УДК 629.1

М.П. САЛО, А.В. СИЧЕВОЙ

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ И ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ БАРБОТАЖНОЙ СИСТЕМЫ ТОПЛИВОПОДГОТОВКИ

Одной из важных задач, решаемых средствами заправки летательных аппаратов, является обеспечение требуемых параметров компонентов топлив, которые достигаются в процессе топливоподготовки. На практике для решения задачи обезвоживания углеводородных горючих, насыщения газом и дегазирования широкое применение получил барботаж топлива газом.

Целью работы является разработка обобщенного методического подхода к описанию физической картины, возникающей в процессе топливоподготовки при барботаже, а также определение на этой основе проектных параметров барботажных коллекторов, обеспечивающих нивелирование технологической равновесности процесса.

Для определения характеристик процесса барботажа и проектных параметров барботажных коллекторов рассмотрен механизм истечения газа в жидкость через отверстие.

По результатам выполненных работ разработана методика расчета определяющих параметров барботажного процесса топливоподготовки, включающая: определение граничных режимов барботажного процесса; определение критических радиусов пузырьков, при которых наступает их дробление, а также диаметров устойчивых пузырьков; расчет удельной межфазной поверхности, представляющей отношение суммарной поверхности газовых пузырьков к объему жидкости; определение изменения газосодержания в слое топлива для горизонтально расположенной емкости в зависимости от расходонапряженности барботируемого газа.

Выработаны рекомендации по конструктивной схеме барботажных коллекторов для установки топливоподготовки.

Одним з важливих завдань, що вирішуються засобами заправлення літальних апаратів, є забезпечення необхідних параметрів компонентів палив, які досягаються в процесі паливопідготовки. На практиці для вирішення завдання зневоднювання вуглеводневих горючих, насичення газом і дегазування широке застосування дістав барботаж палива газом.

Метою роботи є розробка узагальненого методичного підходу до опису фізичної картини, що виникає в процесі паливопідготовки при барботажі, а також визначення на цій основі проектних параметрів барботажних колекторів, що забезпечують нівелювання технологічної рівноважності процесу.

Для визначення характеристик процесу барботажа й проектних параметрів барботажних колекторів розглянуто механізм витікання газу в рідину через отвір.

За результатами виконаних робіт розроблена методика розрахунків визначальних параметрів барботажного процесу паливопідготовки, що включає: визначення граничних режимів барботажного процесу; визначення критичних радіусів пузирчиків, при яких настає їхнє дроблення, а також діаметрів сталих пузирчиків; розрахунки питомої міжфазної поверхні, що є відношенням сумарної поверхні газових пузирчиків до об'єму рідини; визначення зміни газовмісту в шарі палива для горизонтально розташованої ємності залежно від витратонапруженості барботіруємого газу.

Вироблені рекомендації з конструктивної схеми барботажних колекторів для установки паливопідготовки.

One of the important problems is to provide the required parameters of propellant components, which are attained by the propellant preparation. This problem is resolved by facilities for spacecraft propellant filling. In practice splashing the propellant by gas is widely used to resolve the problem of dehydration of hydrogen-carbon fuel, gas saturation and degassing.

The research subject is to develop a generalized methodic approach to description of a physical pattern during the propellant preparation with splashing as well as determination of the design parameters of splashing collectors for levelling a technological balance of the process.

To define the splashing characteristics and the design parameters of splashing collectors, the mechanism of the gas flow in fluid through orifice is examined.

In accordance with the research results the design procedure of the determining parameters for splashing during the propellant preparation is developed including: determination of the limiting conditions for splashing; critical radii of bubbles resulting in crushing, diameters of stable bubbles as well as calculations of a specific interface surface represented by the relation of an overall surface of gas bubbles and a fluid volume; determination of variations in the gas content in propellant layer for a horizontally-located capacity depending on gas intensity of the splashed gas.

Recommendations are made for the design of splashing collectors of propellant preparation facilities.

