

УДК 629.1

М.П. Сало*, Г.М. Иваницкий*, А.Г. Налета*, А.В. Сичевой**

* ГП «КБ «Южное» имени М.К. Янгеля»

** Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ТОПЛИВОПОДГОТОВКИ. ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Систематизированы методы подготовки топлив. Проведен их комплексный анализ. Методы классифицированы по способам контакта фаз «газ-жидкость». Приведены принципы повышения эффективности массообменных процессов.

Для интенсификации процессов предложен метод барботажа через газоструйные стержневые излучатели. Предложены расчетные зависимости основных конструктивных характеристик излучателей, а также диаметра образующихся пузырей. Приведены результаты испытаний ультразвукового излучателя.

Ключевые слова: топливо, концентрация, влагосодержание, насыщение, дегазирование, массообмен, барботажа, газоструйный стержневой излучатель.

Систематизовано методи підготовки палив. Проведено їх комплексний аналіз. Методи класифіковано по способах контакту фаз «газ-рідина». Наведено принципи підвищення ефективності масообміну.

Для інтенсифікації процесів запропоновано метод барботажу через газоструйні стрижневі випромінювачі. Запропоновано розрахункові залежності основних конструктивних характеристик випромінювачів, а також діаметру бульбашок, що утворюються. Приведено результати випробувань ультразвукового випромінювача.

Ключові слова: паливо, концентрація, насичення, вологонасичення, дегазування, масообмін, барботажа, газоструйний стрижневий випромінювач.

The methods of preparation of fuels are systematized. Their complex analysis is conducted. Methods are classified on the methods of contact of phases «gas-liquid». Principles of increase of efficiency of mass transfer processes are resulted.

For intensification of processes the method of bubbling is offered through the jet-edge rod generator. Calculation dependences of basic structural characteristic emitters are offered, and also diameter of appearing bubbles. The results of tests of ultrasonic emitter are resulted.

Keywords: fuel, concentration, moisture content, saturation, degassing, mass transfer, bubbling, jet-edge rod generator.

Высококипящие компоненты жидкого ракетного топлива (КЖРТ) — азотный тетраоксид (АТ), несимметричный диметилгидразин (НДМГ), керосин РГ-1 нашли широкое применение в ракетно-космической технике. Эти топлива являлись основой боевых ракет, а в настоящее время применяются на таких ракетно-космических комплексах как «Циклон», «Протон», «Рокот», «Зенит» и т.п.

Одной из важных задач, решаемых средствами заправки ракет-носителей (РН), является обеспечение требуемых параметров компонентов топлив,

которые достигаются в процессе топливоподготовки. В общем случае, цель топливоподготовки — обеспечение необходимого влаго- и газосодержания топлив.

В условиях производства, транспортирования и хранения ракетные топлива АТ и НДМГ содержат растворенный газ — азот [1, 2, 3], количество которого определяется условиями эксплуатации и может колебаться в пределах от 0,18 до 0,31 кг/м³, а влагосодержание в керосине может достигать 0,015 % по массе топлива [4]. Эти уровни влаго- и газосодержания, как правило, оказываются непригодными для заправки баков РН.

Известно, что растворенный воздух отрицательно влияет на некоторые эксплуатационные свойства углеводородных топлив, прежде всего на их прокачиваемость [5]. Так, при понижении внешнего давления (с увеличением высоты полета летательного аппарата) растворимость воздуха в топливе уменьшается — воздух начинает выделяться, унося с собой пары топлива. В этих условиях по топливной системе будет перекачиваться неоднородная жидкость (смесь жидкости и парогазовых пузырей). Объем парогазовой фазы может достигнуть такой величины, что может нарушить нормальную работу насосов, вплоть до кавитационного срыва [3, 6]. Образование и исчезновение пузырьков в системе подачи топлива приводит также к возникновению колебаний давления, которые влияют на процессы, происходящие в камере сгорания, и устойчивость горения [7].

Например [8], наличие 1% свободных газовых включений в топливе снижает коэффициент быстроходности насоса на 13%, а их увеличение до 3...5% приводит к срыву устойчивости работы насосов, неустойчивости рабочего процесса в двигателе, забросам давления в камере сгорания и другим неисправностям.

Кроме этого, для безопасной и надежной эксплуатации РН большое значение имеет влагосодержание углеводородных топлив и обусловленные изменением температур такие явления, как: переход растворенной воды в свободное состояние; переход капель воды, выделившихся из топлива, в кристаллы льда; образование инея на стенках емкостей и т. п. Так, например, кристаллы льда приводят к забивке фильтров, применяемых в гидросистемах ЛА, что оказывает негативное влияние на перекачку топлив [9, 10, 11].

