

УДК 629.7: 629.7.08: 629.7.082: 629.7.085

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ РАКЕТНОГО ТОПЛИВА С ПРИМЕНЕНИЕМ АЗОТА ДЛЯ НАЗЕМНЫХ КОМПЛЕКСОВ КОСМОДРОМОВ

А.А. Александров, А.В. Золин, С.В. Кобызев, В.В. Чугунков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

e-mail: sm8@sm8.bmstu.ru, ksergeyv@hotmail.com, pochtatoli@mail.ru

Рассмотрены характеристики технологических процессов обезвоживания углеводородного ракетного горючего, основанных на применении барботажа топлива и циклической технологии сброс-пересыщение с использованием сухого азота. Выполнено сравнение удельных затрат азота и времени на проведение операций обезвоживания топлива и даны рекомендации по их применению в комплексах хранения и подготовки горючего и в стартовых комплексах космодромов.

Ключевые слова: горючее углеводородное ракетное, обезвоживание, барботаж, сброс-пересыщение, азот газообразный.

COMPARATIVE ANALYSIS OF NITROGEN-USING TECHNOLOGIES FOR PROPELLANT DEHYDRATION AT GROUND-BASED COSMODROME COMPLEXES

A.A. Aleksandrov, A.V. Zolin, S.V. Kobyzev, V.V. Chugunkov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: sm8@sm8.bmstu.ru, ksergeyv@hotmail.com, pochtatoli@mail.ru

Characteristics of technological processes for dehydrating the hydrocarbon propellant are considered, which are based on application of propellant barbotage and cyclic technology of discharge-supersaturation with the use of dry nitrogen. Specific expenditures of nitrogen and time for performing operations of propellant dehydration are compared, and recommendations are given on their application in complexes of the propellant storage and preparation and at launching sites of cosmodromes.

Keywords: hydrocarbon propellant, dehydration, barbotage, discharge-supersaturation, gaseous nitrogen.

Высокие тяговые характеристики и надежность работы двигательных установок ракет-носителей (РН) в значительной мере зависят от качества применяемых компонентов жидкого ракетного топлива.

В отечественных ракетно-космических комплексах применяется углеводородное горючее (УВГ), которое используется для работы двигателей РН “Союз”, “Зенит” и разгонных блоков “ДМ”. Намечено использование углеводородного горючего в составе перспективных ракетно-космических комплексов “Ангара” и “Байтерек” на космодромах “Плесецк” и “Байконур”, а также в ракетно-космических комплексах космодрома “Восточный” [1–3].

Процессы подготовки УВГ, предназначенного для заправки топливных баков ракет, ракетных и разгонных блоков, сводятся к очистке горючего от твердых частиц, обезвоживанию (удалению свободной (эмульсионной) и растворенной воды), удалению растворенных газов (дегазации), а также к охлаждению или нагреву до требуемой температуры перед выполнением заправочных операций на технических или стартовых комплексах космодромов [4, 5]. При этом подготовка УВГ происходит при последовательном проведении следующих операций: очистка при приеме; обезвоживание; дегазация; температурная подготовка; очистка перед выдачей потребителю.

Учитывая большой объем работ, проводимых по подготовке РН к старту, ограниченные временные интервалы на их выполнение на технических и стартовых комплексах космодромов, высокую плотность размещения наземного технологического оборудования на стартовых комплексах, проведение части операций по подготовке УВГ целесообразно выполнять заранее, в том числе при приеме и хранении топлива на комплексах хранения компонентов топлива космодромов [3].

При доставке больших партий горючего с нефтеперерабатывающих заводов на комплекс хранения космодрома применяются, как правило, негерметичные железнодорожные цистерны для светлых нефтепродуктов с нижним расположением сливных устройств. Поэтому такие параметры горючего, сливаемого из цистерн, как загрязненность и содержание влаги, могут иметь существенное значение. Это, в свою очередь, требует размещения на комплексе хранения УВГ космодрома оборудования, позволяющего проводить подготовку топлива до достижения требуемых параметров по чистоте и влагосодержанию, что позволяет исключить наличие подобного оборудования на каждом стартовом комплексе космодрома либо уменьшить его мощность и стоимость.

Существующие технологии и оборудование для фильтрации топлива позволяют выполнять операцию очистки УВГ при приеме из транспортных цистерн с требуемой тонкостью фильтрации (5...20 мкм), с дегазацией свободного газа, учетом количества принятого топлива, контролем его качества при приеме, а также отделением от топлива свободной воды до содержания не выше 0,0015 % по массе.