Одной из важных задач, решаемых средствами заправки летательных аппаратов (ЛА), является обеспечение требуемых параметров компонентов топлив (КТ), которые достигаются в процессе топливоподготовки. В общем случае, цель топливоподготовки – обеспечение необходимого влаго- и газосодержания топлив.

В кондиционном топливе, как и в любой технически чистой жидкости, допускается наличие некоторых примесей, не оказывающих, из-за малой концентрации, влияния на свойства КТ. Однако их предельные концентрации строго регламентируются.

При несоответствии предельных концентраций заданным требованиям эксплуатационные и энергетические характеристики топлив существенно ухудшаются, что впоследствии может оказать негативное влияние на работоспособность ЛА.

Известно, что растворенный воздух отрицательно влияет на некоторые эксплуатационные свойства углеводородных топлив, прежде всего на их прокачиваемость [1]. Так, при понижении внешнего давления (с увеличением высоты полета ЛА) 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 [2, 3]. 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 [4].

Кроме этого, для безопасной и надежной эксплуатации ЛА 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 гидроситемах ЛА, что оказывает негативное влияние на перекачку топлив [5, 6, 7].

В силу указанных особенностей КТ, топливоподготовка является обязательным комплексом мероприятий в наземном технологическом оборудовании, которые направлены на достижение требуемых параметров КТ перед заправкой ЛА, а её эффективность определяется используемыми методами и оборудованием.

На практике для решения задачи обезвоживания углеводородных горючих, насыщения газом и дегазирования широкое применение получил барботаж топлива газом [8].

Процесс барботажа, как правило, реализуется подачей газа в жидкость через систему перфорированных трубопроводов, расположенных в придонной части емкости и имеющих отверстия определенного сечения.

Длительность процесса топливоподготовки, а также затраты барботируемого газа в значительной мере определяются гидродинамикой барботажа.

Из теории массообмена известно, что интенсивность процессов в газожидкостных системах зависит от коэффициента массообмена (β) и поверхности массообмена (F). С их увеличением эффективность процесса возрастает [9].

Коэффициент β в зависимости от типа установки топливоподготовки и гидродинамического режима её работы может изменяться пропорционально скорости потока в степени 0,3÷1 [10]. Поэтому для выбора рационального режима важной задачей является определение характеристик барботажа (скорость всплытия пузырьков, форма всплывающих пузырьков, газосодержание, удельная межфазная поверхность и т.д.), влияющих на процессы массообмена при топливоподготовке.

Целью работы является разработка обобщенного методического подхода к описанию физической картины, возникающей в процессе топливоподготовки при барботаже, а также определение на этой основе проектных параметров барботажных коллекторов, обеспечивающих нивелирование технологической равновесности процесса.

Для определения характеристик процесса барботажа и проектных параметров барботажных коллекторов рассмотрим механизм истечения газа в жидкость через отверстие.

В зависимости от величины расхода газа наблюдаются различные гидродинамические режимы. Так, в работе [11, 12] выделяют два режима: пузырьковый и струйный. Пузырьковый режим наблюдается при малом расходе газа и характеризуется прохождением через жидкость отдельных пузырьков. Размер образующихся пузырьков одинаков, пузырьки равномерно распределены по высоте жидкости. При повышении расхода до величины, называемой критической, реализуется переходной режим барботажа, происходит слияние пузырьков и последующее формирование струйного режима.

Величина критического расхода газа $V_{кр}$ зависит от диаметра отверстия барботера, физических свойств жидкости, в которую истекает газ, и может быть рассчитана по зависимости [13]

$$V_{кр} = 1{,}82 \cdot g^{0,6} \cdot \frac{\sigma_ж \cdot d_{отв}^{0,83}}{\rho_ж}, \qquad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, $\sigma_ж$ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, $\rho_ж$ – плотность жидкости, $d_{отв}$ – диаметр отверстия в барботажном коллекторе.