В силу указанных особенностей, топливоподготовка является обязательным комплексом мероприятий в наземном технологическом оборудовании, которая направлена на достижение требуемых параметров КЖРТ перед заправкой РН.

Применительно к нижним ступеням РН допустимое количество растворенного азота в топливе лимитировано величиной не более 0,22 кг/м³ для АТ и не более 0,12 кг/м³ для НДМГ [12]. Эти требования регламентированы эксплуатационными характеристиками маршевых ЖРД, исходя из их однократного включения. Для ступеней с многократным включением маршевого двигателя эксплуатирующихся в условиях, близких к невесомости, значение остаточной концентрации растворенного азота составляет не более

0,04 кг/м³. Помимо этого предъявляются требования по исходному газонасыщению гелием, концентрация которого колеблется в пределах от 0,0035 до 0,006 кг/м³ [13].

Для обеспечения прокачиваемости через фильтры заправочных и бортовых топливных систем охлажденного (до минусовых температур) керосина требуется снижение содержания свободной и растворенной воды до значений не более 0,0004% по массе топлива [14]

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

В мировой практике для подготовки топлив применяется ряд технологических методов, позволяющих дегазировать (обезвожить), а также насытить КЖРТ газами. На рис. 1 представлены наиболее распространенные методы подготовки топлив по данным [15].

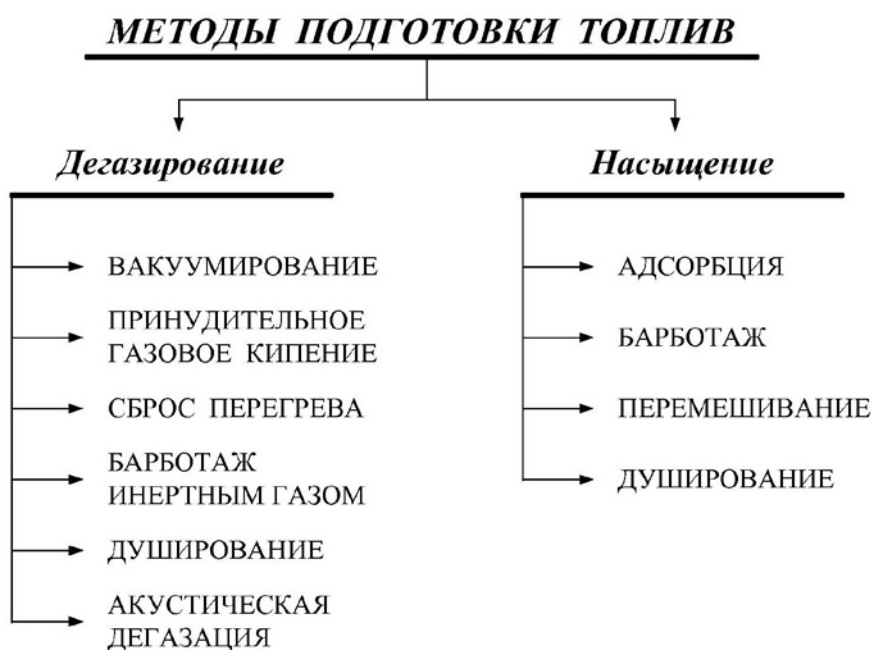


Рисунок 1

Проведенный анализ методов подготовки топлив [13, 15, 16, 17, 18, 19, 20] показал следующее.

МЕТОДЫ НАСЫЩЕНИЯ

- **Адсорбция** заключается в наддуве емкости газом до некоторого избыточного давления вследствие чего возникает движущая сила — диффузия газа в жидкость. Для достижения равновесного состояния требуется значительное количество времени. Например [21], в баке объемом 5,575 м³ состоящем из нижнего и верхнего сферических днищ радиусом 1 м, объединенных цилиндрической проставкой высотой 0,27 м и заполненном АТ на 90% равновесное состояние при растворении гелия достигается за ~300ч, а

азота $\sim 70\%$. При отсутствии перемешивания диффузионные процессы протекают медленно и поэтому на практике этот способ не применяется.

- **Перемешивание** заключается в том, что емкость наддувается до равновесного состояния. Затем происходит интенсивное перемешивание насосом по замкнутому контуру до тех пор, пока не установится постоянное давление. Организация данного вида насыщения предъявляет особые требования к напорной характеристике насоса и конструкции отверстий в напорной трубе. Они должны быть такими, чтобы затопленные струи достигали поверхности жидкости. Тогда захват частиц газа и перенос их во всю массу жидкости будет происходить интенсивно.

