

Построение рациональной схемы подготовки углеводородного горючего по температуре и влагосодержанию с использованием жидкого и газообразного азота на стартовом и техническом комплексах космодрома.

10, октябрь 2012

DOI: 10.7463/1012.0486647

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

УДК. 662.75

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

ksergeyv@hotmail.com

pochtatoli@mail.ru

chv.home@mail.ru

В отечественных ракетно-космических комплексах находит широкое применение углеводородное ракетное горючее (УВГ), которое используется для работы двигателей ракет-носителей «Союз», «Союз-2», «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 перспективных ракетно-космических комплексах космодрома «Восточный».

Существующие сегодня процессы производства и транспортировки УВГ обеспечивают их поставку потребителю в состоянии насыщения по растворенной воде и с некоторым содержанием взвешенных капель свободной, нерастворенной воды. Связано данное обстоятельство с тем, что в настоящее время по принятым техническим условиям обезвоживание углеводородного горючего при его производстве не осуществляется, содержание растворенной и свободной воды в горючем не регламентируется, а также с условиями транспортировки горючего в обычных, а не специализированных герметичных цистернах. Таким образом, задача обезвоживания углеводородного горючего должна решаться технологиями его подготовки исключительно средствами наземной инфраструктуры космодромов. В качестве исходных параметров влагосодержания поставляемого на стартовый комплекс углеводородного горючего по содержащейся в нем свободной и растворенной воде по данным, приведенным в работах [1], [2], [3], можно принять влагосодержание равным 0,015 % по массе. Имеющиеся в настоящее время образцы систем заправки не способны без доработки обеспечивать подготовку поставляемого в таком состоянии горючего по влагосодержанию.

Для повышения плотности УВГ на стартовом комплексе производится его охлаждение до температур $-28...-30$ °С, при этом растворимость воды в горючем

снижается и становится возможным выпадение кристаллов льда, забивающих фильтры заправочных систем. Для обеспечения прокачиваемости горючего через фильтры общее содержание воды в нем не должно превышать 0,0004 % по массе.

Из-за больших масс заправляемого в баки ракет горючего (десятки и сотни тонн) процессы тепло и массообмена при подготовке компонентов ракетного топлива к применению являются одними из наиболее энергоемких и длительных процессов, требующих определения рациональных технологий и режимов проведения этих процессов средствами стартовых и технических комплексов космодромов.

Достижение требуемых характеристик УВГ по содержанию воды может производиться в несколько технологических этапов. Среди них – использование фильтров-коагуляторов, осаждение, адсорбция, использование гидрофобных фильтров, вымораживание с фильтрацией, продувка кипящим и газообразным азотом.

Для моделирования процесса отделения растворенной воды от УВГ методом барботажа газообразным азотом в работах [5], [6] рассмотрены гидродинамические параметры движения газовых включений в горючем, приведены данные по теплофизическим характеристикам углеводородных горючих, включая коэффициент диффузии воды в горючем, составлена модель процесса массопередачи воды в индивидуальные пузыри азота, приведена модель и методика расчета процесса осушки УВГ в барботажном аппарате заданной конфигурации.

В качестве исходных данных для расчета выступают геометрические параметры барботажного аппарата, температура осушаемого горючего в процессе подготовки, заданные исходная и конечная концентрации растворенной воды в горючем, объем порции горючего, подлежащего осушке, высота рабочей области барботажного аппарата, давление наддува. Для выбранной температуры подготовки определяются теплофизические параметры горючего, диаметр порождаемых барботером пузырей и режим всплытия пузырей. Определяется безразмерный коэффициент массоотдачи. После этого по разработанным зависимостям определяются время процесса осушки, объемный расход азота на проведение операции осушки, масса азота на проведение операции осушки, абсолютный и относительный унос горючего с азотом.

По результатам моделирования составлены рекомендации по рациональному выбору параметров барботажного аппарата и организации процесса осушки с целью минимизации времени процесса подготовки по содержанию растворенной воды, расхода газообразного азота на операцию подготовки и уноса паров УВГ с азотом. Рекомендуется использование вертикальных цилиндрических барботажных аппаратов с возможностью продувки газовой подушки газообразным азотом.