Значения критического расхода газа в зависимости от диаметра отверстия, рассчитанные по зависимости (1) для воды и ракетных топлив (азотный тетраоксид, несимметричный диметилгидразин), приведены на рис. 1, где 1 – азотный тетраоксид; 2 – несимметричный диметилгидразин; 3 – вода; 4 – экспериментальные значения критического расхода газа в воду из отверстия диаметром 0,4 см по данным [14].

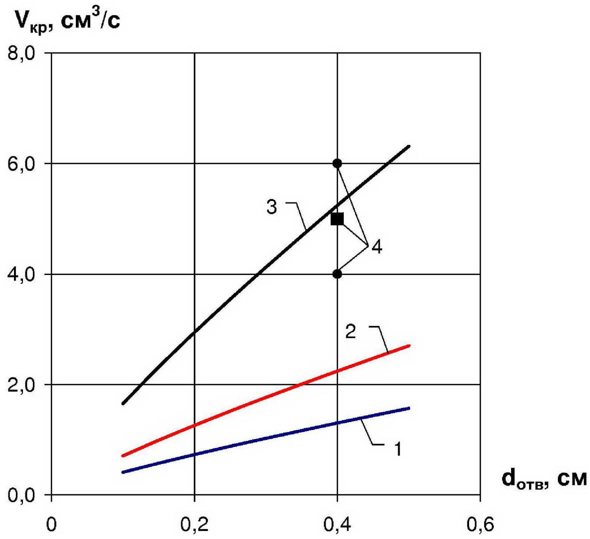

Рис. 1

Согласно визуальным наблюдениям [15], газовый поток при струйном режиме истечения постоянный, сохраняющий форму и размеры факела. Этот факел вследствие динамического взаимодействия газа и жидкости распадается в последующем на отдельные пузырьки, движущиеся в жидкости.

В работе [16] отмечается, что даже при малых расходах распределение пузырьков не является равномерным. Диаметр образующихся пузырьков не может быть стабильным и характеризуется спектром размеров. В процессе подъема пузырьков возможно их слияние и образование комплекса пузырьков, движущегося со скоростью, значительно превышающей скорость свободного всплытия отдельных пузырьков.

Применительно к процессам топливоподготовки с использованием барботажа необходимо обеспечить развитую турбулентность в жидкости, обусловленную всплывающими газовыми пузырьками [17] и характеризующуюся большими числами Рейнольдса (Re≥800), что соответствует струйному режиму истечения газа. При этом по данным [18] при числах Рейнольдса более 200 пузырек теряет сферическую форму и принимает форму сплющенного эллипсоида, короткая ось которого расположена в направлении движения.

Согласно [19], границы существования различных форм пузырьков можно определить графически (рис. 2). С этой целью используются следующие критерии.

Критерий Этвеша, характеризующий отношение сил гравитации и поверхностного натяжения,

$$\mathrm{Eo} = \frac{g \cdot D_п^2 \cdot (\rho_ж - \rho_г)}{\sigma_ж}, \qquad (2)$$

где $\rho_г$ – плотность барботируемого газа, $D_п$ – диаметр всплывающего пузырька.

Критерий Мортона, зависящий только от физических характеристик фаз,

$$M = \frac{g \cdot \mu_ж^4 \cdot (\rho_{жс} - \rho_г)}{\rho_{жс}^2 \cdot \sigma_{жс}^3}, \quad (3)$$

где $\mu_ж$ – коэффициент динамической вязкости топлива.

Критерий Рейнольдса, характеризующий режим всплытия газовых пузырьков в жидкости,

$$Re = \frac{v_0 \cdot D_n}{\nu_{жс}}, \quad (4)$$

где v_0 – скорость всплытия газового пузырька, $\nu_ж$ – коэффициент кинематической вязкости топлива.

Область изменения критериев Re, Eo и M разбита на три зоны, определяющие три типа формы пузырька.