Для ракетного УВГ содержание растворенной воды должно составлять не более 0,0001...0,0004 % по массе [6, 7], что обусловлено необходимостью охлаждения горючего перед заправкой в топливные баки ракет до температур $-30 \dots -40$ °С без образования кристаллов льда [8–11], способных засорять бортовые топливные фильтры и фильтры заправочных систем.

Методами дополнительного обезвоживания топлива [12], которые могут использоваться в комплексе хранения и подготовки УВГ космодрома, являются барботаж горючего сухим азотом и циклический метод сброс-пересыщение, также основанный на применении сухого азота.

Проведем сравнение данных методов по затратам азота и времени на выполнение операции обезвоживания УВГ.

Для определения характеристик обезвоживания методом барботажа топлива сухим азотом используется следующая модель массопереноса [13].

При движении в массе топлива азота в виде системы пузырей, образуемых на выходе из барботажного аппарата, диффузионный поток воды через границу раздела фаз будет лимитироваться массоотдачей в жидкой фазе (разность в коэффициентах массоотдачи внутри и снаружи пузыря составляет четыре порядка [7]).

Плотность диффузионного потока массы воды к поверхности пузыря определяется следующими зависимостями:

$$J_{\text{H}_2\text{O}} = \rho_{\text{к}}\beta(C_{\infty} - C_{\text{ст}}) = \frac{\rho_{\text{к}} \text{Sh}D_{\text{м}}}{d}(C_{\infty} - C_{\text{ст}}),$$

где $\rho_{\text{к}}$ — плотность УВГ (керосина); β — коэффициент массоотдачи; Sh — безразмерный коэффициент массоотдачи (число Шервуда), $D_{\text{м}}$ — коэффициент молекулярной диффузии воды в керосине; d — диаметр пузыря азота; C_{∞} — концентрация воды на удалении от пузыря; $C_{\text{ст}}$ — концентрация воды в керосине у поверхности раздела фаз, определяемая законом Генри

$$C_{\text{ст}} = k_h P_{\text{H}_2\text{O}},$$

k_h — константа Генри; $P_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{п}}\mu_{\text{H}_2\text{O}}}RT$ — парциальное давление паров воды в пузыре азота; $m_{\text{H}_2\text{O}}$ и $\mu_{\text{H}_2\text{O}}$ — масса паров воды в пузыре азота и молекулярная масса воды; $V_{\text{п}}$ — объем пузыря азота; R — универсальная газовая постоянная; T — температура системы.

Полагая процесс изменения концентрации воды в керосине квазистационарным, концентрацию воды в керосине неизменной за время всплытия одного пузыря (характерное время — единицы секунд), поток массы воды через поверхность пузыря можно определить как

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = J_{\text{H}_2\text{O}}\pi d^2 = \pi d\rho_{\text{к}} \text{Sh}D_{\text{м}} \left(C_{\infty} - \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{\nu_{\text{п}}\mu_{\text{H}_2\text{O}}}RTk_h \right).$$

Имеем обыкновенное дифференциальное уравнение для процесса переноса массы воды в пузырь азота, решение которого при начальном условии $m_{\text{H}_2\text{O}}|_{t=0} = 0$ (при образовании пузыря в отверстии барботера пары воды в азоте не содержатся) определяет массу паров воды,

уносимую одним пузырем при текущем значении концентрации воды в керосине

$$m_1 = \frac{A}{B} \left(1 - e^{B \frac{H}{V_{\Pi}}} \right),$$

где $A = \pi d \rho_k \text{Sh} D_M C_{\infty}$; $B = 6 \rho_k \text{Sh} D_M \frac{RT k_h}{d^2 \mu_{\text{H}_2\text{O}}}$; H — высота рабочей зоны барботажного аппарата; V_{Π} — скорость всплытия пузыря.

Общее число пузырей, образующихся в барботере в единицу времени при числе отверстий $N_{\text{отв}}$ в нем, определяется соотношением

$$n_{\Sigma} = \frac{6Q_{\Sigma}}{\pi d^3} = \frac{N_{\text{отв}} V_{\Pi}}{d},$$

где $Q_{\Sigma} = \pi N_{\text{отв}} \frac{d^2 V_{\Pi}}{6}$ — максимальный расход азота в барботере при функционировании в режиме несприкасающихся пузырей.