- **Барботаж** состоит в пропускании газовых пузырей через слой топлива. Поскольку поверхность газовых пузырей намного больше свободной поверхности жидкости и движение пузырей перемешивает жидкость, то время насыщения намного меньше, чем при адсорбции. Данный вид насыщения весьма эффективен. Для правильной организации процесса, к конструкции барботажных коллекторов и их количеству предъявляются требования по обеспечению перекрытия соседних потоков газа для устранения, так называемой технологической неравновесности, возникающей за счет неполного охвата объема устройства факелом газовых пузырей [22]. В противном случае потребуется нейтрализация большого количества удаляемых паров КЖРТ.

- **Душирование** заключается в распылении топлива через форсунки в газовом объеме емкости. При распылении образуется большая поверхность массообмена и время процесса сокращается. Для достижения требуемого уровня насыщения требуется определенное количество циклов прокачки, зависящих от напорной характеристики насоса и конструкции форсунок.

МЕТОДЫ ДЕГАЗИРОВАНИЯ

Эффективность способа дегазирования характеризуется рядом показателей: скоростью выделения растворенного газа из топлива, т.е. кинетикой процесса; количеством образующихся паров КЖРТ; значением нижнего предела остаточной концентрации растворенного газа; возможностью дегазирования большого количества КЖРТ; сохранением легких фракций в КЖРТ после вакуумной обработки; долей времени дегазирования в циклограмме подготовки к заправке и др.

- **Вакуумирование** заключается в создании с помощью вакуумной установки пониженного давления в газовом объеме емкости. Парциальное давление газа над жидкостью падает, возникает разность концентраций и газ выделяется из топлива. Данный вид дегазирования можно использовать для задач частичного насыщения, однако для глубокого дегазирования он малоэффективен в связи с деактивацией части потенциально активных центров образования газовых пузырьков.

- **Душирование** позволяет интенсифицировать процесс дегазации за счет увеличения поверхности массообмена при распылении топлива через форсунки в сочетании с вакуумированием газового объема емкости. Недостаток —

невысокая степень дегазирования. При однократном прокачивании топлива концентрация растворенного газа уменьшается на $\sim 1/3$ от исходной.

Непрерывное вакуумирование при душировании нежелательно, так как возникают большие потери топлива на испарение. Для этого нужны высокопроизводительные насосы, быстрота откачки которых превышала бы скорость образования пара.

- **Барботаж инертным газом** заключается в продувке топлива гелием, обладающим малой растворимостью в широком классе топлив. Поэтому операцию иногда называют «гелированием». Так как гелий плохо растворим, то суммарный эффект приводит к дегазированию [23]. Недостаток способа — значительный расход гелия и его дороговизна. На «гелирование» 1 м^3 топлива необходимо затратить примерно 2 кг гелия.

Применительно к процессу обезвоживания керосина технология барботажа сухим азотом обладает преимуществом по сравнению с технологией сброс-пересыщение по удельным затратам азота, но уступает по удельным затратам времени.

- **Сброс перегрева** заключается в подогреве топлива с последующим сбросом давления в заранее отвакуумированную буферную емкость. Давление в емкости заполненной топливом быстро падает и происходит его вскипание по всему объему — взрывная декомпрессия. Большая поверхность массообмена обеспечивает глубокую дегазацию жидкости. Образующиеся пары конденсируются в азотной ловушке. Цикл повторяется несколько раз до получения заданной остаточной концентрации растворенного газа. Недостатки способа: необходимость нейтрализации большого количества паров при дегазировании топлив с относительно высокими значениями давления насыщенных паров ($P_s > 10^4$ Па при $t = 20^\circ\text{C}$); низкая эффективность при дегазировании больших количеств КЖРТ.

- **Принудительное газовое кипение** представляет комбинацию продувки топлива гелием с непрерывным вакуумированием газового объема. Расход гелия не должен превышать расхода вакуумной установки. Для исключения парового кипения, сопровождающегося повышенным уносом КЖРТ, в свободном объеме поддерживается некоторое парциальное давление газа сверх давления насыщенных паров $P_{\text{вак.}} = P_s + (\sim 0,1) \text{ ата}$. По сравнению со сбросом перегрева время дегазирования сокращается примерно в 10 раз. Применимость данного метода лимитирована малыми размерами емкостей топливоподготовки от $0,5$ до 5 м^3 и повышенным уносом паров.