Если точка, соответствующая заданным значениям критериев M, Eo, находится в зоне I, пузырек является сферическим, в зоне II – эллипсоидальным, в зоне III – имеет форму колпачка [20].

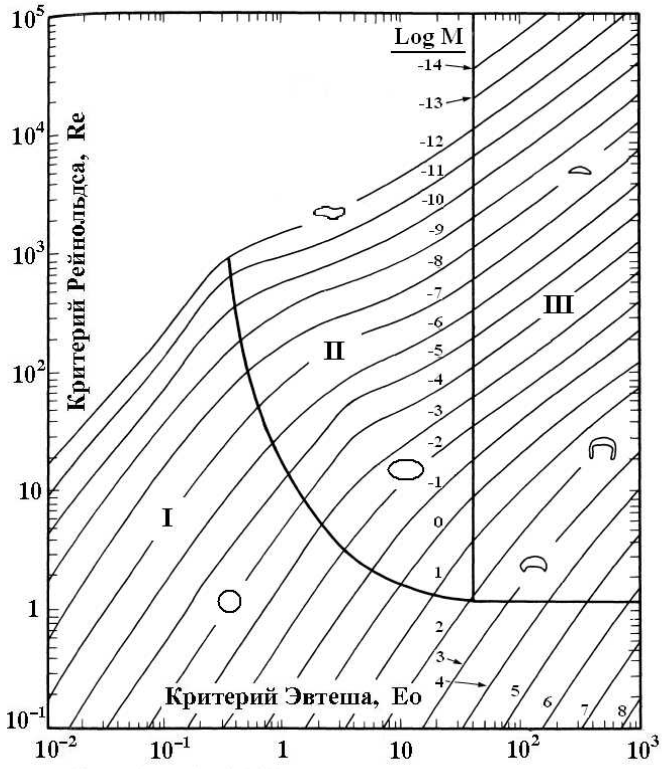

Рис. 2

Для расчета скорости всплытия деформированных пузырьков, в предположении о независимости скорости всплытия (v_0) от диаметра всплывающих пузырьков (при Re>600), наиболее близкое совпадение с экспериментальными данными дает использование зависимости [21]

$$\mathrm{v}_0 = 1{,}01 \cdot \left(\frac{\sigma_{ж}^2}{\mu_{ж} \cdot \rho_{ж}} \right)^{0,2}. \qquad (5)$$

При струйном режиме истечения газа из отверстия отрывной диаметр пузырьков зависит только от объемного расхода и рассчитывается по зависимости [13, 22]

$$D_п = \sqrt{\frac{6 \cdot V_г}{\pi \cdot \mathrm{v}_0}}, \qquad (6)$$

где $V_г$ – объемный расход газа.

После подстановки уравнения (5) в (6), зависимость преобразуется к виду:

$$D_п = 1{,}38 \cdot \sqrt{\frac{V_г}{\left(\frac{\sigma_{ж}^2}{\mu_{ж} \cdot \rho_{ж}} \right)^{0,2}}}. \qquad (7)$$

Полученные с использованием зависимости (7) расчетные значения отрывных диаметров пузырьков газа при барботаже ракетных топлив для цилиндрической емкости объемом 20 м^3 со степенью заполнения 0,8 и расходонапряженностью гелия $G_г / V_ж$, где $G_г$ – весовой расход газа, отнесенный к одному кубическому сантиметру топлива – $V_ж$, изменяющейся в диапазоне от $4{,}4 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-4}$ г/(см^3·с) [23], приведены на рис. 3.