Для полного объемного расхода азота Q_{Σ} в барботажном аппарате масса воды, отделяемая в секунду в жидкой фазе от керосина, составит

$$\dot{m}_{\Sigma} = -n_{\Sigma} m_1.$$

Это дает дифференциальное уравнение для определения массы воды в жидкой фазе керосина в процессе барботажа азотом. Решение данного уравнения имеет вид

$$\frac{m_{\Sigma}}{\nu_k \rho_k} = C_{\infty} = C_{\infty 0} e^{-Et},$$

где

$$E = N_{\text{отв}} V_{\Pi} \frac{\pi d^2 \mu_{\text{H}_2\text{O}}}{6 RT k_h} \frac{1}{V_k \rho_k} \left(1 - e^{-B \frac{H}{V_{\Pi}}} \right),$$

V_k — объем керосина; C_{∞} , $C_{\infty 0}$ — текущая и начальная относительные концентрации воды в керосине. Откуда для текущей средней массовой концентрации воды в жидкой фазе УВГ в барботажном аппарате получаем

$$C_{\infty} = C_{\infty 0} \exp \left(- \frac{N_{\text{отв}} V_{\Pi} \pi d^2 \mu_{\text{H}_2\text{O}}}{6 RT k_h} \times \right. \\ \left. \times \frac{1}{V_k \rho_k} \left(1 - \exp \left(- \frac{6 \rho_k \text{Sh} D_M RT k_h H}{d^2 \mu_{\text{H}_2\text{O}} V_{\Pi}} \right) \right) \right) \tau.$$

Время и количество азота, необходимые для изменения массовой концентрации растворенной воды в барботажном аппарате со значения C_1 до значения C_2 , могут быть определены следующим образом:

$$\Delta \tau = \frac{6 \nu_k \rho_k RT k_h}{N_{\text{отв}} V_{\Pi} \pi d^2 \mu_{\text{H}_2\text{O}} \left(1 - \exp \left(- \frac{6 \rho_k \text{Sh} D_M RT k_h H}{d^2 \mu_{\text{H}_2\text{O}} V_{\Pi}} \right) \right)} \ln \frac{C_1}{C_2},$$

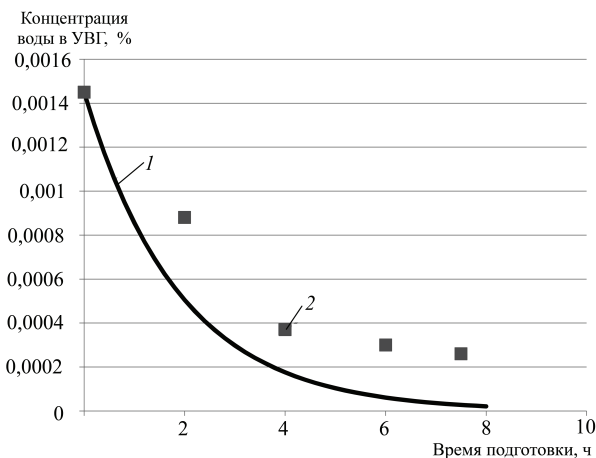


Рис. 1. Зависимость концентрации воды в УВГ от времени процесса обезвоживания УВГ методом барботажа сухим азотом:
 кривая — расчет; точки — эксперимент

$$m_a = \rho_a Q_{\Sigma} \Delta \tau,$$

где ρ_k — плотность азота при давлении в емкости подготовки в процессе функционирования барботера.

На рис. 1 приведены результаты расчета процесса обезвоживания ракетного УВГ методом барботажа сухим газообразным азотом при температуре $T = 288$ К в горизонтальной цилиндрической емкости с объемом подготавливаемой порции горючего $V_k = 10$ м³ при следующих расчетных параметрах: диаметр порождаемых барботажным аппаратом пузырей азота $d = 0,003$ м, скорость всплытия пузырей $V_{\Pi} = 0,22$ м/с, плотность УВГ $\rho_k = 838$ кг/м³, безразмерный коэффициент массоотдачи $Sh = 161$, коэффициент молекулярной диффузии воды в керосине $D_M = 5,8 \cdot 10^{-10}$, константа Генри $k_h = 1,93 \cdot 10^{-8}$ Па⁻¹.

