

## Результаты экспериментальных исследований процессов температурной подготовки углеводородного топлива с использованием теплообменника, размещенного в антифризе

© А.А. Александров<sup>1</sup>, И.В. Бармин<sup>1,2</sup>, С.К. Павлов<sup>1</sup>, В.В. Чугунков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

<sup>2</sup>ФГУП «ЦЭНКИ», Москва, 107996, Россия

*Приведено описание экспериментального стенда и результатов экспериментального исследования процессов температурной подготовки углеводородного топлива в теплообменнике, размещенном в среде антифриза. Режим охлаждения топлива обеспечен охлаждением антифриза посредством барботажа жидким азотом. Нагрев топлива осуществляется трубчатым электрическим нагревателем, размещенным в резервуаре с антифризом. Операция температурной подготовки углеводородного топлива применяется в космических ракетных комплексах для обеспечения необходимых свойств топлива и повышения эффективности двигательных установок ракет космического назначения. В экспериментах реализована эффективная технология охлаждения углеводородного топлива посредством улучшения теплообмена на наружной поверхности теплообменника, вызванного взаимодействием жидкого азота с антифризом. В результате экспериментальных исследований получены количественные данные о процессах охлаждения и нагрева топлива в теплообменнике, находящемся в среде антифриза в диапазоне температур 243...293 К. Получены экспериментальные данные о характеристиках теплообмена, необходимых для проведения расчетов теплопередачи между топливом и антифризом и определения параметров процессов температурной подготовки топлива.*

**Ключевые слова:** жидкое углеводородное топливо, температурная подготовка, охлаждение и нагрев, резервуар с антифризом, теплообменник в антифризе, жидкий азот, экспериментальное исследование

**Введение.** Цель проведения экспериментов — исследование процессов температурной подготовки жидкого углеводородного топлива в теплообменнике, расположенном в среде антифриза, при его охлаждении жидким азотом и нагреве с использованием трубчатых электрических нагревателей.

Операция температурной подготовки углеводородного топлива применяется в космических ракетных комплексах для обеспечения необходимых свойств топлива и повышения эффективности двигательных установок ракет космического назначения. Так, углеводородное топливо керосин Т1, применяемый в качестве горючего для первой и второй ступеней ракеты «Союз-2», подвергается температурной подготовке до среднебаковой температуры  $-3 \pm 2,5$  °С; топливо нафтил, которым заправляется третья ступень этой ракеты, — до  $-20 \pm 2,5$  °С [1]. В ракетно-космических комплексах «Зенит» и «Анга-

ра» углеводородное топливо РГ-1 перед заправкой в топливные баки ракеты охлаждают до температуры  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  [2, 3].

**Обзор источников.** Вопросы исследования и создания систем подготовки ракетного топлива в составе наземного оборудования ракетных комплексов рассмотрены в работах [2–7].

Температурная подготовка ракетного топлива в емкостях-хранилищах заправочных систем наземного оборудования осуществляется за счет применения встроенных во внутреннее пространство и внешних по отношению к емкости теплообменников, в которых в качестве теплопередающих сред могут использоваться воздух, антифризы или жидкий азот [4, 8].

В системах температурной подготовки (СТП) топлива с применением жидкого азота, реализованных в составе стартового оборудования ракетных комплексов «Союз», «Зенит-3SL» и «Рокот», используются различные подходы к построению систем охлаждения компонентов ракетного топлива (КРТ), основанных на теплообменных процессах с жидким азотом [2, 9]. К ним относятся бесконтактное охлаждение топлива кипящим жидким азотом в теплообменнике, непосредственный ввод жидкого азота через барботер в массу жидкого углеводородного топлива, а также понижение температуры топлива посредством теплообмена в теплообменнике с антифризом, охлаждаемым в отдельном резервуаре при барботаже жидким азотом. В большинстве СТП охлаждение КРТ осуществляется в теплообменниках при теплообмене через стенку непосредственно с жидким азотом [1, 2, 4] либо с жидкой средой в виде антифриза, охлаждаемого в отдельном резервуаре при барботаже антифриза жидким азотом [9]. Результаты исследования тепломассообмена при сбросе криогенных продуктов в водную среду представлены в работе [10]. Процессы взаимодействия жидкого азота с жидкими средами рассмотрены в работах [9, 11–13].