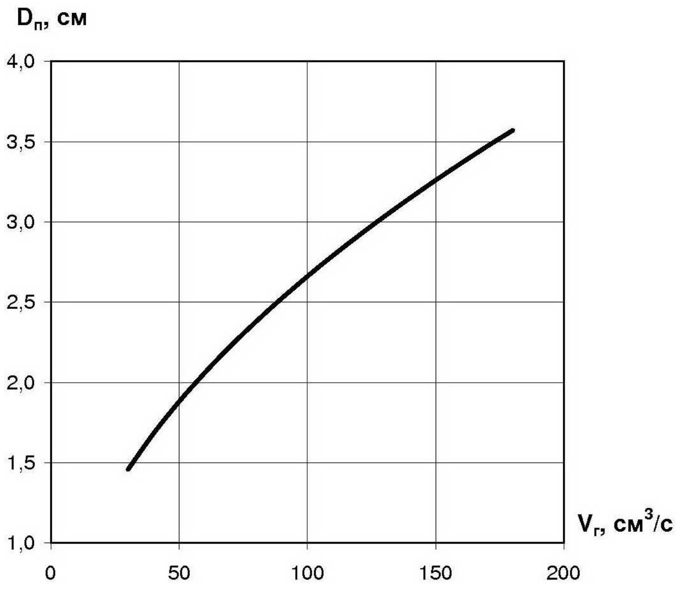

Рис. 3

С увеличением размера в процессе всплытия, пузырек деформируется и дробится.

Критический радиус пузырька, при котором наступает его дробление, может быть найден по зависимости [24]

$$R_{кр} = \sqrt[3]{\frac{3}{C_D}} \cdot \frac{\sigma_{ж}}{v_0^2 \cdot \sqrt[3]{\rho_г \cdot \rho_{ж}^2}}, \quad (8)$$

где C_D – коэффициент сопротивления.

Наиболее точное совпадение C_D и экспериментальных данных дает зависимость [19], учитывающая форму всплывающего пузырька

$$C_D = \frac{4}{3} \cdot Re^{-2} \cdot M^{-0,5} \cdot Eo^{1,5} = 26,2 \cdot \frac{R_п}{v_0^2}. \quad (9)$$

После подстановки уравнения (9) в (8) и допущении о равенстве $R_п = R_{кр}$ зависимость преобразуется к виду

$$R_{кр} = \frac{0,58 \cdot \sigma_ж^{0,75}}{v_0 \cdot \rho_{ж}^{0,5} \cdot \rho_г^{0,25}}. \quad (10)$$

В работе [21] установлено, что средний диаметр устойчивого пузырька в двухфазном слое может быть определен из выражения

$$d_{ср} = \frac{\xi \cdot v_0^2}{2 \cdot g}, \quad (11)$$

где ξ – коэффициент сопротивления относительному движению пузырька, который определяется по графику (рис. 4).

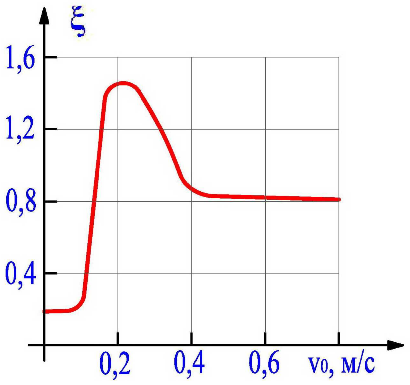

Рис. 4

Расчеты, проведенные по зависимости (5) для нормальных условий (t = 20° С), показывают, что скорость всплытия пузырьков газа в азотном тетраоксиде и несимметричном диметилгидразине практически одинакова и составляет ≈ 0,27 м/с. Расчетные значения среднего диаметра устойчивых пузырьков, определенные по зависимости (11), составляют $d_{ср} \approx 5,2$ мм, а критический диаметр пузырьков (по зависимости (10)) $D_{кр} = 2R_{кр} \approx 15$ мм.

Формы всплывающих пузырьков, определенные (см. рис. 2) с использованием критериальных зависимостей (2), (3) и (4), показывают, что пузырьки при $D_{кр}$ – колпачки, а при $d_{ср}$ – эллипсоиды.

Таким образом, факел газожидкостной струи будет характеризоваться спектром газовых пузырьков диаметром от $\mathrm{d}_{\text{ср}}$ до $\mathrm{D}_{\text{кр}}$, имеющих различную форму.