Кривая 1 на рис. 1 представляет процесс подготовки УВГ по результатам проведенного расчета, точки 2 соответствуют экспериментальным данным для указанных параметров процесса подготовки. Различие между расчетным и экспериментальным временем подготовки УВГ следует отнести к уменьшению действительного пути пузырька в жидкости (при движении газожидкостной смеси в реальном барботажном аппарате) и обратному насыщению жидкости парами воды из газовой подушки, расположенной над зеркалом жидкости.

С помощью разработанного методического аппарата проведен анализ процесса обезвоживания УВГ методом барботажа газообразным сухим азотом, результаты которого приведены в табл. 1 и 2.

Проведенный анализ полученных результатов показывает, что с уменьшением размера пузырей азота уменьшается его расход на подготовку и снижается унос УВГ, однако резко возрастает общее время подготовки. Кроме того, получить пузыри диаметром менее 2 мм

Время подготовки УВГ в барботере с общим объемом жидкой фазы 1 м³ и рабочим объемом 1 м³

Температура		Диаметр отверстий в барботере, м			
		0,00004	0,0003	0,0012	0,0029
°С	К	Диаметр пузыря, м			
		0,001	0,002	0,003	0,004
-40	233,15	141,7	13,39	5,57	3,58
-20	253,15	30,15	3,97	2,33	1,51
-10	263,15	15,05	2,37	1,27	1,03
0	273,15	10,39	1,70	0,99	0,78
10	283,15	6,59	1,22	0,76	0,61
20	293,15	5,06	0,94	0,63	0,51
30	303,15	3,61	0,79	0,50	0,43

Таблица 2

Масса газообразного азота за время подготовки в процессе осушки УВГ

Температура		Диаметр отверстий в барботере, м			
		0,00004	0,0003	0,0012	0,0029
°С	К	Диаметр пузыря, м			
		0,001	0,002	0,003	0,004
-40	233,15	9,59	12,62	22,34	36,73
-20	253,15	3,88	5,28	8,55	12,46
-10	263,15	2,92	4,34	7,09	10,28
0	273,15	2,36	3,43	5,41	7,62
10	283,15	1,81	2,68	4,11	5,70
20	293,15	1,53	2,24	3,26	4,44
30	303,15	1,27	1,80	2,68	3,51

практически сложно. Представляется рациональным использовать пузыри диаметром 2...3 мм, что соответствует отверстиям барботера 0,3...1,2 мм при температурах подготовки 0...20 °С.

При проведении обезвоживания УВГ физика процесса способствует, с одной стороны, выходу паров воды с пузырями азота в газовую подушку емкости в слой, непосредственно прилегающий к поверхности раздела фаз в резервуаре подготовки, что формирует пограничный диффузионный слой с высокой концентрацией паров воды. С другой стороны, движение пузырей в аппарате вовлекает в движение жидкую фазу и формирует как восходящие, так и нисходящие конвективные потоки УВГ, что при наличии насыщенного парами воды приповерхностного слоя может способствовать обратному процессу насыщения

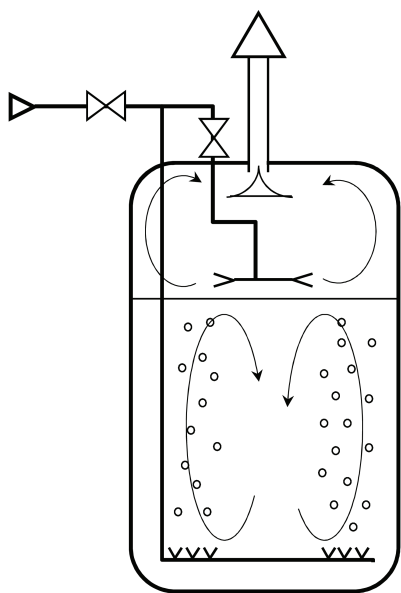


Рис. 2. Схема подачи газообразного сухого азота в емкость с УВГ, обеспечивающая интенсификацию обезвоживания топлива

нени им емкостей хранилищ, при перекачивании в емкости стартовых сооружений необходимо после проведения стыковки магистралей осуществлять подготовку газовой среды собранной системы путем продувки сухим азотом либо методом полоскания [12].

Точка росы газовой среды, подготовленной для приема УВГ, не должна превышать 228 К. Хранить УВГ следует в закрытых емкостях под наддувом газообразного азота, причем необходимо обеспечивать периодическую замену газовой среды в газовых подушках емкостей на сухой азот.