Негативными сторонами СТП с охлаждением КРТ кипящим жидким азотом в теплообменниках являются возможность кристаллизации топлива на охлажденных поверхностях и недоиспользование охлаждающей способности испаряющегося азота вследствие ограничений скорости его течения в каналах секций теплообменников [14], что приводит к повышенным затратам жидкого азота на проведение операции охлаждения КРТ.

Охлаждение КРТ в теплообменнике при теплообмене с антифризом, охлажденным посредством барботажа жидким азотом в специальном резервуаре, требует применения двух контуров циркуляции через теплообменник топлива и антифриза при использовании двух насосов [9], при работе которых происходит выделение теплоты, что также приводит к повышенным расходам жидкого азота на проведение операции охлаждения КРТ.

В работах [14, 15] приведены расчетные зависимости и результаты математического моделирования изменений температуры топлива в емкости заправочной системы при использовании СТП, в которой охлаждение (нагрев) КРТ осуществляется в теплообменнике, помещенном в среду антифриза. Процесс охлаждения КРТ основан на барботаже антифриза жидким азотом, режим нагрева обеспечен электронагревательными элементами, размещенными в резервуаре с антифризом. Приведенное построение СТП применимо для любых КРТ и обладает большей эффективностью по относительным затратам жидкого азота и времени операции подготовки по сравнению с существующими системами, в которых применяется охлаждение топлива с использованием жидкого азота и теплообменника.

Правомерность разработанных математических моделей температурных режимов КРТ подтверждается экспериментальными данными о процессах охлаждения и нагрева топлива в теплообменнике, находящемся в среде антифриза. Подобные экспериментальные данные необходимы также для проектирования и эксплуатации предложенного варианта СТП КРТ. Вследствие отсутствия таких данных в представленной работе приведены результаты экспериментальных исследований процессов охлаждения и нагрева топлива в теплообменнике, находящемся в среде антифриза, а также характеристики теплообмена, необходимые для проведения расчетов теплопередачи между топливом и антифризом и определения параметров процессов температурной подготовки топлива.

**Состав экспериментальной установки.** Разработанная экспериментальная установка, общий вид которой представлен на рис. 1, состоит из резервуара 1, заполненного КРТ (керосин ТС-1), резервуара 2 с антифризом А-65, в котором размещены витой теплообменник, барботер жидкого азота и трубчатый электрический нагреватель, а также криогенной емкости 3 с жидким азотом, размещенной на платформе 4 весоизмерительного устройства, насосов вспомогательного 5 и основного 6 контуров, соединительных 7 и дренажного 8 трубопроводов.

Установка представляет собой физическую модель СТП КРТ и позволяет осуществлять режимы охлаждения, нагрева и поддержания температуры КРТ в требуемом температурном диапазоне. Процесс охлаждения (нагрева) топлива осуществляется в витом теплообменнике, размещенном в резервуаре с антифризом (рис. 2).

Теплообменник 1 выполнен из трубы с наружным диаметром 24 мм и толщиной стенки 1 мм. Материал трубы — коррозионно-стойкая сталь. Для уменьшения массы антифриза в резервуар 2 с теплообменником помещен полый вытеснительный стакан 3.