- **Акустическая дегазация** представляет собой генерацию в топливе звуковых колебаний достаточно высокой частоты и интенсивности, приводящих к акустической кавитации с образованием пульсирующих парогазовых пузырьков. Разновидность данного вида дегазации мало пригодна для процесса топливоподготовки, обеспечивающего малое остаточное газосодержание, что связано с односторонней диффузией газа в газовые пузырьки. Кроме того, с увеличением глубины дегазирования эффективность данного способа существенно понижается.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что каждый из методов дегазирования и насыщения обладает как рядом достоинств, так и рядом недостатков, основными из которых являются: длительность процесса, унос большого количества паров, малые объемы подготавливаемого топлива, а также реализация специальных требований по конструктивному исполнению устройств дегазирования и насыщения.

Учитывая большой объем работ, проводимых по подготовке РН к старту, ограниченные временные интервалы их выполнение на технических и стартовых комплексах космодромов, высокую плотность размещения наземного технологического оборудования на стартовых комплексах, разработка новых высокоэффективных технологий подготовки топлив является важной задачей создания средств заправки РН.

Целью данной работы является разработка перспективной технологии подготовки топлив в сочетании с конструктивными мероприятиями, позволяющими ускорить процессы насыщения (обезвоживания) и десорбции газов из топлива с минимальными потерями топлива и сжатых газов. Для анализа процесса топливоподготовки рассмотрим тепло- и массообмен в емкости при дегазировании/насыщении КЖРТ.

Изменение текущей концентрации растворенного газа в жидкости может быть определено из баланса масс [17]:

$$\frac{dm_i}{dt} = -V_{ж} \cdot \frac{dC}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{dm_i}{dt} = \beta \cdot \sum F \cdot (C_{\tau} - \chi(T) \cdot p_i) \quad (2)$$

где $\sum F$ — суммарная поверхность массообмена; β — коэффициент массообмена; $\chi(T)$ — коэффициент растворимости (Генри) газа; p_i — парциальное давление газа в свободном объёме емкости.

После преобразований уравнений (1) и (2), для случая десорбции газов получим:

$$C_{\tau} = \chi(T) \cdot p_i + (C_0 - \chi(T) \cdot p_i) \cdot e^{-\frac{\beta \cdot \sum F \cdot \tau}{V_{ж}}} \quad (3)$$

Для случая сорбции газов, когда:

$$C_{\tau} = \chi(T) \cdot p_i - (\chi(T) \cdot p_i - C_0) \cdot e^{-\frac{\beta \cdot \sum F \cdot \tau}{V_{ж}}} \quad (4)$$

Граничними условиями для уравнений (3), (4) являются $\tau = 0$; $C_{\tau 0} = C_0$; $\tau = \infty$; $C_{\tau \infty} = C_k = \chi(T) \cdot p_i$.

Таким образом, текущая концентрация растворенного газа при дегазировании и насыщении зависит от комплекса $\beta \cdot \Sigma F / V_{ж}$, характеризующего условия массообмена [18]. С увеличением поверхности массообмена и величины коэффициента массообмена эффективность процесса возрастает.

Проведенный анализ принципов повышения эффективности массообменных процессов показал, что основными направлениями являются [15]:

- увеличение удельной поверхности контакта фаз;
- повышение эффективности перемешивания;
- совершенствование способов контакта фаз;
- использование нестационарных режимов межфазного обмена, обеспечивающих достижение мгновенных значений коэффициента массопередачи;
- проведение процессов массообмена в условиях гидродинамической неустойчивости межфазной поверхности.

Наряду с приведенными принципами повышения эффективности процессов массообмена, решающим фактором является выбор способа смешения фаз, а также устройство для его реализации.

Таким образом приведенные выше методы насыщения/дегазирования можно классифицировать по способам смешения — способам контакта фаз «газ-жидкость»:

- разбрызгивание;
- кипячение;
- пневматическое перемешивание (барботажа);
- струйное смешение;
- смешение за счет внешних полей и физико-химических особенностей смешиваемых сред.

В отличие от пневматического способа смешения, использующего в качестве движущей силы энергию сжатого газа, реализация остальных способов смешения требует наличия насосов для перекачивания топлива, вакуумных насосов, теплообменников, генераторов звуковых колебаний и т.п., что в свою очередь накладывает определенные требования к подбору характеристик данного оборудования.

Пневматический способ весьма прост и эффективен. Имеет наибольшее распространение среди способов смешения фаз.

В сочетании с конструктивными аспектами основным недостатком является то, что практически невозможно создать пузырьки малого диаметра для организации развитой удельной поверхности контакта фаз «газ-жидкость» [22].