При проведении технологических операций на всех элементах заправочной системы следует полностью исключить контакт УВГ с атмосферным воздухом как до, так и после процесса обезвоживания. Для элементов заправочных систем, размещенных в закрытых помещениях стартовых сооружений, следует предусмотреть контроль относительной влажности воздуха в помещениях и обеспечить поддержание относительной влажности воздуха на уровне не выше 30 %.

Циклическая технология сброс-пересыщение также основана на применении сухого азота при его подаче через барботер до достижения давления в наджидкостном пространстве не менее 0,2...0,3 МПа и последующем сбросе давления с кратковременным барботажем горючего сухим азотом. Число циклов обезвоживания определяется начальной и требуемой конечной концентрациями растворенной воды и

жидкой фазы УВГ парами воды, приводящему к снижению эффективности дегазации УВГ методом барботажа через него газообразного азота.

Для уменьшения этого нежелательного явления при проведении барботажа УВГ сухим газообразным азотом предпочтение следует отдать вертикальному расположению емкости подготовки, при котором площадь зеркала жидкости является наименьшей. Кроме того, азот следует подавать не только в отверстия барботажного аппарата для образования пузырей, но и организовывать процесс непрерывной продувки газовой подушки емкости сухим азотом по схеме, приведенной на рис. 2.

Для предотвращения увеличения концентрации воды в УВГ при заполнении

температурой горючего. При этом затраты азота могут быть определены по следующей зависимости:

$$m_a = \left\{ \left[(V_e - V_r) \rho_0 \frac{T_0}{T_1 p_0} + V_r K_{ha} \right] (p_1 - p_2) + G_a \tau_6 \right\} N_{\text{ц}},$$

где V_e — объем емкости; V_r — объем горючего в емкости; ρ_0 — плотность азота при нормальных условиях (температуре T_0 и давлении p_0); T_1 — температура горючего; K_{ha} — константа Генри по растворимости азота в УВГ; p_1, p_2 — давление азота в емкости при его подаче и сбросе; G_a — массовый расход азота при кратковременном барботаже; τ_6 — время барботажа; $N_{\text{ц}}$ — число циклов обезвоживания УВГ.

Сопоставление средних расчетных и экспериментальных значений удельных характеристик по затратам азота и времени на проведение операций обезвоживания на единицу процентов массового содержания воды и единицу объема топлива для технологии сброс-пересыщение и аналогичных удельных характеристик для технологии барботажа сухим азотом, определенных по значениям, приведенным в табл. 1 и 2 для адекватной температуры топлива (20°C), представлено в табл. 3.

Приведенные результаты свидетельствуют о преимуществе технологии обезвоживания барботажа сухим азотом по сравнению с технологией сброс-пересыщение по удельным затратам азота, но уступает ей по удельным затратам времени.

Обе технологии реализуются практически одним и тем же оборудованием систем газоснабжения, которые входят в состав наземного технологического оборудования стартовых и технических комплексов космодромов.

Таблица 3

Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик операций обезвоживания

Характеристика	Технологии обезвоживания УВГ		
	Сброс-пересыщение	Барботажа сухим азотом при диаметре отверстий барботера, м	
		0,0012	0,0029
Удельные затраты азота, кг/(% по массе·м ³)	20937,8	2964	4036
Удельные затраты времени, ч/(% по массе·м ³)	123	573	464

В связи с отмеченными обстоятельствами технология обезвоживания УВГ методом барботажа топлива сухим азотом может использоваться для выполнения операций на комплексах хранения и подготов-