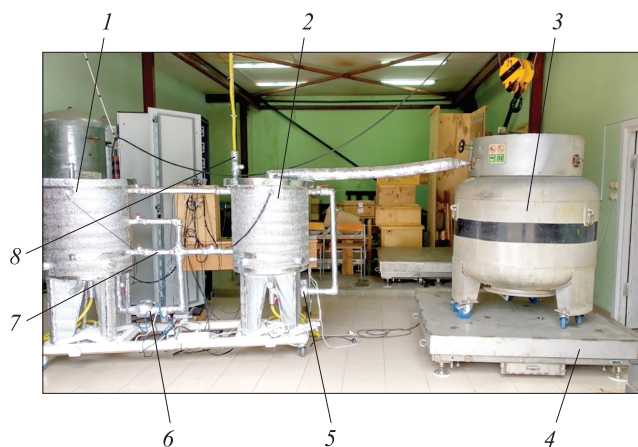


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

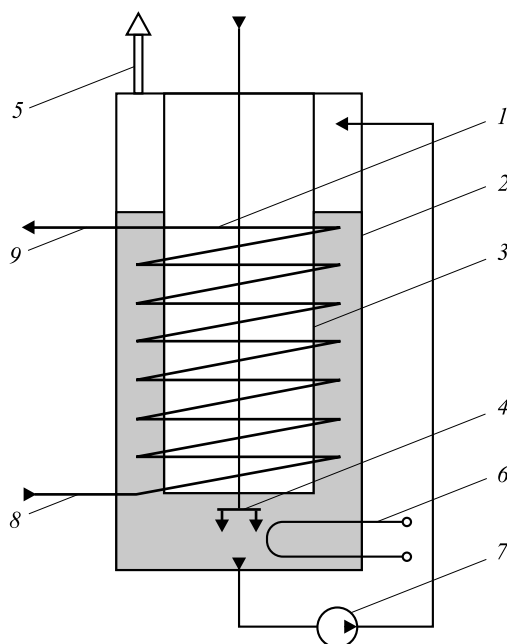


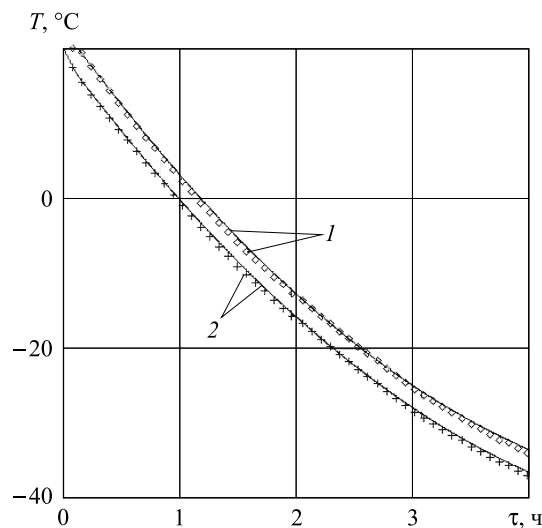
Рис. 2. Схема температурной подготовки топлива в витом теплообменнике, размещенном в резервуаре с антифризом

В процессе экспериментов при охлаждении КРТ осуществлялась подача жидкого азота через барботер 4 в нижнюю часть резервуара, заполненного антифризом. Образующийся при теплообмене с антифризом газообразный азот обеспечивал интенсивное движение антифриза относительно поверхности теплообменника и отводился через дренажный трубопровод 5. После окончания эксперимента по охлаждению КРТ при включении трубчатого электрического нагре-

вателя 6 и насоса 7 проводился нагрев топлива до температуры воздуха в лаборатории, после чего повторялся процесс охлаждения при новых параметрах подачи КРТ в теплообменник и жидкого азота в резервуар с антифризом.

В ходе экспериментов проводилось измерение температур среды в резервуаре 2, КРТ на входе 8 и выходе 9 из теплообменника и в резервуаре с КРТ, азота в дренажном трубопроводе, а также воздуха в лаборатории. Одновременно измеряли объемный расход КРТ через теплообменник, время от начала эксперимента и изменяющуюся массу криогенной емкости с жидким азотом, что требовалось для определения массового расхода азота, подаваемого в барботер. При проведении экспериментов также проводили измерение массы антифриза, попавшего в дренажную магистраль с газообразным азотом, что позволяло определять значения массы антифриза, находящегося в резервуаре 2 в текущем эксперименте. Все измерения и их последующая обработка осуществлялись с использованием информационно-измерительной системы экспериментальной установки в единой шкале времени.

**Результаты экспериментальных исследований.** В процессе проведения экспериментальных исследований проверена возможность охлаждения топлива до температуры  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже с использованием предложенного варианта СТП КРТ. На рис. 3 представлены экспериментальные значения температур топлива ТС-1 в резервуаре 1 и антифриза А-65 в резервуаре 2 (см. рис. 1) при барботаже антифриза



**Рис. 3.** Охлаждение топлива ТС-1 (1) в теплообменнике, расположенном в среде антифриза А = 65 (2), при барботаже жидким азотом:  
□, + — экспериментальные значения, сплошные линии — расчетные

жидким азотом с расходом 0,0074 кг/с, а также расчетные данные (сплошные кривые), полученные с использованием математической модели процесса температурной подготовки топлива [14, 15].