Для предотвращения увеличения концентрации воды в углеводородном горючем при загрузке его в емкости хранилищ, при перекачивании в емкости стартовых сооружений предлагается после проведения стыковки магистралей осуществлять подготовку газовой среды собранной системы путем продувки сухим азотом для магистралей и емкостей, допускающих продувку, организацию сквозной продувки азотом в тех случаях, когда это представляется возможным и замену газовой среды в тупиковых

емкостях методом полоскания. Точка росы газовой среды, подготовленной для приема углеводородного горючего, не должна превышать $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. При хранении углеводородного горючего следует осуществлять хранение в закрытых емкостях под наддувом газообразного азота, причем периодически обеспечивать замену газовой среды в газовых подушках емкостей на сухой азот. При проведении технологических операций на всех элементах заправочной системы следует полностью исключить контакт углеводородного горючего с атмосферным воздухом как до, так и после процесса обезвоживания углеводородного горючего. Для элементов заправочных систем, размещенных в стартовых сооружениях в закрытых помещениях, следует предусмотреть контроль относительной влажности воздуха в помещениях, и обеспечить поддержание относительной влажности воздуха на уровне не выше 30 %. При проведении обезвоживания углеводородного горючего 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, а с другой стороны, движение пузырей в аппарате вовлекает в движение жидкую фазу и формирует как восходящие, так и нисходящие конвективные потоки углеводородного горючего, что, при наличии насыщенного парами воды приповерхностного слоя, может способствовать интенсивному обратному процессу насыщения жидкой фазы углеводородного горючего молекулами воды из приповерхностного слоя газовой подушки с интенсивным конвективным перемешиванием вновь насыщенных водой порций углеводородного горючего с основной массой углеводородного горючего, что способно снизить эффективность процесса дегазации углеводородного горючего методом барботажа через него газообразного азота.

Для предотвращения повторного насыщения подготовленного горючего парами воды, выделившимися в газовую подушку емкости подготовки, рекомендуется при проведении операции барботажа углеводородного горючего сухим газообразным азотом не только подавать азот в трубы барботажного аппарата для образования пузырей, но и организовывать процесс непрерывной продувки газовой подушки емкости сухим азотом.

По результатам численного моделирования рациональным представляется использование для барботирования пузырей диаметром 2 – 3 мм, что соответствует отверстиям барботера 0,3...1,2 мм при температурах подготовки 0...20 $^{\circ}\text{C}$, таким образом, наиболее эффективное использование газообразного азота и наибольшая скорость подготовки углеводородного горючего по влагосодержанию могут быть достигнуты при последовательном проведении процессов обезвоживания и охлаждения, причем совмещение этих операций в одном барботажном аппарате не рекомендуется, так как при низких температурах горючего, достигаемых в блоке подготовки по температуре, интенсивность массообменных процессов значительно уменьшается.

Температурная подготовка УВГ на стартовом комплексе может осуществляться применением встроенных в емкости подготовки либо внешних теплообменников [8], [9] и путем контактного теплообмена [7], а в качестве охлаждающих сред могут рассматриваться жидкий теплоноситель, охлажденный воздух, в том числе атмосферный воздух, кипящий и газообразный азот. В работах [7], [8], [9] указываются такие

преимущества использования для температурной подготовки горючего путем теплообмена с жидким азотом, как малое энергопотребление, малое время выхода на режим по сравнению с системами температурной подготовки с парокompрессионными холодильными машинами и системами с воздушными холодильными машинами, высокая эффективность охлаждения, отсутствие опасности загрязнения компонента, отсутствие в конструкции движущихся частей и относительно низкая цена применяемого криогенного источника холода. Подобные системы показали свою работоспособность в процессе эксплуатации в составе ракетно-космических комплексов «Морской старт» и «Союз-СТ» в Гвианском космическом центре. Для случая использования внешнего теплообменного аппарата в работе [8] приведена математическая модель определения рациональных параметров систем охлаждения УВГ кипящим жидким азотом во внешних теплообменниках типа «труба в трубе» с охлаждающей средой в виде кипящего жидкого азота, движущегося во внутренней трубе при движении горючего в кольцевом зазоре теплообменника. Модель позволяет выбрать режимы охлаждения горючего, исключаяющие его намерзание на теплообменных поверхностях при высоких плотностях теплового потока, температурах начала кристаллизации горючего ниже $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуры кипения азота в теплообменнике в диапазоне температур $-190\dots-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, определить рациональные параметры теплообменного аппарата и режимов течения теплоносителей по условию минимальных затрат жидкого азота на операцию температурной подготовки.