ки УВГ космодромов и стартовых комплексах при отсутствии жестких ограничений на время подготовки топлива, а технология сброс-пересыщение — для выполнения операций обезвоживания УВГ при наличии временных ограничений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А. А., Гончаров Р. А., Изрицкий В. А., Чугунков В. В. Методика выбора рациональных режимов охлаждения углеводородного горючего стартовым оборудованием перед заправкой топливных баков ракеты-носителя // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. № 1. С. 40–46.
2. 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. Золин А. В., Чугунков В. В. К выбору технического облика и рациональных параметров систем охлаждения и обезвоживания для хранилищ углеводородного горючего космодромов // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. 2012. Спецвыпуск. Работы студентов и молодых ученых МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. С. 39–42.
4. Гончаров Р. А., Чугунков В. В. // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. 2012. Спецвыпуск. Работы студентов и молодых ученых МГТУ им. Н.Э. Баумана. С. 34–38.
5. Золин А. В., Чугунков В. В. Методика анализа теплообменных процессов компонентов ракетного топлива при выполнении операции заправки топливных баков ракеты на стартовом комплексе // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. 2012. № 12. С. 8–12.
6. Кобызев С. В. Моделирование массообменных процессов при обезвоживании углеводородного ракетного горючего барботированием азотом // Актуальные проблемы Российской космонавтики: Материалы XXXVI Академических чтений по космонавтике / Комиссия РАН. М., 2012. С. 356, 357.
7. Кобызев С. В. Методика расчета коэффициентов массоотдачи при осушке углеводородного ракетного топлива // Электронное научно-техническое издание “Наука и образование”. 2011. № 11.
8. Золин А. В., Чугунков В. В. Расчетный анализ тепломассообменных процессов при барботаже углеводородного горючего кипящим азотом // Актуальные проблемы Российской космонавтики: Материалы XXXVII Академических чтений по космонавтике / Комиссия РАН. М., 2013. С. 386, 387.
9. 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.
10. 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.
11. Комлев Д. Е., Соловьев В. И. Охлаждение нафтила методом криогенного барботажа / Новости техники. М.: КБТМ, 2004. С. 137–141.
12. Хлыбов В. Ф. Основы устройства и эксплуатации заправочного оборудования. М.: МО РФ, 2003. 248 с.
13. Кобызев С. В. Методика поверочного расчета процесса осушки углеводородного горючего методом барботажа газообразным азотом // Актуальные проблемы Российской космонавтики: Материалы XXXVII Академических чтений по космонавтике / Комиссия РАН. М., 2013. С. 385, 386.

REFERENCES

1. *Aleksandrov A. A., Goncharov R. A., Igritskiy V. A., Chugunkov V. V.* Choosing efficient techniques for cooling hydrocarbon fuel by launch equipment before filling fuel tanks of rocket boosters. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie*, 2011, no. 1, pp. 40–46 (in Russian).
2. *Zelenova A. G., Chugunkov V. V.* Analysis of techniques and modes for cooling hydrocarbon fuel before filling fuel tanks of space rockets. *Aktual'nye problemy Rossiyskoy kosmonavtiki: Materialy XXXV akademicheskikh chteniy po kosmonavtike. Komissiya RAN [Actual Problems of the Russian Cosmonautics: Materials of XXXV Academic Conference on Cosmonautics. RAS Committee]*. Moscow, 2011, pp. 378, 379 (in Russian).
3. *Zolin A. V., Chugunkov V. V.* Choosing a technical layout and rational parameters of cooling and dehydration systems for hydrocarbon fuel storage facilities at spaceports. *Izvestiya Vuzov. Ser. Mashinostroenie*, 2012, Special issue. Works of students and young scientists of Bauman MSTU, pp. 39–42 (in Russian).
4. *Goncharov R. A., Chugunkov V. V.* Determining the parameters and operating modes of launch equipment to cool hydrocarbon fuel before filling tanks of launch vehicles. *Izvestiya Vuzov. Ser. Mashinostroenie*, 2012, Special issue. Works of students and young scientists of Bauman MSTU, pp. 34–38 (in Russian).
5. *Zolin A. V., Chugunkov V. V.* Method of analysis of heat transfer processes in propellants during filling rocket fuel tanks at launch complexes. *Izvestiya Vuzov. Ser. Mashinostroenie*, 2012, no. 12, pp. 8–12 (in Russian).
6. *Kobyzev S. V.* Modeling of mass transfer processes in hydrocarbon rocket fuel dehydration by bubbling nitrogen. *Aktual'nye problemy Rossiyskoy kosmonavtiki: Materialy XXXVI akademicheskikh chteniy po kosmonavtike. Komissiya RAN [Actual Problems of the Russian Cosmonautics: Materials of XXXVI Academic Conference on Cosmonautics. RAS Committee]*. Moscow, 2012, pp. 356, 357 (in Russian).
7. *Kobyzev S. V.* Method of calculation of mass transfer coefficients during dehydration of hydrocarbon propellant. *Nauka i obrazovanie – Science and Education*, 2011, no. 11 (in Russian). Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/245147.html>.
8. *Zolin A. V., Chugunkov V. V.* Computer analysis of heat and mass transfer processes during bubbling hydrocarbon fuel by boiling nitrogen. *Aktual'nye problemy Rossiyskoy kosmonavtiki: Materialy XXXVII akademicheskikh chteniy po kosmonavtike. Komissiya RAN [Actual Problems of the Russian Cosmonautics: Materials of XXXVII Academic Conference on Cosmonautics. RAS Committee]*. Moscow, 2013, pp. 386, 387 (in Russian).
9. *Zolin A. V., Chugunkov V. V.* Modeling of temperature conditions during filling propellant tanks of launch vehicles. *Aktual'nye problemy Rossiyskoy kosmonavtiki: Materialy XXXVI akademicheskikh chteniy po kosmonavtike. Komissiya RAN [Actual Problems of the Russian Cosmonautics: Materials of XXXVI Academic Conference on Cosmonautics. RAS Committee]*. Moscow, 2012, pp. 354, 355 (in Russian).
10. *Goncharov R. A., Chugunkov V. V.* The organization of cooling of hydrocarbon rocket fuel in heat exchangers using liquid nitrogen. *Aktual'nye problemy Rossiyskoy kosmonavtiki: Materialy XXXVI akademicheskikh chteniy po kosmonavtike. Komissiya RAN [Actual Problems of the Russian Cosmonautics: Materials of XXXVI Academic Conference on Cosmonautics. RAS Committee]*. Moscow, 2012, pp. 355, 356 (in Russian).
11. *Komlev D. E., Solov'ev V. I.* Naphthyl cooling by cryogenic bubbling. *Novosti Tekhniki - Technology news*. Moscow, 2004, KBTM Publ., pp. 137–141 (in Russian).