В технике известен способ интенсификации барботажа посредством диспергирования газовой фазы с помощью вибрирующего капилляра [24, 25, 26]. Этот способ позволяет в широком диапазоне варьировать параметрами диспергируемой фазы (диаметром пузырей, скоростью относительного движения фаз). Установлено, что наличие вибраций приводит к уменьшению отрывного диаметра пузырька и уменьшению расхода газа, при котором начинается режим цепочки пузырей. Генерация частот в диапазоне от 20 до 80 Гц позволяет получить однородные пузырьки диаметром от 3 до 1мм соответственно.

Иным способом дробления барботажного газа является создание звуковых и вибрирующих воздействий мембраной, под которой установлен источник звуковых колебаний [27]. Проведенные исследования показали, что звуковые колебания резонансной частоты 48Гц вызывают интенсивное диспергирование воздуха из трубы в воду. В результате чего образуются мелкие пузырьки диаметром от 0,2 до 1мм, что приводит к увеличению поверхности контакта фаз и существенно ускоряет процесс массообмена. Однако использование рассмотренных способов интенсификации массообмена, применительно к ракетным топливам, является неприемлемым ввиду их сложности и специфики конструктивного исполнения.

Для интенсификации процесса массообмена авторами работы [28] предложен метод ультразвукового барботажа с использованием специальных газоструйных стержневых излучателей (рис. 2).

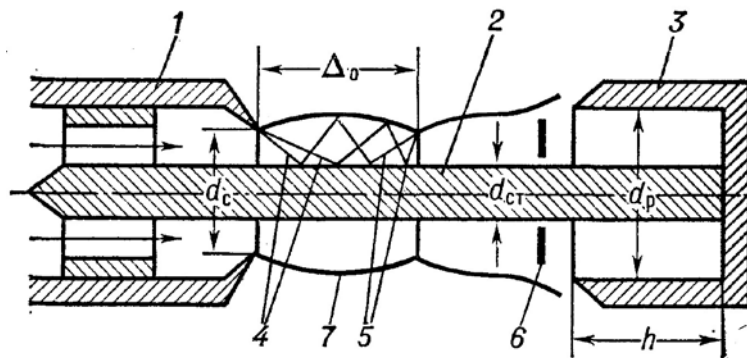


Рисунок 2. Схема стержневого газоструйного излучателя:
 1 – сопло; 2 – стержень; 3 – резонатор; 4 – волны разрежения;
 5 – косые скачки уплотнения; 6 – отсоединенный скачок
 уплотнения; 7 – граница струи (для наглядности резонатор
 расположен так, что рабочей является вторая ячейка, хотя
 работа осуществляется в первой ячейке).

Метод реализуется при подаче сверхзвуковой струи газа в компонент через излучатель, размещенный в нижней части барботажного слоя. При истечении газа через сопло излучателя сверхзвуковая струя, за счет взаимодействия с резонатором, генерирует интенсивные ультразвуковые колебания, которые приводят к сильной турбулизации среды, дроблению газовых пузырей и, как следствие, к интенсивному массообмену газа с

жидкостью и возникновению устойчивых циркуляционных токов в толще КЖРТ.

В стационарном режиме работы, характерном для работы стержневого газоструйного излучателя, рабочий перепад давлений составляет [29] $p_H = p_O + p_a$ (p_O, p_a – давление на входе в ультразвуковой излучатель и в окружающей среде). Длина первой ячейки недорасширенной струи газа Δ_0 вытекающей из сопла диаметром d_c с центральным стержнем d_{CT} , выражается зависимостью:

$$\Delta_0 = 1,1 \cdot (d_c - d_{CT}) \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{d_{CT}}{d_c} \right) \cdot \sqrt{\frac{p_H - 0,9}{p_H}} \quad (5)$$

При этом частота генерации определяется по формуле:

$$f = \varphi \cdot \frac{a}{4 \cdot \left[h + 0,4\ell + (d_p - d_{CT}) \cdot \left(0,4 - \frac{0,2 \cdot h}{d_c} \right) \right]} \quad (6)$$

$$\varphi = 0,78 \cdot \sqrt[3]{p_H - 0,93} \quad (7)$$

где d_p, d_c, d_{CT} — диаметры резонатора, сопла и стержня; h — глубина резонатора; ℓ — расстояние между кромками сопла и резонатора; a — скорость звука в газе; φ — поправочный коэффициент; f — оптимальная для процессов массообмена частота генерации; Δ_0 — длина первой ячейки недорасширенной струи газа.

Максимальная мощность в газоструйных излучателях достигается при $h \approx \ell$ и соотношении $d_p/d_c = 1,6$. При этом существует две области, равноценные по мощности, но отличающиеся по частоте генерации и по направлению выхода отработанного газа:

— высокочастотная область (рис. 3а) характеризующейся параметрами настройки $(\ell_1 + h_1) = 1,3 \cdot \Delta_0$ и выбросом газа от резонатора к соплу (обратный выброс);

— низкочастотная область (рис. 3б) характеризующейся параметрами настройки $(\ell_2 + h_2) = 2 \cdot \Delta_0$ и выбросом газа от сопла (прямой выброс).