Разработанная математическая модель охлаждения горючего в емкости-хранилище основана на уравнениях квазистационарной теплопередачи, записанных для корпуса и опор емкости-хранилища и контура охлаждения горючего с учетом теплового взаимодействия с окружающей средой и теплового потока, подводимого к горючему насосной станцией, обеспечивающей его циркуляцию через теплообменники системы охлаждения. На основе данной модели создана методика, позволяющая определять и оптимизировать проектные параметры контура охлаждения горючего для достижения требуемого уровня его температуры в емкости-хранилище к началу процесса заправки топливных баков ракеты на стартовом комплексе из условия минимизации затрат азота на охлаждение топлива. Основными расчетными зависимостями проектных расчетов для контура охлаждения горючего являются соотношения для определения изменения относительной температуры горючего в процессе его охлаждения, условия достижения требуемого уровня охлаждения горючего и относительной массы жидкого азота, необходимой для операции охлаждения горючего от начальной температуры, равной температуре окружающей среды, до заданной конечной температуры.

Исключение намерзания горючего на наружной поверхности внутренней трубы теплообменника достигается созданием режима теплоотдачи со стороны горючего, зависящего от скорости движения его в теплообменнике, при котором температура внешней поверхности внутренней трубы не должна превышать значения в $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для повышения теплоотдачи горючего к внутренней трубе на ее наружной поверхности рекомендовано выполнение искусственной шероховатости за счет создания рельефной поверхности или организации кольцевых выступов для разрушения пограничного слоя на теплообменной поверхности внутренней трубы теплообменника со стороны горючего.

Большинство параметров, характеризующих процесс охлаждения горючего, геометрических и массовых характеристик оборудования контура охлаждения прямо или косвенно зависят от расхода жидкого азота, подаваемого в теплообменник. При этом, как показывают расчеты, приведенные в [8], функция массы азота, затрачиваемой на охлаждение единицы массы горючего, в зависимости от массового расхода азота имеет минимум. Наличие экстремума обусловлено повышенными значениями массы азота, потребной для охлаждения горючего до нужной температуры, при малых значениях расхода азота из-за большей длительности процесса охлаждения и увеличения теплопритока из окружающей среды, на компенсацию которого расходуется большее количество жидкого азота, а при больших значениях – из-за увеличения теплоемкости и теплопритока из окружающей среды через элементы конструкций контура охлаждения с большими массово-габаритными характеристиками.

Данный подход к выбору рациональных режимов охлаждения горючего позволяет при проектировании определять технические характеристики оборудования контура охлаждения, при которых в процессе эксплуатации будет потребляться наименьшее количество жидкого азота.

Образующийся в процессе температурной подготовки горючего газообразный азот может быть использован для целей подготовки по влагосодержанию, для барботажа емкости-хранилища и накопительной емкости с целью выравнивания температуры горючего по объему, а также для операции насыщения насыщенного азотом горючего.

Для варианта охлаждения УВГ без использования внешнего по отношению к емкости подготовки теплообменника в работе [7] представлена математическая модель охлаждения горючего в емкости подготовки за счет совместного действия теплообмена с окружающей средой через внешнюю стенку емкости и теплообмена с кипящим жидким азотом в емкости подготовки. В качестве примера успешного применения метода непосредственной подачи жидкого азота в емкости горючего можно привести опыт эксплуатации морской пусковой платформы стартового комплекса Sea Launch. В работе [7] показана целесообразность использования охлаждения горючего путем теплообмена с окружающей средой наряду с использованием жидкого азота в связи с длительными сроками хранения на космодроме крупных партий горючего и погодными условиями для районов расположения отечественных космодромов.

Моделирование процессов охлаждения УВГ в процессе предстартовой подготовки производится с учетом изменения интенсивности теплоотдачи на поверхностях емкости подготовки при снижении температуры и наличия тепловой изоляции, с учетом использования, как холода фазового перехода жидкого азота, так и холода газообразного азота, при параллельном и последовательном использовании холода наружного воздуха и холода жидкого азота. Для проведения операции температурной подготовки по результатам моделирования рекомендуется использование вертикальных цилиндрических барботажных аппаратов со сферическими днищами. Основными требованиями к конструкции такого рода емкостей подготовки являются: наличие барботера для ввода кипящего азота, большая разность уровней зеркала жидкости и отверстий барботера, ориентация в пространстве, исключая зависимость параметров внешнего теплообмена

от направления ветра, большая площадь поверхности внешнего теплообмена, транспортабельность основных узлов емкости по железной дороге, возможно больший объем. Емкости подготовки предлагается размещать вне сооружений под навесами.

