия», 2017, с. 299–301.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.

Статья поступила в редакцию 05.03.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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>

Александров Анатолий Александрович — д-р техн. наук, ректор МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области обеспечения безопасности, организации хранения и транспортирования углеводородного топлива.
e-mail: rector@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

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

Indicators of efficiency of liquid nitrogen fuel cooling in tanks with integrated heat exchangers

© A.A. Aleksandrov¹, I.V. Barmin^{1,2}, K.I. Denisova¹, V.V. Chugunkov¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

²Centre for Operation of Space Ground Based Infrastructure, Moscow, 107996, Russia

The paper describes the fuel cooling system which uses liquid nitrogen in the tanks of ground complexes equipped with integrated heat exchangers. We analyzed the characteristics of cooling liquid fuel in tanks with integrated heat exchangers filled with antifreeze, when sparging antifreeze with liquid nitrogen. As a result of the analysis, we introduced the indicators to assess the efficiency of the considered technical solutions in comparison with the existing options for constructing these systems. Furthermore, we developed a mathematical model of the cooling process in the form of a system of equations for temporary changes in the temperature of antifreeze and fuel, including the changes at various modes of fuel mixing. The paper gives the results of studies carried out in order to increase the efficiency of fuel cooling processes at various flow rates of liquid nitrogen by organizing the processes of its heat exchange with the surfaces of the integrated heat exchanger and the use of various types of antifreeze.

Keywords: liquid fuel, cooling, integrated heat exchanger, cooling efficiency indicators

REFERENCES

- [1] Aleksandrov A.A., Denisov O.E., Zolin A.V., Chugunkov V.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2013, no. 4, pp. 24–29.
- [2] Aleksandrov A.A., Barmin I.V., Zolin A.V., Chugunkov V.V. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2020, iss. 3 (99). <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-3-1965>
- [3] Aleksandrov A.A., Barmin I.V., Kunis I.D., Chugunkov V.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2016, no. 2, pp. 7–27.
- [4] Komlev D.E., Solovov V.I. Okhlazhdenie naftila metodom kriogenogo barbotazha [Cooling of naphthyl by cryogenic sparging]. *Novosti tekhniki: sb. [Engineering News]*. Moscow, KBTM Publ., 2004, pp. 137–141.
- [5] Pavlov S.K., Chugunkov V.V. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, iss. 1 (49), pp. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-1-1461>
- [6] Aleksandrov A.A., Barmin I.V., Pavlov S.K., Chugunkov V.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2017, no. 4, pp. 86–95.
- [7] 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 (85). <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-1-1842>
- [8] Aleksandrov A.A., Barmin I.V., Pavlov S.K., Chugunkov V.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya 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
- [9] Aleksandrov A.A., Barmin I.V., Denisova K.I., Chugunkov V.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2017, no. 3, pp. 4–17.

- [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. <https://doi.org/10.1063/5.0036228>
- [12] Kobyzhev S.V. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education: Technical Magazine of BMSTU*, 2011, no. 11. Available at: <http://technomag.neicon.ru/doc/245147.html> (accessed December 20, 2016).
- [13] Kobyzhev S.V. Modelirovanie massoobmennyykh protsessov pri obezvozhivanii uglevodorodnogo raketnogo goryuchego barbotirovaniem azotom [Simulation of mass transfer processes during dehydration of hydrocarbon rocket fuel by sparging with nitrogen]. *Aktualnye problemy Rossiiskoy kosmonavtiki. Mater. XXXVI Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike* [Actual problems of the Russian cosmonautics. Materials of XXXVI Academic Readings on Astronautics]. Moscow, Komissiya RAS Publ., 2012, pp. 356–357.
- [14] Kobyzhev S.V. Metodika poverochnogo rascheta protsessa osushki uglevodorodnogo goryuchego metodom barbotazha gazoobraznym azotom [Calculation methodology for hydrocarbon fuel drying process by sparging with gaseous nitrogen]. *Aktualnye problemy Rossiiskoy kosmonavtiki. Mater. XXXVII Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike* [Actual problems of the Russian cosmonautics. Materials of XXXVII Academic Readings on Astronautics]. Moscow, Komissiya RAS Publ., 2013, pp. 385–386.
- [15] Domashenko A.M., Blinova I.D. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie — Chemical and Petroleum Engineering*, 2007, no. 12, pp. 17–19.
- [16] Domashenko O.E. Sistemy termostirovaniya [Thermostatic control systems]. In: *Istoriya razvitiya otechestvennoy nazemnoy raketno-kosmicheskoy infrastruktury* [History of development of domestic ground-based rocket and space infrastructure]. Moscow, Izd. dom Stolichnaya entsiklopediya Publ., 2017, pp. 299–301.
- [17] Nakoryakov V.E., Tsoy A.N., Mezentsev I.V., Meleshkin A.V. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezultaty, tekhnologii — Modern Science: Researches, Ideas, Results, Technologies*, 2013, no. 1 (12), pp. 260–264.
- [18] Nakoryakov V.E., Tsoy A.N., Mezentsev I.V., Meleshkin A.V. Boiling-up of liquid nitrogen jet in water. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, vol. 21, no. 3, pp. 279–284.
- [19] Nakoryakov V.E., Tsoy A.N., Mezentsev I.V., Meleshkin A.V. *Teplofizika i aeromekhanika — Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, no. 3, pp. 293–298.

Aleksandrov A.A., Dr. Sc. (Eng.), Rector of Bauman Moscow State Technical University; author of over 100 publications in the field of safety ensuring, organization of storage and transportation of hydrocarbon fuel. e-mail: rector@bmstu.ru

Barmin I.V., Dr. Sc. (Eng.), Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Rocket Launch Complexes, Bauman Moscow State Technical University, Science Adviser Director General, Centre for Operation of Space Ground Based Infrastructure; Author of over 300 publications in the field of rocket and space technology. e-mail: kafsm8@bmstu.ru

Denisova K.I., Assist. Professor, Department of Rocket Launch Complexes, Bauman Moscow State Technical University; author of 16 publications in the field of rocket and space technology. e-mail: kafsm8@bmstu.ru

Chugunkov V.V., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Rocket Launch Complexes, Bauman Moscow State Technical University; author of 150 publications in the field of ground-based equipment of rocket and space technology. e-mail: kafsm8@bmstu.ru