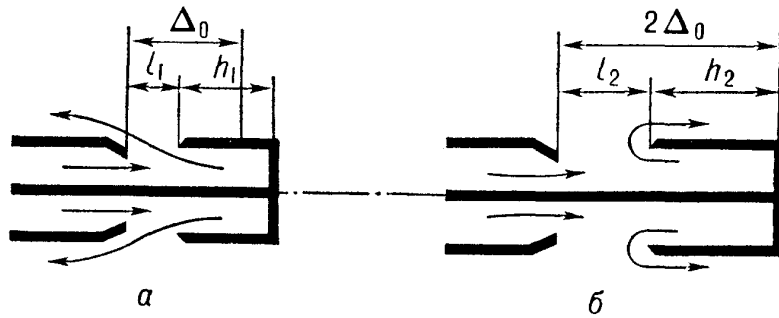


Рисунок 3

Для условий работы излучателя под слоем жидкости более выгодным, с точки зрения устойчивости процесса генерации колебаний, является низкочастотный режим с рабочим диапазоном от 10 до 20кГц.

Диаметр образующихся пузырей газа при ультразвуковом барботаже может быть определен по зависимости [30].

$$d_{уз} \approx 1,46 \cdot \sqrt[3]{\frac{\sigma_{ж}}{f^2 \cdot \rho_{г}}} \quad (8)$$

где $\sigma_{ж}$ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости; f — частота генерации колебаний; $\rho_{г}$ — плотность газа истекающего из сопла.

На рис. 4 приведены зависимости диаметров образующихся пузырьков газа при ультразвуковом барботаже азотного тетраоксида, несимметричного диметилгидразина и воды, где 1 — вода; 2 — АТ; 3 — НДМГ, керосин.

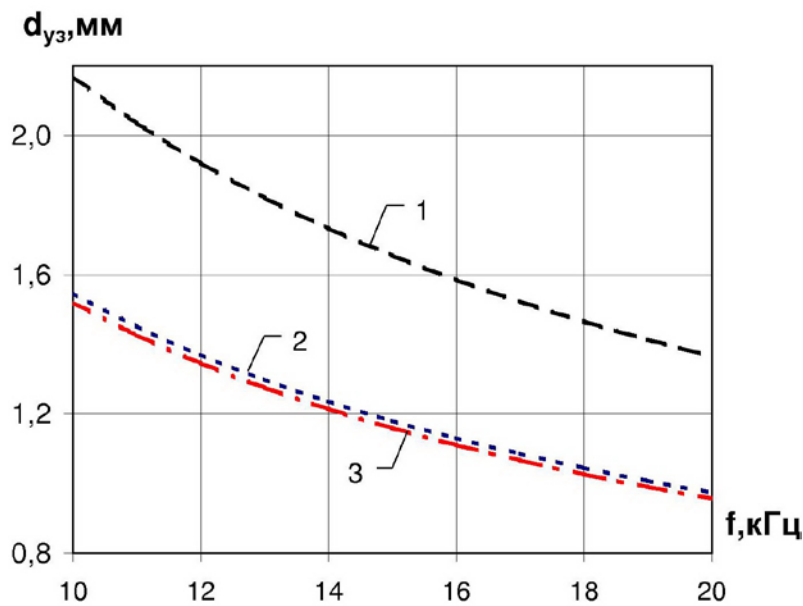


Рисунок 4

Таким образом в условиях постоянной организации ультразвукового барботажа в топливе образуется большое количество всплывающих однородных пузырей, диаметром $\sim (1\div 2)$ мм.

Для устранения технологической неравновесности, возникающей за счет неполного охвата объема устройства потоком газовых пузырьков, необходимо обеспечить перекрытие соседних потоков барботируемого газа. С целью реализации данного требования, соседние ультразвуковые излучатели необходимо располагать на расстоянии от 0,5 до 0,8 м друг от друга [22].

Расчеты, проведенные для определения эффективности излучателей, показали [28], что в сравнении с наиболее распространенными методами барботажа, время на подготовку топлива сокращается в ~ 13 раз, а экономия барботируемого газа в ~ 2 раза.

