



АЛЕКСАНДРОВ
Анатолий Александрович
ректор МГТУ им. Н.Э. Баумана
ALEXANDROV
Anatoly Alexandrovich
Rector MSTU named after N.E. Bauman
Moscow, Russian Federation



ДЕНИСОВ
Олег Евгеньевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)
DENISOV
Oleg Evgenievich
(Moscow, Russian Federation,
MSTU named after N.E. Bauman)



ЗОЛИН
Анатолий Владимирович
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)
ZOLIN
Anatoly Vladimirovich
(Moscow, Russian Federation,
MSTU named after N.E. Bauman)



ЧУГУНКОВ
Владимир Васильевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)
CHUGUNKOV
Vladimir Vasilyevich
(Moscow, Russian Federation,
MSTU named after N.E. Bauman)

Охлаждение ракетного топлива стартовым оборудованием с применением жидкого азота

**А.А. Александров, О.Е. Денисов,
А.В. Золин, В.В. Чугунков**

Углеводородное ракетное горючее — экологически чистый компонент топлива, нашедший широкое применение. Выбор технологии его охлаждения является актуальной проблемой проектирования наземных технологических систем. В статье проанализированы две разные технологии охлаждения горючего с применением жидкого азота, дано сравнение их показателей эффективности, а также рекомендации по их использованию в составе наземных технических комплексов.

Ключевые слова: стартовое оборудование, топливо ракетное, азот жидкий, охлаждение в рекуперативных теплообменниках, теплообмен контактный.

Refrigerating Rocket Fuel by Launching Equipment with the Use of Liquid Nitrogen

A.A. Alexandrov, O.E. Denisov, A.V. Zolin, V.V. Chugunkov

Hydrocarbon rocket fuel is a widely-used «green» propellant component. Choosing its refrigerating technology is the urgent problem of a ground support terrestrial equipment design. The article considers the comparison of two different hydrocarbon rocket fuel refrigerating technologies with the use of liquid nitrogen. Their efficiency indexes are compared. Recommendations for the use within ground support terrestrial equipment facilities are given.

Keywords: launching equipment, rocket fuel, liquid nitrogen, refrigerating with recuperative heat exchangers, contact heat exchange.

Обеспечение высоких тяговых характеристик двигательных установок космических ракет-носителей (РН), функционирующих на компонентах ракетного топлива жидкий кислород — углеводородное горючее (УВГ), требует охлаждения УВГ перед заправкой в топливные баки ракет до температур $-30...-40$ °С, которое может осуществляться за счет теплообмена с жидким азотом [1—4].

Системы охлаждения с применением кипящего жидкого азота находят все более широкое применение в ракетно-космической технике. Подобные системы показали свою работоспособность в процессе эксплуатации в составе ракетно-космических комплексов «Морской старт» и «Союз-СТ» в Гвианском космическом центре [1, 5]. К достоинствам данного типа систем можно отнести высокие скорости и эффективность охлаждения топлива, доступность жидкого азота как

криогенного источника холода. Это обусловлено тем, что жидкий азот является вторичным продуктом при производстве жидкого кислорода на кислородно-азотных заводах космодромов [6, 7].

Процесс теплообмена ракетного горючего с жидким азотом может быть организован как с помощью теплообменных аппаратов, так и посредством прямой подачи азота через барботер в емкость с топливом [1, 8]. В статье проведено сравнение данных способов по удельным затратам жидкого азота на выполнение операций охлаждения топлива и даны рекомендации по их применению на комплексах хранения и подготовки горючего и стартовых комплексах космодромов.

Процесс охлаждения горючего в системах с применением внешних по отношению к емкости-хранилищу теплообменных аппаратов осуществляется путем его перекачки насосной установкой по замкнутому контуру емкость — насосная установка — теплообменный аппарат — емкость.

Подачу жидкого азота в теплообменники можно осуществлять выдавливанием из стационарных или транспортных резервуаров (рис. 1).