Как следует из представленных данных, в процессе барботажа антифриза жидким азотом наблюдается стабильное снижение температуры антифриза и топлива от температуры окружающей среды до температуры  $-33,5$  °С, которая может быть еще снижена при продолжении процесса ввода жидкого азота в антифриз. По результатам сравнения температур, полученных экспериментально и расчетным путем, максимальные значения относительных погрешностей составили 3,2 и 4,1 % соответственно для температур топлива ТС-1 и антифриза А-65. Это является удовлетворительным результатом и подтверждает правомерность математической модели процесса температурной подготовки топлива в теплообменнике, расположенном в среде антифриза, при барботаже жидким азотом [14, 15].

По измеренным значениям температуры топлива на входе и выходе из теплообменника и антифриза в резервуаре 2, расхода и снижения температуры топлива в теплообменнике, а также температуры на его наружной поверхности определяли значения теплового потока, отводимого от КРТ в теплообменнике, и средние значения коэффициентов теплопередачи через стенку теплообменника и теплоотдачи на его наружной поверхности к двухфазной среде антифриз — азот (рис. 4). Эти значения в дальнейшем использовали для анализа и обобщения полученных экспериментальных данных.

Теплообмен между внешней поверхностью теплообменника и двухфазной средой антифриз — азот при барботаже антифриза жидким азотом реализуется за счет конвекции. Для описания характеристик конвективной теплоотдачи при обобщении результатов экспериментов получено критериальное уравнение

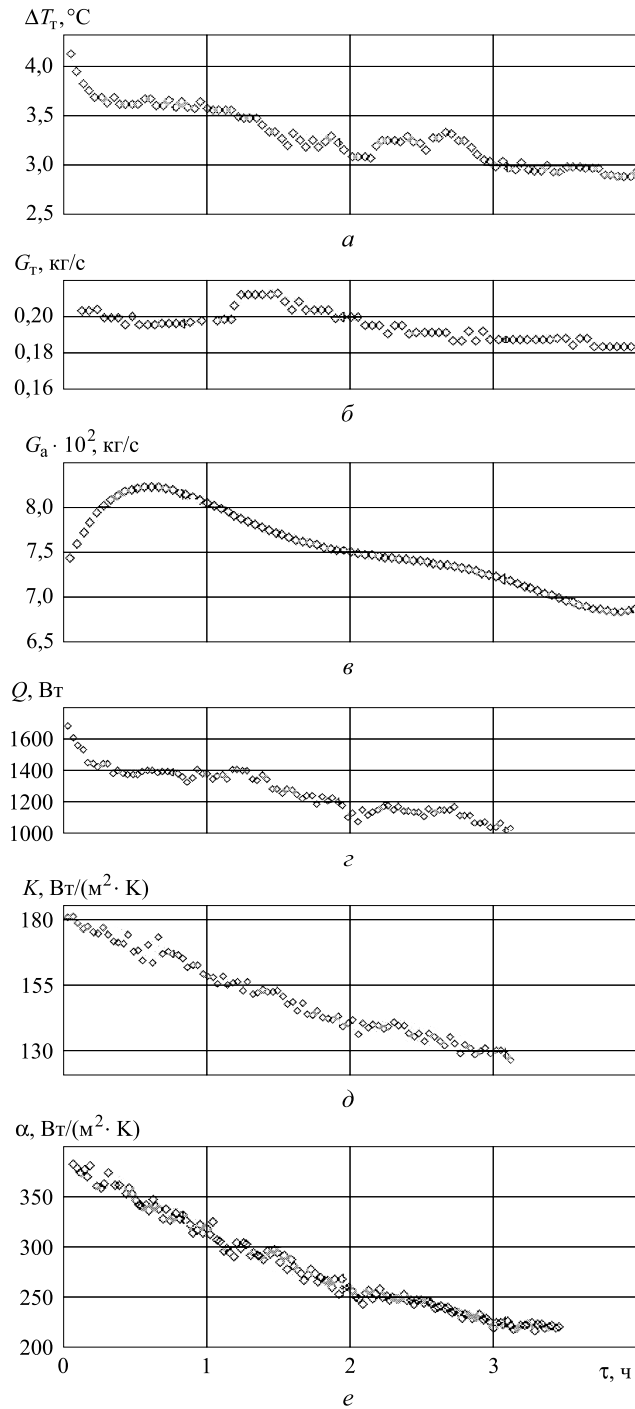
$$\overline{\text{Nu}}_d = 2,2(\text{Ra}_d V_{\text{ан}}/V_a)^{0,2}.$$

Здесь  $\overline{\text{Nu}}_d$  — среднее число Нуссельта;  $\text{Ra}_d$  — число Рэлея, при определении которых за характерный размер принят наружный диаметр  $d$  трубы витого теплообменника, а теплофизические характеристики определяли по характеристикам антифриза при соответствующей температуре среды антифриз — азот;  $V_{\text{ан}}/V_a$  — отношение объемов антифриза и газообразного азота в резервуаре с теплообменником.