При анализе работы барботажных установок используется понятие удельной межфазной поверхности ($F_{уд}$), представляющей собой отношение суммарной поверхности газовых пузырьков к объему жидкости, в котором они находятся $F_{уд} = F_{пуз} / V_{Ж}$ (м^2/м^3).

Для расчета $F_{уд}$ может быть использовано уравнение [25]

$$F_{УД} = \frac{6 \cdot \varphi_{Г}}{d_{пуз}}, \quad (12)$$

где $\varphi_{Г}$ – газосодержание в слое жидкости.

Уравнение (12) справедливо для газожидкостной смеси, содержащей однородные пузырьки диаметром $d_{пуз}$.

Структура барботажного слоя характеризуется полидисперсностью размеров газовых пузырьков, поэтому для известных диаметров пузырьков $\mathrm{D}_{\text{кр}}$ и $d_{ср}$ среднее значение диаметра $\mathrm{D}_{\text{ср}}$ при нормально-логарифмическом законе распределения может быть определено по формуле [26, 27]

$$\mathrm{D}_{\text{ср}} = \sqrt{\mathrm{D}_{\text{кр}} \cdot \mathrm{d}_{\text{ср}}}.$$

В работе [28] предложена зависимость для расчета газосодержания в слое жидкости при $\varphi_{Г} \le 0{,}7$, обобщающая опытные данные многих исследований

$$\varphi_{Г} = 0{,}4 \cdot \left(\frac{\rho_{Г}}{\rho_{Ж}}\right)^{0{,}15} \cdot \left(v_{Г} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{Ж}}{\sigma_{Ж} \cdot g}}\right)^{0{,}68}, \quad (13)$$

где $v_{Г}$ – приведенная скорость газа.

Как видно из зависимости (13), большинство входящих в неё параметров определяются физико-химическими свойствами топлива. Исключение составляет приведенная скорость барботируемого газа $v_{Г}$, которая зависит от его расхода, геометрических параметров емкости и способа её установки. Приведенная скорость газа определится как

$$v_{Г} = \frac{G_{г}}{\rho_{Г} \cdot \mathrm{F}_{\text{ем}}} = \frac{\mathrm{V}_{\text{г}}}{\mathrm{F}_{\text{ем}}},$$

где $\mathrm{F}_{\text{ем}}$ – площадь горизонтального сечения емкости.

Расчетные значения газосодержания при барботаже ракетного топлива для данных, принятых в работе [23], с использованием зависимости (13) приведены на рис. 5, где 1 – азотный тетраоксид, 2 – несимметричный диметилгидразин.

Для устранения технологической неравновесности, возникающей за счет неполного охвата объема устройства потоком газовых пузырьков, необходимо обеспечить перекрытие соседних потоков барботируемого газа [23]. С целью реализации данного требования, соседние отверстия барботажных коллекторов необходимо располагать таким образом, чтобы области захвата газовых факелов перекрывались.

Согласно [18, 29], истекающая из отверстия осесимметричная затопленная струя характеризуется углом расширения (α), равным ~ 24°. Радиус газожидкостного факела, выходящего на поверхность, определяется как:

$$R_{CTP} = tg\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot H_{KPT},$$

где H_{KPT} – высота уровня топлива.