Проведенные в работах [5 ... 9], данные по параметрам тепло- и массообменных процессов при подготовке углеводородных горючих по температуре и влагосодержанию позволяют сформулировать основные решения по составу оборудования и технологиям подготовки УВГ и предложить построение рациональной схемы системы подготовки углеводородного горючего на стартовой и технической позиции космодрома в условиях поставки производителем горючего одновременно значительных партий (более 1000 тонн) неподготовленного по влагосодержанию горючего. На Рис. 1 представлен вариант рациональной схемы подготовки горючего с использованием технологий, основанных на применении жидкого и газообразного азота.

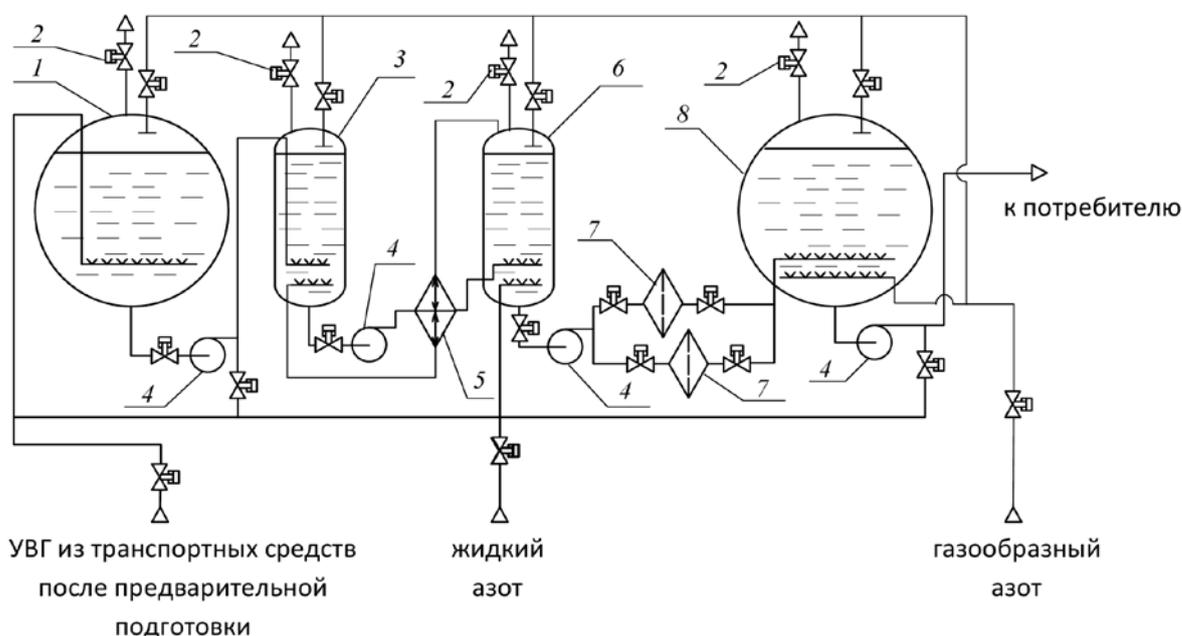


Рис. 1. Вариант рациональной схемы подготовки углеводородного горючего по температуре и влагосодержанию.

- 1 – емкость хранения, 2 – клапан выпуска газообразного азота, 3 – барботажный аппарат подготовки по влагосодержанию, 4 – центробежный насос, 5 – теплообменник газообразного азота, 6 – барботажный аппарат подготовки по температуре, 7 – блок фильтров твердой фазы воды, 8 – емкость накопительная.

Прием горючего из транспортных емкостей в емкости хранения 1 технического комплекса рекомендуется проводить с одновременным выполнением операций очистки от механических примесей на фильтрах грубой очистки и предварительной очисткой УВГ от свободной воды на комбинированных фильтрах. Комбинированный фильтр представляет собой механический фильтр на основе фильтрующих и коагулирующих элементов, задерживающих остаточные механические примеси и укрупняющих (коагулирующих) микрокапли свободной эмульсионной воды в проходящем через них топливе до размеров, пригодных для сепарации в последней ступени предварительной подготовки сепарирующими воду элементами.