Полученное соотношение охватывает диапазон определяющего параметра

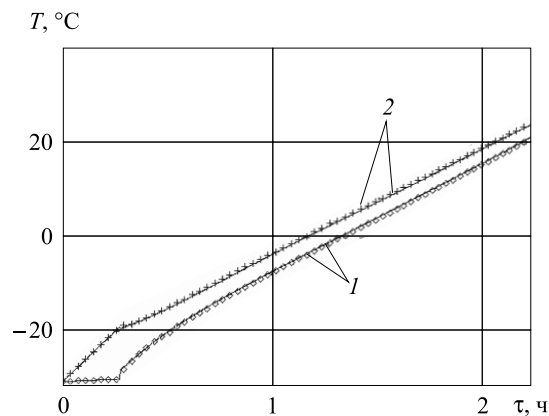
$$2,5 \cdot 10^4 \leq \text{Ra}_d V_{\text{ан}}/V_a \leq 4,6 \cdot 10^5$$

и описывает результаты экспериментов в пределах доверительного интервала  $\pm 6$  %.



**Рис. 4.** Характеристики теплообмена в витом теплообменнике между топливом и двухфазной средой антифриз — азот:  
*a* — снижение температуры топлива  $T_T$  в теплообменнике; *б* — массовый расход КРТ  $G_T$ ; *в* — массовый расход жидкого азота  $G_a$ ; *з* — тепловой поток  $Q$ , отводимый от КРТ; *д* — коэффициент теплопередачи  $K$  через стенку теплообменника; *е* — коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  на наружной поверхности теплообменника к среде антифриз — азот

В процессе проведения экспериментальных исследований проверена эффективность нагрева топлива с использованием предложенного варианта СТП КРТ. На рис. 5 представлены экспериментальные значения температуры топлива ТС-1 в резервуаре 1 и антифриза А-65 в резервуаре 2 (см. рис. 1) при включении нагревателя и насоса вспомогательного контура СТП, а также расчетные данные, полученные с использованием математической модели процесса температурной подготовки топлива [15].