Потоки горючего и жидкого азота по секциям теплообменных аппаратов распределяются с помощью блока арматуры. Причем с целью повышения времени взаимодействия горючего с жидким криогенным продуктом может быть организовано последовательное прохождение теплообменных аппаратов охлаждаемым компонентом, в то время как жидкий азот подается параллельно в каждую секцию. После испарения и отвода от горючего необходимого количества теплоты газообразный азот может быть дренирован в атмосферу или направлен на выполнение дополнительных технологических операций подготовки РН на стартовом комплексе.

Для описания работы системы охлаждения построена математическая модель, учитывающая особенности технологического процесса охлаждения ракетного горючего в циркуляционном контуре системы. В ее основе лежат уравнения квази-

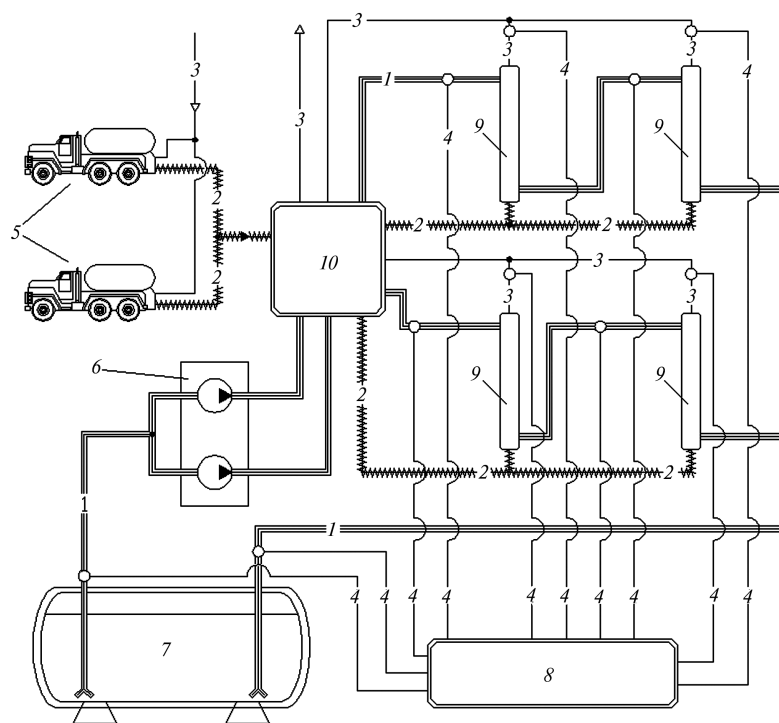


Рис. 1. Схема системы охлаждения углеводородного горючего жидким азотом с применением внешних по отношению к емкости-хранилищу теплообменных аппаратов:

- 1 — трубопроводы горючего; 2 — трубопроводы подачи жидкого азота; 3 — трубопроводы газообразного азота;
- 4 — электрические связи системы измерения температур; 5 — резервуары жидкого азота; 6 — насосная установка;
- 7 — емкость подготовки горючего; 8 — шит контроля температуры; 9 — секции теплообменных аппаратов типа «труба в трубе»; 10 — блок распределительной арматуры

стационарной теплопередачи, составленные для всех основных элементов системы.

Уравнение теплового баланса для системы охлаждения может быть представлено в следующем виде:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 - Q_5 + Q_6 = \left(m_r c_r + m_e c_e + \sum_i m_i c_i \right) \frac{dT_r}{d\tau}, \quad (1)$$

где Q_1 — тепловой поток, подводимый к горючему через стенки емкости из окружающей среды; Q_2 — тепловой поток, подводимый к горючему через опоры емкости; Q_3 — тепловой поток, подводимый к горючему через стенки трубопроводов из окружающей среды; Q_4 — тепловой поток, подводимый к горючему из окружающей среды через внешние стенки теплообменников; Q_5 — тепловой поток, отводимый от горючего в теплообменниках; Q_6 — тепловой поток, подводимый к горючему от насосов; m_r, c_r — масса и удельная теплоемкость горючего; m_e, c_e — масса и удельная теплоемкость емкости; m_i, c_i — массы и удельные теплоемкости составляющих контуров охлаждения системы: трубопроводов, теплообменников, клапанов, фильтров и насосов; T_r — температура горючего в емкости подготовки; τ — время.