Загруженное в емкости хранения 1 технического комплекса УВГ, прошедшее стадию предварительной подготовки, направляется для окончательной подготовки в количестве двух заправочных доз через барботажные аппараты, в которых подготовка по влагосодержанию и температуре производится последовательно. При этом для минимального расходования жидкого азота газообразный азот, образующийся на стадии подготовки по температуре, направляется в барботажный аппарат 3 подготовки по влагосодержанию. Для повышения температуры в аппарате 3 и интенсификации процесса массообмена газообразного азота и углеводородного горючего, а также более полного использования холода газообразного азота, образующегося в барботажном аппарате 6, в системе установлен теплообменник газообразного азота 5. В результате использования теплообменника 5 поступающий в барботажный аппарат 3 газообразный азот имеет температуру, близкую к температуре горючего в емкости 1 и процесс массообмена в аппарате 3 происходит в рекомендуемом в работах [2], [3] температурном диапазоне. В барботажном аппарате 6 производится операция охлаждения подготовленного по влагосодержанию УВГ при непосредственном контакте с жидким азотом. При охлаждении в аппарате 6 возможно образование кристаллов водного льда, для предотвращения попадания которых в накопительную емкость 8 предназначены фильтры 7, работающие попеременно. Накопительная емкость 8 предназначена для хранения подготовленного УВГ в количестве, достаточном для проведения одного цикла запуска (две заправляемые дозы). Кроме того, емкость 8 используется для операции насыщения насыщенного азотом в барботажных аппаратах 3 и 6 горючего. Получение газообразного азота для продувки магистралей и емкостей перед приемом горючего, а также азота для наддува емкостей, азота для продувки газовых подушек емкостей 1 и 8 и барботажных аппаратов 3 и 6, вытеснения жидкого азота из резервуара жидкого азота 12 в барботажный аппарат 6 и операции насыщения подготовленного горючего в емкости 8 предусматривается с использованием газообразного азота, получаемого методом газификации жидкого азота.

При построении системы возможно размещение оборудования как на открытой площадке, под навесами, так и частичное или полное использование существующих технологических залов и помещений блоков арматуры. При размещении оборудования в закрытых помещениях технологические залы и помещения блоков арматуры должны быть оборудованы системой газового контроля содержания кислорода. В составе этой системы должны быть предусмотрены оперативные средства оповещения персонала о понижении концентрации кислорода в помещении ниже 19% об. и выдачи сигнала на автоматическое включение аварийной вентиляции. Технологические залы и помещения блоков арматуры должны быть оборудованы рабочей и аварийной приточно-вытяжной вентиляцией. Аварийная вентиляция должна автоматически включаться по сигналам от системы газового контроля содержания кислорода.

Сброс паров азота из резервуаров и барботажных аппаратов в окружающую среду осуществляется через клапаны 2 по дренажному трубопроводу и далее через дренажные стояки, выведенные за пределы сооружений на безопасную для персонала высоту.

Применение систем подготовки УВГ с использованием жидкого и газообразного азота дает возможность существенно сократить энергопотребление и продолжительность

подготовки горючего, по сравнению с системами подготовки, использующими существующие на стартовом комплексе системы термостатирования на базе пароконденсационных и воздушных холодильных машин, при одновременном упрощении конструкции и технологии работы системы.

Список литературы

1. Clark Alisdair Q., Smith Alastair G., Threadgold S., Taylor Spenser E. Dispersed Water and Particulates in Jet Fuel: Size Analysis under Operational Conditions and Application to Coalescer Disarming // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2011. Vol. 50, no. 9. P. 5749-5765. DOI: 10.1021/ie102533e
2. Aldrich Elizabeth W. Solubility of water in aviation gasolines // *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.* 1931. Vol. 3, no. 4. P. 348-354. DOI: 10.1021/ac50076a003
3. Drying Kerosene – Newton’s. Режим доступа: <http://www.newton-s.com/uses/drying-kerosene> (дата обращения 30.10.11).
4. Гончаров Р.А., Золин А.В., Кобызев С.В., Чугунков В.В. Моделирование теплообменных процессов подготовки углеводородного горючего перед заправкой в топливные баки ракеты на стартовом комплексе // Седьмой Международный Аэрокосмический Конгресс (Москва, 2012): тез. докл. М.: Изд. Хоружевский А.И., 2012. С. 242-243.
5. Кобызев С.В. Методика расчета коэффициентов массоотдачи при осушке углеводородного ракетного топлива // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 11. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/245147.html> (дата обращения 24.09.2012).
6. Кобызев С.В. Моделирование массообменных процессов при осушке углеводородного ракетного горючего барботированием газообразным азотом // Актуальные проблемы российской космонавтики: материалы XXXVI академических чтений по космонавтике / под общ. ред. А.К. Медведевой. М.: Комиссия РАН, 2012. С. 356-357.
7. 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. 2012. Спец. выпуск «Работы студентов и молодых ученых МГТУ им. Н.Э. Баумана». С. 39-42.
8. 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.
9. 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. 2012. Спец. выпуск «Работы студентов и молодых ученых МГТУ им. Н.Э. Баумана». С. 35-38.