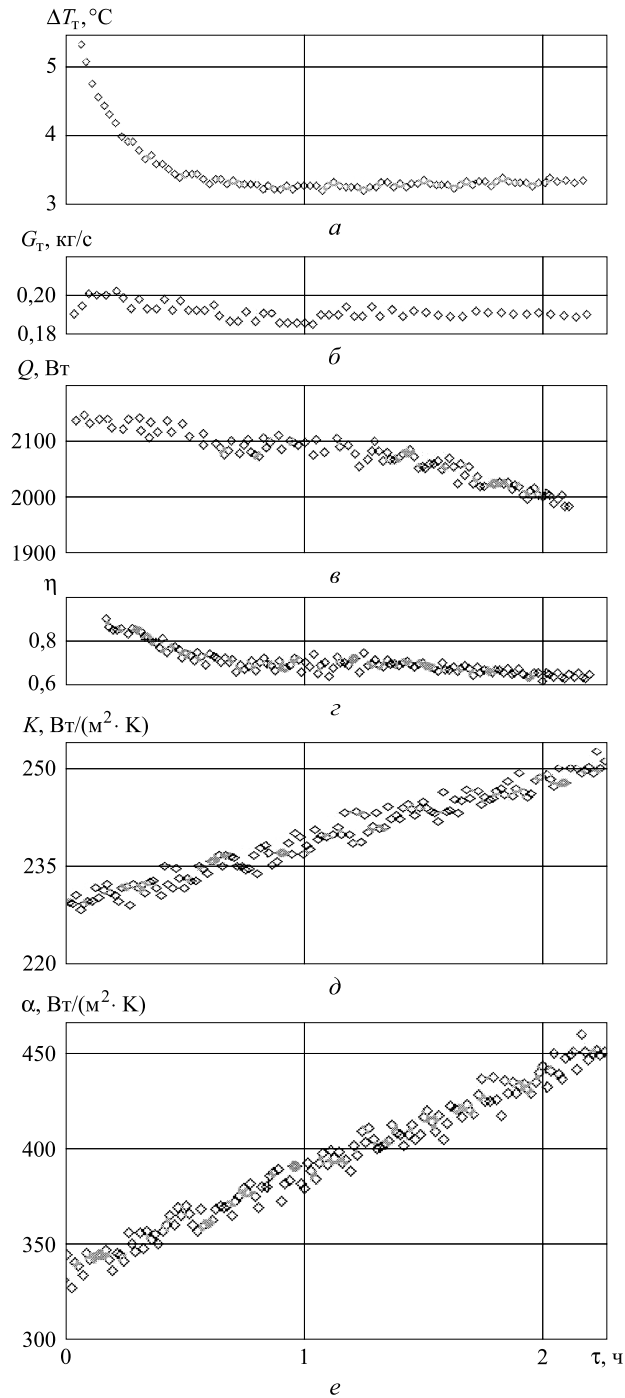


**Рис. 5.** Нагрев топлива ТС-1 (1) в теплообменнике, расположенном в среде антифриза А-65 (2) при включении нагревателя и насоса вспомогательного контура СТП:  
□, + — экспериментальные значения; сплошные линии — расчетные данные

По результатам сравнения значений температуры, полученных экспериментально и расчетным путем, максимальные значения относительных погрешностей составили 3,7 и 4,5 % соответственно для температуры топлива ТС-1 и антифриза А-65, что является удовлетворительным результатом и подтверждает правомерность математической модели процесса нагрева топлива в теплообменнике, расположенном в среде антифриза [15].

По измеренным значениям температуры топлива на входе и выходе из теплообменника и антифриза в резервуаре 2 (см. рис. 1), расхода и повышения температуры топлива в теплообменнике, а также температуры на его наружной поверхности определяли значения теплового потока, подводимого к КРТ в теплообменнике, и средние значения коэффициентов теплопередачи через стенку теплообменника и теплоотдачи от антифриза на его наружной поверхности (рис. 6), которые затем использовали для анализа и обобщения полученных экспериментальных данных.





**Рис. 6.** Характеристики теплообмена в витом теплообменнике между топливом и антифризом в процессе нагрева:

*a* — повышение температуры топлива в теплообменнике; *б* — массовый расход КРТ; *в* — тепловой поток, подводимый к КРТ в теплообменнике; *г* — КПД процесса  $\eta$  нагрева топлива в теплообменнике; *д* — коэффициент теплопередачи через стенку теплообменника; *е* — коэффициент теплоотдачи от антифриза к наружной поверхности теплообменника

Изменения КПД процесса  $\eta$  нагрева топлива в теплообменнике, находящемся в среде антифриза, обусловлены теплообменом резервуара, в котором находятся теплообменник и антифриз, с окружающей средой и теплоемкостью конструкции данного резервуара и вспомогательного контура циркуляции антифриза. Среднее значение КПД процесса нагрева топлива в теплообменнике, находящемся в среде антифриза, в диапазоне температур наружного воздуха 20...23 °С по результатам экспериментов  $\eta = 0,67$ , что необходимо учитывать при определении мощности нагревателей СТП КРТ для выполнения требований по времени протекания операции температурной подготовки топлива на стартовых и технических комплексах космодромов.

**Заключение.** Проведенные экспериментальные исследования позволили подтвердить правомерность математических моделей процессов температурной подготовки топлива в теплообменнике, расположенном в среде антифриза, при охлаждении антифриза жидким азотом и его нагреве с использованием трубчатых электрических нагревателей. По результатам сравнения значений температуры, полученных экспериментально и расчетным путем, максимальные значения относительных погрешностей составили 3,2 и 4,1 % соответственно для топлива ТС-1 и антифриза А-65 при охлаждении и 3,7 и 4,5 % — при нагреве.

По результатам экспериментов определены характеристики теплообмена витого теплообменника между топливом и антифризом в процессе охлаждения антифриза жидким азотом и его нагреве с использованием трубчатых электрических нагревателей. При обобщении характеристик теплообмена получены данные, необходимые для проведения оптимизационных расчетов теплопередачи в конструкции витого теплообменника и расчетов процессов температурной подготовки КРТ с применением предложенной новой технологии, основанной на процессах теплообмена топлива в витом теплообменнике, размещенном в среде антифриза, с использованием для охлаждения антифриза жидкого азота, а для его нагрева — трубчатых электрических нагревателей.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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.
- [2] 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.