Теплообмен элементов конструкций системы охлаждения и емкости с окружающей средой, определяющий тепловые потоки $Q_1 - Q_4$, происходит в общем случае в результате совместного действия конвективного теплообмена с наружным воздухом, теплообмена излучением с окружающими объектами, теплообмена при конденсации на охлажденных поверхностях конструкций паров воды, содержащихся в окружающем воздухе и солнечной радиации [9]. Обобщенная зависимость для тепловых потоков $Q_1 - Q_4$, учитывающая перечисленные особенности передачи теплоты при сложном теплообмене на поверхностях конструкций емкости подготовки и системы охлаждения горючего, может быть представлена в виде

$$Q_j = k_j F_j (T_{н.у.ж} - T_r),$$

где k_j, F_j — коэффициенты теплопередачи и площади поверхностей стенок емкости, ее опорных конструкций, трубопроводов контуров системы охлаждения и секций теплообменников; $T_{н.у.ж}$ — условная наружная температура,

$$T_{н.у.ж} = T_n + \frac{A_j q_{с.ж}}{\alpha_{\Sigma н.ж}};$$

T_n — температура наружного воздуха; A_j — коэффициент поглощения солнечной радиации; $q_{с.ж}$ — средняя по поверхности плотность потока солнечной радиации; $\alpha_{\Sigma н.ж}$ — суммарный коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности конструкции.

Тепловой поток, отводимый азотом от горючего в теплообменниках, и тепловой поток, подводимый к горючему от насосов, определяются по следующим формулам:

$$Q_5 = n G_{а.с} [r_{к.а} + c_a (T_{в.а} - T_{к.а})]; \quad Q_6 = n \frac{G_{г.с} \Delta P_n}{\eta_n \rho_r},$$

где n — число секций теплообменников, используемых для охлаждения горючего; $G_{а.с}, G_{г.с}$ — массовые расходы азота и горючего через секцию теплообменника; $r_{к.а}, c_a$ — теплота парообразования и теплоемкость газообразного азота; $T_{к.а}, T_{в.а}$ — температура кипения азота и его паров на выходе из секции теплообменника; ΔP_n — потери давления в контуре секции охлаждения; η_n — КПД насоса; ρ_r — плотность горючего.

В результате решения уравнения (1) могут быть определены относительные затраты азота и времени на выполнение операции охлаждения горючего от начальной температуры $T_{г.н}$ до требуемой конечной температуры $T_{г.к}$:

$$\frac{m_a}{m_r} = - \frac{n G_{а.с} c_r (1 + A_{mc})}{k_1 F_1 (1 + A_{kf})} \ln \frac{T_{г.к} - T_{г.п}}{T_{г.н} - T_{г.п}};$$

$$\tau = \frac{m_r \bar{m}_a}{n G_{а.с}},$$

где $\bar{m}_a = \frac{m_a}{m_r}$ — относительная масса азота, затрачиваемая на процесс охлаждения;

трачиваемая на процесс охлаждения;

$$T_{г.п} = \{k_1 F_1 (1 + A_{kFT}) T_{н.у.1} - n G_{а.с} [r_{к.а} + c_a (T_{в.а} - T_{к.а})] + [n (G_{г.с} \Delta P_n / \eta_n \rho_r)]\} / [k_1 F_1 (1 + A_{kf})];$$

$$A_{mc} = \frac{m_e c_e + \sum_i m_i c_i}{m_r c_r}; \quad A_{kf} = \frac{\sum_{j=2} k_j F_j}{k_1 F_1};$$

$$A_{kFT} = \frac{\sum_{j=2} k_j F_j T_{н.у.ж}}{k_1 F_1 T_{н.у.1}}.$$

Полученные выражения позволяют анализировать эффективность охлаждения горючего по относительным затратам жидкого азота в зависимости от конструктивных параметров емкости подготовки, ее тепловой изоляции, расхода азота в секциях теплообменников и количества таких секций. Результаты расчетов удельных затрат жидкого азота при охлаждении горючего на 1 К в зависимости от теплового сопротивления изоляции емкости и суммарного расхода азота в секциях теплообменников представлены на рис. 2.