12. *Khlybov V. F.* Osnovy ustroystva i ekspluatatsii zapravochnogo oborudovaniya [Fundamentals of design and operation of fueling equipment]. Moscow, MD RF Publ., 2003, 248 p.
13. *Kobyzev S. V.* Verification analysis of the dehydration process of hydrocarbon fuels by bubbling nitrogen gas. Aktual'nye problemy Rossiyskoy kosmonavtiki: Materialy XXXVII akademicheskikh chteniy po kosmonavtike. Komissiya RAN [Actual Problems of the Russian Cosmonautics: Materials of XXXVII Academic Conference on Cosmonautics. RAS Committee]. Moscow, 2013, pp. 385, 386 (in Russian).

Статья поступила в редакцию 23.01.2012

Анатолий Александрович Александров — д-р техн. наук, ректор МГТУ им. Н.Э. Баумана, профессор кафедры “Стартовые ракетные комплексы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 80 научных работ в области обеспечения безопасности, организации хранения и транспортирования углеводородного топлива. Московский государственный технический университет, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

A.A. Aleksandrov — Dr. Sci. (Eng.), rector of the Bauman Moscow State Technical University, professor of “Launch Rocket Complexes” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 80 publications in the field of ensuring of safety, storage organization and transportation of hydrocarbon propellant. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, stroenie 1, Moscow, 105005 Russia.

Анатолий Владимирович Золин — аспирант кафедры “Стартовые ракетные комплексы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор семи научных работ в области математического моделирования механических и тепломассообменных процессов. Московский государственный технический университет, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

A.V. Zolin — post-graduate of “Launch Rocket Complexes” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of seven publications in the field of mathematical simulation of mechanical and heat-mass-transfer processes. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, stroenie 1, Moscow, 105005 Russia.

Сергей Владимирович Кобызев — старший преподаватель кафедры “Стартовые ракетные комплексы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 34 научных работ в области гидромеханики и тепломассообмена в агрегатах и системах стартовых комплексов. Московский государственный технический университет, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

S.V. Kobyzev — assoc. professor of “Launch Rocket Complexes” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 34 publications in the field of hydromechanics and heat-mass-transfer in aggregates and systems of launch complexes. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, stroenie 1, Moscow, 105005 Russia.

Владимир Васильевич Чугунков — д-р техн. наук, профессор кафедры “Стартовые ракетные комплексы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 123 научных работ в области тепломассообмена в агрегатах и системах стартовых комплексов. Московский государственный технический университет, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

V.V. Chugunkov — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Launch Rocket Complexes” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 123 publications in the field of heat-mass-transfer in aggregates and systems of launch complexes. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, stroenie 1, Moscow, 105005 Russia.