- [3] Денисов О.Е., Золин А.В., Денисова К.И. Методика проектирования базы хранения и подготовки высококипящих компонентов ракетного топлива космодрома «Восточный». *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 11. DOI: 10.7463/1114.0732218
- [4] 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.
- [5] Кобызев С.В. Методика расчета коэффициентов массоотдачи при осушке углеводородного ракетного топлива. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2011, № 11.  
URL: <http://technomag.neicon.ru/doc/245147.html> (дата обращения 20.12.2016).
- [6] Кобызев С.В. Моделирование массообменных процессов при обезвоживании углеводородного ракетного горючего барботированием азотом. *Матер. XXXVI академических чтений по космонавтике «Актуальные проблемы Российской космонавтики»*. Москва, Комиссия РАН, 2012, с. 356–357.
- [7] 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.
- [8] Домашенко О.Е. Системы термостатирования. В кн. *История развития отечественной наземной ракетно-космической инфраструктуры*. Москва, ООО «Издательский дом «Столичная энциклопедия», 2017, с. 299–301.
- [9] Комлев Д.Е., Соловьев В.И. *Охлаждение нафтила методом криогенного барботажа*. Сб. *Новости техники*. Москва, КБТМ, 2004, с. 137–141.
- [10] Домашенко А.М., Блинова И.Д. Исследования тепломассообмена при сбросе криогенных продуктов в воду. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2007, № 12, с. 17–19.
- [11] 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.
- [12] 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, issue 3, pp. 279–284.
- [13] 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.
- [14] 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, № 1 (49), с. 2. DOI: 10.18698/2308-6033-2016-1-1461
- [15] 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.

Статья поступила в редакцию 06.12.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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>

**Александров Анатолий Александрович** — д-р техн. наук, ректор МГТУ им. Н.Э. Баумана, профессор кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области обеспечения безопасности, организации хранения и транспортировки углеводородного топлива.

**Бармин Игорь Владимирович** — д-р техн. наук, член-корр. РАН, профессор, зав. кафедрой «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, советник по науке генерального директора ФГУП «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры». Автор более 300 научных работ в области ракетно-космической техники.

**Павлов Семен Константинович** — аспирант кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Чугунков Владимир Васильевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 140 научных работ в области наземного оборудования ракетно-космической техники.

## **The results of the experimental research of the processes of the hydrocarbon propellant temperature preparation using a heat exchanger placed in antifreeze**

© A.A. Aleksandrov<sup>1</sup>, I.V. Barmin<sup>1,2</sup>, S.K. Pavlov<sup>1</sup>, V.V. Chugunkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

<sup>2</sup>Federal State Unitary Enterprise Center for Operation of Space Ground Based Infrastructure, Moscow, 107996, Russia

*The article describes the experimental stand and the results of an experimental research of the hydrocarbon propellant temperature preparation in a heat exchanger placed in an antifreeze medium. The mode of propellant cooling is provided by cooling the antifreeze by liquid nitrogen sparging, and the mode of propellant heating with a tubular electric heater placed in a tank with antifreeze. The operation of hydrocarbon propellant temperature preparation is used in space rocket complexes to provide the necessary properties of the propellant and improve the efficiency of propulsion systems for space rockets. The experiments implemented an efficient technology for cooling hydrocarbon propellant by improving heat transfer on the outer surface of the heat exchanger due to the interaction of liquid nitrogen with antifreeze. The experimental research resulted in obtaining quantitative data on the processes of propellant cooling and heating in a heat exchanger located in an antifreeze medium in the temperature range of 243...293 K. Experimental data were obtained about the characteristics of heat transfer required for calculating the heat transfer between the propellant and the antifreeze and determining the parameters of the processes of the propellant temperature preparation.*

**Keywords:** liquid hydrocarbon propellant, temperature preparation, cooling and heating, tank with antifreeze, heat exchanger in antifreeze, liquid nitrogen, experimental research