Наименьшие удельные затраты жидкого азота по результатам расчетов составляют 0,009...0,0094 1/К при тепловых сопротивлениях изоляции емкости подготовки 0,5...1 м²·К/Вт и суммарных расходах азота 0,3...0,6 кг/с.

Процесс охлаждения ракетного горючего при контактном теплообмене с жидким азотом при его прямой подаче в топливо через барботер с отверстиями, обеспечивающими образование мелких фракций азота [10], температура которых во время движения в топливе изменяется от температуры кипения азота до текущей температуры горючего, может быть описан следующими уравнениями:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial T_r}{\partial \tau} &= \frac{\alpha_r(T_e, T_r)(T_e - T_r)F_1 - G_a \left(r_{к.а} + \int_{T_{ка}}^{T_r} c_a dT_a \right)}{c_r(T_r)m_r}, \\ \frac{\partial T_e}{\partial \tau} &= \frac{k_{т.и} (T_{н.ул} - T_e)F_1 - \alpha(T_e, T_r)(T_e - T_r)F_1}{c_e m_e}, \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где T_e — температура емкости; $\alpha_r(T_e, T_r)$ — коэффициент теплоотдачи на поверхности емкости со стороны горючего; $k_{т.и}$ — коэффициент теплопередачи тепловой изоляции емкости.

Начальными условиями для данной системы уравнений являются равенство начальных температур емкости и горючего температуре окружающей среды.

Численное интегрирование системы уравнений (2) позволяет анализировать эффективность охлаждения горючего по относительным затратам жидкого азота в зависимости от конструктивных параметров емкости подготовки, ее тепловой изоляции и расхода жидкого азота, подаваемого в емкость. Результаты расчетов удельных затрат жидкого азота при охлаждении

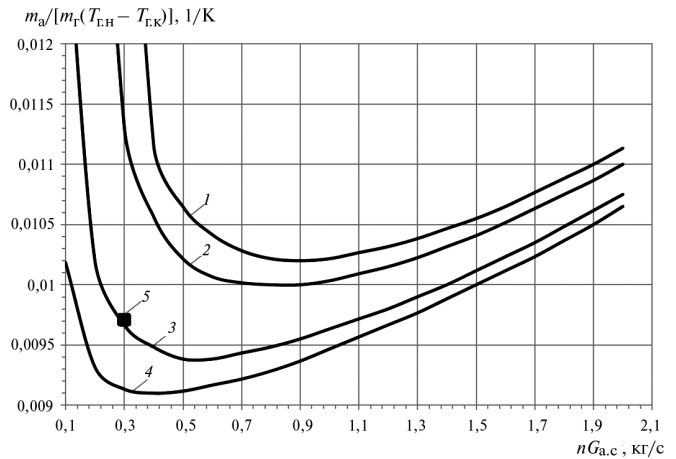


Рис. 2. Влияние теплового сопротивления изоляции емкости и суммарного расхода азота в системе охлаждения на относительные затраты жидкого азота при охлаждении горючего на 1 К в рекуперативном теплообменнике при тепловом сопротивлении (м²·К/Вт) изоляции емкости:
1 — 0,135; 2 — 0,27; 3 — 0,54; 4 — 1,08;
5 — для системы охлаждения УВГ на стартовом комплексе РН «Союз»

горючего на 1 К в зависимости от теплового сопротивления изоляции емкости и расхода жидкого азота показаны на рис. 3.