Подтверждение работоспособности и определение режимов работы ультразвукового излучателя (рис. 5), установленного под слой воды показали [31], что:

— при давлении воздуха на входе излучатель до 3 кгс/см^2 наблюдается формирование газового факела. Наблюдались деформированные, неустойчивые грибовидные и торообразные пузыри;

— в диапазоне входных давлений от 3 до 4 кгс/см^2 наблюдался переходной режим с образованием эллиптических и отдельных сферических пузырей диаметром до 5мм;

— при входном давлении от 4 кгс/см^2 и выше наблюдалась стабильная работа излучателя с образованием газожидкостного факела имеющего мелкопузырчатую структуру (диаметр пузырей ~ 2 мм).

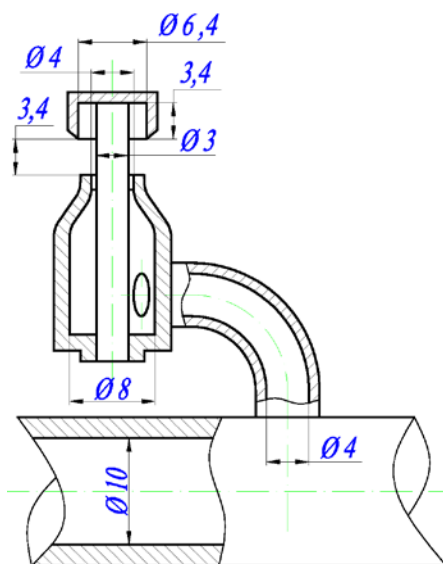


Рисунок 5

Таким образом в настоящей статье:

— приведены факторы ухудшения эксплуатационных характеристик высококипящих топлив, а также ограничения по количеству и составу растворенных газов и влаги;

- систематизированы наиболее распространенные методы подготовки топлив. Проведен их комплексный анализ;
- методы подготовки топлив классифицированы по способам смешения – способам контакта фаз «газ-жидкость»;
- приведены принципы повышения эффективности массообменных процессов;
- для интенсификации процессов предложен метод ультразвукового барботажа с использованием специальных газоструйных стержневых излучателей. Предложены расчетные зависимости основных конструктивных характеристик излучателей, а также диаметра образующихся пузырей;
- проведены испытания по определению работоспособности и режимов работы ультразвукового излучателя, установленного под слой воды, которые подтвердили правильность принятых проектных решений.

Библиографические ссылки

1. Мошкин Е.К. Нестационарные режимы работы ЖРД/ Е.К. Мошкин. — М.: Машиностроение, 1970. — 336с.
2. Лаурсабов К.А. Летные испытания ЖРД/ К.А. Лаурсабов, Л.В. Пронь, А.В. Сердюк. — М.: Машиностроение, 1977. — 189с.
3. Петров В.И. Кавитация в высокооборотных лопастных насосах / В. И. Петров, В.Ф. Чебаевский. — М.: Машиностроение, 1982. — 192 с.
4. Кобызев С.В. Построение рациональной схемы подготовки углеводородного горючего по температуре и влагосодержанию с использованием жидкого и газообразного азота на стартовом и техническом комплексах космодрома/ С.В. Кобызев, А.В. Золин, В.В. Чугунков // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. — № 10. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/486647.html>
5. Лещинер Л. Б. Проектирование топливных систем самолетов/ Л.Б. Лещинер, И.Е. Ульянов. — М.: Машиностроение, 1975. — 344 с.
6. Аксенов А. Ф. Авиационные топлива, смазочные материалы и специальные жидкости. Изд. 2-е, перераб. и доп. / А. Ф. Аксенов. — М.: Транспорт, 1970. — 225 с.
7. Ракетные двигатели/ М. Баррер, А Жоммот, Б.Ф. Вебек, Ж. Ванденкеркхове. — М.: Оборонгиз, 1962. — 800 с.
8. Венгерский Э.В. Гидродинамика двухфазных потоков в системах питания энергетических установок/ Э.В. Венгерский, В.А. Морозов, Г.Л. Усов. — М.: Машиностроение, 1982. — 128с.
9. Большаков Г. Ф. Восстановление и контроль качества нефтепродуктов. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Г. Ф. Большаков. — Л.: Недра, 1982. — 350 с.
10. Белянин П. Н. Промышленная чистота машин / П. Н. Белянин, В. М. Данилов. — М.: Машиностроение, 1982. — 224 с.