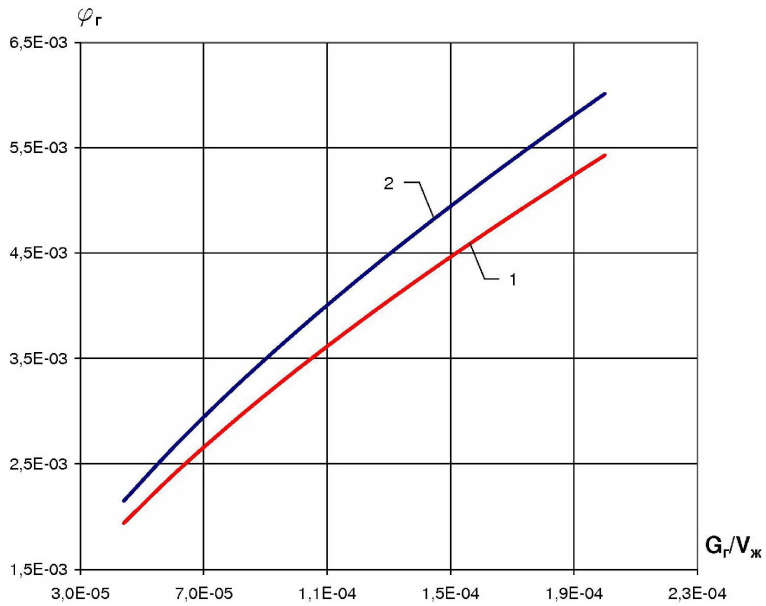

Рис. 5

Расчетные значения радиуса выходящей на поверхность струи для характерного диапазона H_{KPT} = 1,5 ÷ 2,5 м составляют 0,3 и 0,5 м соответственно. Расстояние между соседними отверстиями в барботажных коллекторах с учетом перекрытия газовых факелов составит 0,4 ÷ 0,8 м.

Из приведенного следует, что с увеличением высоты уровня топлива также необходимо увеличивать расстояние между отверстиями барботажных коллекторов.

При топливоподготовке методом барботажа в горизонтально расположенной емкости целесообразно в нижней половине емкости устанавливать параллельные барботажные трубопроводы длиной, определяемой протяженностью цилиндрической части емкости, образующие сетчатую структуру с равными сторонами от 0,4 до 0,8 м.

Таким образом, в настоящей статье разработана методика расчета определяющих параметров барботажного процесса топливоподготовки, включающая:

– определение граничных режимов барботажного процесса;

– определение критических радиусов пузырьков, при которых наступает их дробление, а также диаметров устойчивых пузырьков;

– расчет удельной межфазной поверхности, представляющей собой отношение суммарной поверхности газовых пузырьков к объему жидкости;

– определение изменения газосодержания в слое топлива для горизонтально расположенной емкости в зависимости от расходонапряженности барботируемого газа.

Выработаны рекомендации по конструктивной схеме барботажных коллекторов для установки топливоподготовки.