В таблице приведены удельные затраты жидкого азота на единицу массы горючего при его охлаждении на 1 К в рекуперативных теплообменниках и контактном теплообменом в сравнении с данными натуральных измерений [1].

Удельные затраты жидкого азота на единицу массы охлаждаемого горючего

Вид данных	Удельные затраты жидкого азота на охлаждение УВГ, кг/(кг·°С)
По расчетным данным при охлаждении УВГ жидким азотом в рекуперативном теплообменнике	0,009–0,0094
По расчетным данным при барботаже УВГ жидким азотом	0,0051–0,0061
По данным обработки натуральных измерений при барботаже УВГ жидким азотом	0,00485–0,0052

По результатам сопоставления данных, приведенных в таблице, можно сделать вывод об удовлетворительном совпадении результатов расчета характеристик охлаждения УВГ методом барботажа жидким азотом, полученных

Литература

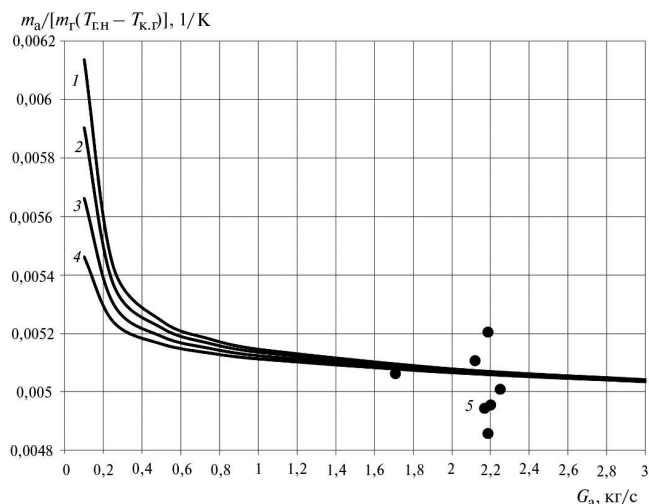


Рис. 3. Относительные затраты жидкого азота при охлаждении горючего на 1 К контактным теплообменом при тепловом сопротивлении ($\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$) изоляции емкости:

1 — 0,135; 2 — 0, 27; 3 — 0,54; 4 — 1,08;
5 — данные натуральных измерений [1]

с использованием разработанного методического аппарата, с данными натуральных измерений [1]. Максимальная погрешность расчетных и экспериментальных значений не превышает 4,3 %.

Эффективность охлаждения УВГ методом барботажа жидким азотом вдвое выше по сравнению с методом охлаждения УВГ жидким азотом в рекуперативном теплообменнике, что позволяет его рекомендовать для использования в структуре комплексов хранения и подготовки горючего космодромов. При этом следует отметить, что использование данного метода потребует применения операции рассыщения УВГ для удаления из него растворенного азота, что естественно отразится на повышении на 1...2% общих затрат азота при данном методе.

Технология охлаждения УВГ жидким азотом в рекуперативном теплообменнике может использоваться на стартовых комплексах для подготовленного топлива по влагогазосодержанию при охлаждении относительно небольших объемов (до 10 т), а также для коррекции температуры топлива, доставляемого на стартовые комплексы с комплекса хранения и подготовки УВГ в обезвоженном и охлажденном состоянии, при его теплообмене с окружающей средой во время транспортировки [11].

1. Комлев Д.Е., Соловьев В.И. Охлаждение нефтила методом криогенного барботажа // Новости техники. 2004. Вып. 2. С. 137—141.

2. Зеленова А.Г., Чугунков В.В. Анализ технологий и режимов охлаждения углеводородного горючего перед заправкой в топливные баки ракет космического назначения // Актуальные проблемы Российской космонавтики. Материалы XXXV академических чтений по космонавтике / «Комиссия РАН». М., 2011. С. 378—379.

3. 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.