11. Химотология в гражданской авиации : Справ. / В. А. Пискунов, В. Н. Зрелов, В. Т. Василенко и др. — М. : Транспорт, 1983. — 248 с.
12. Расчетная оценка и экспериментальная проверка технологии дегазирования и гелирования КРТ для заправки РН «Циклон-4» : Техническая справка «Циклон-4». 22.6849.123 СТ / ГП «КБ «Южное». — 2005. — 29 с.
13. Сало М.П. Методы подготовки топлив по газосодержанию и пути их совершенствования./ М.П. Сало, А.Г. Налета, Г.М. Иваницкий. Труды VI Общероссийской молодежной науч.-техн. конф. «Молодежь. Техника. Космос». — СПб.: БГТУ, 2014. — С. 37—38.
14. Александров А.А. Методика выбора рациональных режимов охлаждения углеводородного горючего стартовым оборудованием перед заправкой топливных баков ракеты-носителя/ А.А. Александров, Р.А. Гончаров, В.А. Игрицкий, В.В. Чугунков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. — № 1 — С. 40—46.
15. Сало М.П. Методы подготовки ракетных топлив и пути их совершенствования/ М.П. Сало, А.Г. Налета// Электронный журнал «Труды МАИ». 2014. — Выпуск № 74. Режим доступа <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=49289>
16. Хлыбов В.Ф. Основы устройства и эксплуатации заправочного оборудования/В.Ф. Хлыбов. — М.: Изд-во РВСН имени Петра Великого, 2003. — 248с.
17. Ермашкевич В.Н. Гидро– и термодинамика насосных систем энергоустановок на четырёхокиси азота/ В.Н. Ермашкевич; под ред. Л.Л. Васильева. — Мн.: Наука и техника. 1987. — 287с.
18. Шлейфер А.А. Перспективные технологии подготовки топлив с улучшенными эксплуатационными свойствами/ А.А. Шлейфер, А.Н. Литвинов — Ульяновск, 1989. — 215с.
19. Александров А.А. 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 // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2013. — № 1 — С. 12—22.
20. Испытания жидкостных ракетных двигателей/ А.Е. Жуковский, В.С. Кондрусев, В.Я. Левин, В.В. Окорочков; под ред. В.З. Левина. Учеб. пособие для авиац. специальностей вузов. — М.: Машиностроение, 1981. — 199с.
21. Сало М.П. Массообмен газа с топливом в баке верхней ступени при стоянке ракеты-носителя/ М.П. Сало, А.В. Сичевой. Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: зб. наук. праць. — Д.: Пороги, 2012. — Том XIV. — С. 58-70.
22. Сало М.П. Методический подход к расчету и выбору параметров барботажной системы топливоподготовки/М.П. Сало, А.В. Сичевой// Техническая механика. — 2014. — №2 — С. 52 – 62.

23. Сало М.П. Метод повышения эксплуатационных характеристик топлива для ЖРД космических ступеней /М.П. Сало, А.В. Костюк, Г.М. Иваницкий, В.Н. Ошанин // Научно-технический сборник «Космическая техника. Ракетное вооружение». – Государственное предприятие «КБ «Южное», Днепропетровск, 2007. – С. 51 – 57.

24. Грачев И.С. Динамика образования пузырьков на вибрирующем капилляре/ И.С. Грачев, Д.Т. Кокорев, В.Ф. Юдаев// Инженерно-физический журнал. — 1973. — Том XXV — №3 — С. 424 – 429.

25. Грачев И.С. Образование пузырька газа у вибрирующего капилляра, затопленного в жидкости/ И.С. Грачев, Д.Т. Кокорев, В.Ф. Юдаев// Инженерно-физический журнал. — 1976. — Том XXX — №4 — С. 665 – 670.

26. Грачев И.С. К расчету вибродиспергирующих устройств/ И.С. Грачев, Гукасов Н.А.// Инженерно-физический журнал. — 1979. — Том XXXVI — №1 — С. 107 – 109.

27. Шетанков О.К. Влияние резонансных звуковых колебаний на массообмен между ограниченным объемом газа и жидкости/ Промышленная теплотехника. Науч.-прикл. журнал. — 1979. — Том 1 — №2 — С. 71 – 75.

28. Сало М.П. Способ интенсификации тепло- и массообменных процессов при подготовке КРТ для верхних ступеней РН/ М.П. Сало, Г.М. Иваницкий// Вестник Днепропетровского университета. Ракетно-космическая техника. — 2008. — Вып. 12 т.2. — с. 130-140.

29. Ультразвук. Маленькая энциклопедия/ Гл. ред. И.П. Голямина. — М.: «Советская энциклопедия», 1979г — 400с.

30. Физика и техника мощного ультразвука, т.Ш. Физические основы ультразвуковой технологии/ Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука. 1970. — 689с.

31. Сало М.П. Экспериментальное исследование стержневых газоструйных излучателей./ М.П. Сало, А.Г. Налета, Г.М. Иваницкий. XVI Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос»: Збірник тез — Дніпропетровськ, 2014. — С. — 176.

Надійшла до редколегії 30.04.2015 г.