1. *Лещинер Л. Б.* Проектирование топливных систем самолетов / *Л. Б. Лещинер, И. Е. Ульянов.* – М. : Машиностроение, 1975. – 344 с.
2. *Петров В. И.* Кавитация в высокооборотных лопастных насосах / *В. И. Петров, В.Ф. Чебаевский.* – М. : Машиностроение, 1982. – 192 с.
3. *Аксенов А. Ф.* Авиационные топлива, смазочные материалы и специальные жидкости. Изд. 2-е, перераб. и доп. / *А. Ф. Аксенов.* – М. : Транспорт, 1970. – 225 с.
4. Ракетные двигатели / *М. Баррер, А Жоммот, Б.Ф. Вебек, Ж. Ванденкеркхове*. – М. : Оборонгиз, 1962. – 800 с.
5. *Большаков Г. Ф.* Восстановление и контроль качества нефтепродуктов. Изд. 2-е, перераб. и доп. / *Г. Ф. Большаков.* – Л. : Недра, 1982. – 350 с.
6. *Белянин П. Н.* Промышленная чистота машин / *П. Н. Белянин, В. М. Данилов.* – М. : Машиностроение, 1982. – 224 с.
7. Химотология в гражданской авиации : Справ. / *В. А. Пискунов, В. Н. Зрелов, В. Т. Василенко* и др. – М. : Транспорт, 1983. – 248 с.
8. *Хлыбов В. Ф.* Основы устройства и эксплуатации заправочного оборудования / *В. Ф. Хлыбов.* – М. : Изд-во РВСН имени Петра Великого, 2003. – 248 с.
9. *Ермашкевич В. Н.* Гидро- и термодинамика насосных систем энергоустановок на четырёхокиси азота / *В. Н. Ермашкевич.* – Мн. : Наука и техника. 1987. – 287 с.
10. *Рамм В. М.* Абсорбция газов / *В. М. Рамм.* – М. : Химия. 1974. – 656 с.
11. *Левш И. П.* О расчете гидравлических сопротивлений при барботаже / *И. П. Левш, О. Б. Ерофеева* // Журнал прикладной хим. – 1963. – Т. 36, вып. 4. – С. 779 – 788.
12. *Азизян А. Г.* Гидродинамика барботажных процессов / *А. Г. Азизян, Р. А. Меликян, Н. И. Смирнов* // Изв. АН Арм. ССР, Серия технических наук. – 1961. – Т. 14, вып. 2. – С. 31 – 42.
13. *Циборовский Я.* Процессы химической технологии / *Я. Циборовский*. – Л. : Химия, 1958. – 932 с.
14. *Кафаров В. В.* Основы массопередачи. Изд. 2-е, переработ и доп. Учебное пособие для вузов / *В. В. Кафаров.* – М. : «Высшая школа», 1972. – 496 с.
15. *Стабников В. Н.* Процессы и аппараты пищевых производств / *В. Н. Стабников* и др. – М. : Пищевая промышленность, 1966. – 349 с.
16. *Курбатов А. В.* Труды московского энергетического института / *А. В. Курбатов.* – М.-Л., Госэнергоиздат, 1953. – Вып. 11.
17. 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.
18. *Лаптев А. Г.* Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных процессов / *Лаптев А. Г.* – Казань : Изд-во Казанск. ун-та, 2007. – 500 с.
19. *Clift R.* Bubbles, drops, and particles / *R. Clift, J. R. Grace, M. E. Weber.* – New York, 1978. – 380 p.
20. *Протодьяконов И. О.* Гидродинамика и массообмен в системах газ–жидкость / *И. О. Протодьяконов, И. Е. Люблинская.* – Л. : Наука, 1990. – 349 с.
21. Испытания с имитацией эксплуатационных условий подачи криогенных компонентов топлива при отработке ракетных двигательных установок / *Бершадский В. А.* – Дис. на соискание уч. степени д.т.н. Сергиев Посад, НИИХИММАШ, 2001. – 256 с.
22. *Касаткин А. Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии / *А. Г. Касаткин.* – М. : 1973. – 754 с.
23. 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. *Левич В. Г.* Физико-химическая гидродинамика / *В. Г. Левич.* – Физматгиз, 1959. – 639 с.
25. *Соколов В. Н.* Газожидкостные реакторы / *В. Н. Соколов, И. В. Доманский.* – Л. : Машиностроение, 1976. – 216 с.
26. *Полухин Д. А.* Отработка пневмогидросистем двигательных установок ракет-ноистелей и космических аппаратов с ЖРД / *Д. А. Полухин, В. М. Орещенко, В. А. Морозов.* – М. : Машиностроение, 1987. – 248 с.
27. *Венгерский Э. В.* Гидродинамика двухфазных потоков в системах питания энергетических утановок / *Э. В. Венгерский, В. А. Морозов, Г. Л. Усов.* – М. : Машиностроение, 1982. – 128 с.

28. *Кутателадзе С. С.* Гидравлика газижидкостных систем / *С. С. Кутателадзе, М. А. Стырикович.* – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1958. – 232 с.
29. *Альтшуль А. Д.* Гидравлика и аэродинамика : Учеб. для вузов / *А. Д. Альтшуль, Л. С. Животовский, Л. П. Иванов.* – М. : Стройиздат, 1987. – 414 с.

Государственное предприятие
«Конструкторское бюро «Южное»
им. М.К. Янгеля»,
г. Днепропетровск,

Днепропетровский национальный
университет имени Олеся Гончара,
г. Днепропетровск

Получено 03.03.14,
в окончательном варианте 17.06.14.