4. Гончаров Р.А., Чугунков В.В. Вопросы организации охлаждения углеводородного ракетного горючего в теплообменных аппаратах с применением жидкого азота // Актуальные проблемы Российской космонавтики. Материалы XXXVI академических чтений по космонавтике / «Комиссия РАН». М., 2012. С. 355—356.

5. Гончаров Р.А., Чугунков В.В. Определение параметров и режимов работы стартового оборудования по охлаждению углеводородного горючего перед заправкой в бортовые баки ракеты-носителя // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. Спец. вып. Работы студентов и молодых ученых МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. С. 34—38.

6. Золин А.В., Чугунков В.В. К выбору технического облика и рациональных параметров систем охлаждения и обезвоживания для хранилищ углеводородного горючего космодромов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. Спец. вып. Работы студентов и молодых ученых МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. С. 39—42.

7. 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.

8. Хлыбов В.Ф. Основы устройства и эксплуатации заправочного оборудования. М.: МО РФ, 2003. 248 с.

9. Чугунков В.В. Теплопередача при сложном теплообмене на поверхностях конструкций. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2001. 28 с.

10. Золин А.В., Чугунков В.В. Расчетный анализ тепло-массообменных процессов при барботаже углеводородного горючего кипящим азотом // Актуальные проблемы Российской космонавтики. Материалы XXXVII академических чтений по космонавтике / «Комиссия РАН». М., 2013. С. 386—387.

11. Золин А.В., Чугунков В.В. Моделирование температурного режима ракетного топлива при заправке баков ракеты-носителя // Актуальные проблемы Российской космонавтики. Материалы XXXVI академических чтений по космонавтике / «Комиссия РАН». М., 2012. С. 354—355.

References

1. Komlev D.E., Solov'ev V.I. *Okhlazhdenie neftila metodom kriogennogo barbotazha* [Naphthyl cryogenic cooling by bubbling]. News technology. Issue 2. 2004. Moscow, KBTM. Pp. 137—141.

2. Zelenova A.G., Chugunkov V.V. *Analiz tekhnologii i rezhimov okhlazhdeniia uglevodorodnogo goriuchego pered zapravkoi v toplivnye baki raket kosmicheskogo naznachenii*. Aktual'n problemy Rossiiskoi kosmonavtiki [Analysis of technologies and cooling modes of hydrocarbon fuel before filling the fuel tank space rockets. Actual problems of Russian space

exploration]. *Materialy XXXV akademicheskikh chtenii po kosmonavtike* [Materials XXXV academic readings on space]. «Commission RAS», Moscow, 2011, pp. 378—379.

3. Aleksandrov A.A., Goncharov R.A., Igritskii V.A., Chugunkov V.V. Metodika vybora ratsional'nykh rezhimov okhlazhdeniia uglevodorodnogo goriuchego startovym oborudovaniem pered zapravkoi toplivnykh bakov rakety-nositelia [Methodology of Selection of Rational Regimes for Cooling the Hydrocarbon Fuel by Launch Equipment before Filling of Fuel Tanks of Launch Vehicle]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie*. 2011, no. 1, pp. 40—46.

4. Goncharov R.A., Chugunkov V.V. Voprosy organizatsii okhlazhdeniia uglevodorodnogo raketnogo goriuchego v teploobmennyykh apparatakh s primeneniem zhidkogo azota. Aktual' problemy Rossiiskoi kosmonavtiki [The organization of the cooling of hydrocarbon rocket fuel in heat exchangers using liquid nitrogen. Actual problems of Russian space exploration]. *Materialy XXXVI akademicheskikh chtenii po kosmonavtike* [Materials XXXVI academic readings on space]. «Commission RAS». Moscow, 2012, pp. 355—356.

5. Goncharov R.A., Chugunkov V.V. Opredelenie parametrov i rezhimov raboty startovogo oborudovaniia po okhlazhdeniiu uglevodorodnogo goriuchego pered zapravkoi v bortovye baki rakety-nositelia [Determining parameters and modes of startup equipment operation to cool hydrocarbon fuel before fuelling the carrier rocket on-board tanks]. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. Special issue. Of students and young scientists MSTU named after N.E. Bauman*. 2012, pp. 34—38.