Building a rational scheme of preparation of hydrocarbon fuels according to temperature and moisture content with use of liquid and gaseous nitrogen at launch and technical spaceport complexes

10, October 2012

DOI: 10.7463/1012.0486647

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

Russia, Bauman Moscow State Technical University

ksergeyv@hotmail.compochtatoli@mail.ruchv.home@mail.ru

The authors present results of theoretical investigations of heat and mass transfer processes in devices applicable to perform cooling and dehydration of hydrocarbon fuel in the start and technical space center complex. According to the results of the research the authors built a rational scheme of hydrocarbon fuel preparation system with due regard to temperature and moisture content, using storage tanks and storage containers, barbotage machines for preparation of fuel according to moisture content and temperature with use of cold of liquid nitrogen and the cold produced by evaporation of liquid nitrogen of gas nitrogen in the contact heat exchanger. The authors outline advantages of the proposed system over the systems based on the use of vapor-compression refrigeration machines.

Publications with keywords: [drying](#), [bubbling](#), [launch complex](#), [liquid nitrogen](#), [hydrocarbon fue](#)

Publications with words: [drying](#), [bubbling](#), [launch complex](#), [liquid nitrogen](#), [hydrocarbon fue](#)

References

1. Clark Alisdair Q., Smith Alastair G., Threadgold S., Taylor Spenser E. Dispersed Water and Particulates in Jet Fuel: Size Analysis under Operational Conditions and Application to Coaleser Disarming. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2011, vol. 50, no. 9, pp. 5749-5765. DOI: 10.1021/ie102533e
2. Aldrich Elizabeth W. Solubility of water in aviation gasolines. *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.*, 1931, vol. 3, no. 4, pp. 348-354. DOI: 10.1021/ac50076a003
3. *Drying Kerosene – Newton's*. Available at: <http://www.newton-s.com/uses/drying-kerosene> , accessed 30.10.11.

4. Goncharov R.A., Zolin A.V., Kobyzev S.V., Chugunkov V.V. Modelirovanie teplomassoobmennyykh protsessov podgotovki uglevodorodnogo goriuchego pered zapravkoi v toplivnye baki rakety na startovom komplekse [Modeling of heat-mass exchange processes of preparation of hydrocarbon fuel before refueling the fuel tank missiles at the start-up complex]. *Sed'moi Mezhdunarodnyi Aerokosmicheskii Kongress (Moskva, 2012): tez. dokl.* [The 7th international Aerospace Congress (Moscow, 2012): proc.]. Moscow, Khoruzhevskii A.I. Publ., 2012, pp. 242-243.
5. Kobyzev S.V. Metodika rascheta koeffitsientov massootdachi pri osushke uglevodorodnogo raketnogo topliva [Method of calculation of mass transfer coefficients at drainage of hydrocarbon rocket propellant]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2011. № 11. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/245147.html> , accessed 24.09.2012.
6. Kobyzev S.V. Modelirovanie massoobmennyykh protsessov pri osushke uglevodorodnogo raketnogo goriuchego barbotirovaniem gazoobraznym azotom [Modeling mass transfer processes during drying of hydrocarbon rocket fuel by sparging with gaseous nitrogen]. *Aktual'nye problemy rossiiskoi kosmonavtiki: materialy 36-kh akademicheskikh chtenii po kosmonavtike* [Actual problems of Russian cosmonautics: proc. of the 36th academic readings on astronautics]. Moscow, Komissia RAN [Commission of the RAS], 2012, pp. 356-357.
7. Zolin A.V., Chugunkov V.V. K vyboru tekhnicheskogo oblika i ratsional'nykh parametrov sistem okhlazhdeniia i obezvozhivaniia 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]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie* [Bulletin of the Universities. Mechanical Engineering], 2012, spec. iss. «*Raboty studentov i molodykh uchenykh MGTU im. N.E. Baumana*» [“The work of students and young scientists of the Bauman MSTU”], pp. 39-42.
8. 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* [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering], 2011, no. 1, pp. 40-46.
9. 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]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie* [Bulletin of the Universities. Mechanical Engineering], 2012, spec. iss. «*Raboty studentov i molodykh uchenykh MGTU im. N.E. Baumana*» [“The work of students and young scientists of the Bauman MSTU”], pp. 35-38.