### REFERENCES

- [1] Aleksandrov A.A., Barmin I.V., Kunis I.D., Chugunkov V.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2016, no. 2, pp. 7–27.
- [2] Aleksandrov A.A., Denisov O.E., Zolin A.V., Chugunkov V.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2013, no. 4, pp. 24–29.
- [3] Denisov O.E., Zolin A.V., Denisova K.I. *Nauka i obrazovanie: elektronnyy nauchno-tekhnicheskiy zhurnal — Science and Education: Electronic Scientific and technical Journal*, 2014, no. 11. DOI: 10.7463/1114.0732218
- [4] Aleksandrov A.A., Goncharov R.A., Igritsky V.A., Chugunkov V.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2011, no. 1, pp. 40–46.
- [5] Kobzyev S.V. *Nauka i obrazovanie: elektronnyy nauchno-tekhnicheskiy zhurnal — Science and Education: Electronic Scientific and technical Journal*, 2011, no. 11. Available at: <http://technomag.neicon.ru/doc/245147.html> (accessed December 20, 2016).
- [6] Kobzyev S.V. Modelirovaniye massoobmennykh protsessov pri obezvozhivanii uglevodородnogo raketnogo goruchego barbotirovaniem azotom [Simulation of mass transfer processes during the dehydration of hydrocarbon rocket propellant

- by nitrogen sparging]. *Aktualnye problemy Rossiyskoy kosmonavtiki. Materialy XXXVI akademicheskikh chteniy po kosmonavtike* [Proceedings of the XXXVI academic readings on cosmonautics. Actual problems of the Russian cosmonautics]. Moscow, Komissiya RAS Publ., 2012, pp. 356–357.
- [7] Kobyzhev S.V. Metodika poverchnogo rascheta protsessa osushki uglevodorodnogo goruchego metodom barbotazha gazoobraznym azotom [Methods of checking calculation of the hydrocarbon propellant drying process by gaseous nitrogen sparging]. *Aktualnye problemy Rossiyskoy kosmonavtiki. Materialy XXXVI akademicheskikh chteniy po kosmonavtike* [Proceedings of the XXXVI academic readings on cosmonautics. Actual problems of the Russian cosmonautics]. Moscow, Komissiya RAS Publ., 2013, pp. 385–386.
- [8] Domashenko O.E. Sistemy termostirovaniya [Temperature control systems]. In: *Istoriya razvitiya otechestvennoy nazemnoy raketno-kosmicheskoy infrastruktury* [The history of the domestic ground-based space rocket infrastructure development]. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 2017, pp. 299–301.
- [9] Komlev D.E., Solovyev V.I. Okhlazhdenie naftila metodom kriogenogo barbotazha [Naphthyl cooling by cryogenic sparging]. In: *Novosti tekhniki. Sbornik* [Technology News. Collection]. Moscow, Konstruktorskoe buro transportnogo mashinostroeniya Publ., 2004, pp. 137–141.
- [10] Domashenko A.M., Blinova I.D. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie — Chemical and Petroleum Engineering*, 2007, no. 12, pp. 17–19.
- [11] Nakoryakov V.E., Tsoy 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.
- [12] Nakoryakov V.E., Tsoy A.N., Mezentssev I.V., Meleshkin A.V. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, vol. 21, no. 3, pp. 279–284.
- [13] Nakoryakov V.E., Tsoy A.N., Mezentssev I.V., Meleshkin A.V. *Teplofizika i aeromekhanika — Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, no. 3, pp. 293–298.
- [14] Pavlov S.K., Chugunkov V.V. *Inzhenernyy zhurnal: Nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, no. 1 (49), p. 2.  
DOI: 10.18698/2308-6033-2016-1-1461
- [15] Aleksandrov A.A., Barmin I.V., Pavlov S.K., Chugunkov V.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2017, no. 4, pp. 86–95.

**Aleksandrov A.A.**, Dr. Sc. (Eng.), Rector, Professor, Department of Rocket Launch Complexes, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 100 research publications in the field of safety, storage and transportation of hydrocarbon propellants.

**Barmin I.V.**, Dr. Sc. (Eng.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Head of the Department of Rocket Launch Complexes, Bauman Moscow State Technical University, Advisor for Science to the General Director of the Federal State Unitary Enterprise Center for Operation of Space Ground Based Infrastructure. Author of over 300 research publications in the field of rocket and space technology.

**Pavlov S.K.**, post-graduate Student, Department of Rocket Launch Complexes, Bauman Moscow State Technical University.

**Chugunkov V.V.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Rocket Launch Complexes, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 140 research publications in the field of ground-based equipment for rocket and space technology.  
e-mail: kafsm8@bmstu.ru