6. Zolin A.V., Chugunkov V.V. K vyboru tekhnicheskogo oblika i ratsional'nykh parametrov sistem okhlazhdeniia i obezvozhvaniia dlia khranilishch uglevodorodnogo goriuchego kosmodromov [On the choice of technological character and efficient parameters of cooling and underwatering systems for hydrocarbon fuel storehouses of cosmodromes]. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. Special issue. Of*

students and young scientists MSTU named after N.E. Bauman. 2012, S. 39—42.

7. Zolin A.V., Chugunkov V.V. Metodika analiza teploobmennyykh protsessov komponentov raketnogo topliva pri vypolnenii operatsii zapravki toplivnykh bakov rakety na startovom komplekse [Technique to analyze heatexchange processes of rocket fuel components when performing operation of rocket fuel tanks filling at the starting complex]. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 2012, no. 12, pp. 8—12.

8. Khlybov V.F. *Osnovy ustroistva i ekspluatatsii zapravochnogo oborudovaniia* [Fundamentals of design and operation of fueling equipment]. Moscow, the Ministry of Defense of Russia, 2003. 248 p.

9. Chugunkov V.V. *Teploperedacha pri sloznom teploobmene na poverkhnostiakh konstruksii* [Heat transfer in a complex heat transfer on surfaces of structures]. Moscow, MSTU named after N.E. Bauman publ., 2001. 28 p.

10. Zolin A.V., Chugunkov V.V. Raschetnyi analiz teplomassoobmennyykh protsessov pri barbotazhe uglevodorodnogo goriuchego kipiashchim azotom. Aktual'n problemy Rossiiskoi kosmonavtiki [Computer analysis of heat and mass transfer processes in the hydrocarbon fuel boiling bubbling nitrogen. Actual problems of Russian space exploration]. *Materialy XXXVII akademicheskikh chtenii po kosmonavtike* [Materials XXXVII academic readings on space]. «Commission RAS». Moscow, 2013, pp. 386—387.

11. Zolin A.V., Chugunkov V.V. Modelirovanie temperaturnogo rezhima raketnogo topliva pri zapravke bakov rakety-nositelia. Aktual'n problemy Rossiiskoi kosmonavtiki [Modeling temperature at refueling propellant tanks booster. Actual problems of Russian space exploration] *Materialy XXXVI akademicheskikh chtenii po kosmonavtike* [Materials XXXVI academic readings on space]. «Commission RAS». Moscow, 2012, pp. 354—355.

Статья поступила в редакцию 08.02.2013

Информация об авторах

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

ДЕНИСОВ Олег Евгеньевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Стартовые ракетные комплексы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, e-mail: sm8@sm8.bmstu.ru).

ЗОЛИН Анатолий Владимирович (Москва) — аспирант, младший научный сотрудник НИИ Специального Машиностроения. МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: pochatoli@mail.ru).

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

Information about the authors

ALEXANDROV Anatoly Alexandrovich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Launch Rocket Complexes» Department. Rector MSTU named after N.E. Bauman (105005, BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya 5, Moscow, Russian Federation, e-mail: sm8@sm8.bmstu.ru).

DENISOV Oleg Evgenievich (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Launch Rocket Complexes» Department. MSTU named after N.E. Bauman (105005, BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya 5, Moscow, Russian Federation, e-mail: pochatoli@mail.ru).

ZOLIN Anatoly Vladimirovich (Moscow) — Post-Graduate, Junior Researcher NIISM. MSTU named after N.E. Bauman (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya, 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: pochatoli@mail.ru).

CHUGUNKOV Vladimir Vasilyevich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Deputy Head Department «Launch Rocket Complexes» Department, Head department NIISM. MSTU named after N.E. Bauman (105005, BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya 5, Moscow, Russian Federation, e-mail: sm8@sm8.bmstu.ru).