

УДК 532.593:541.24

А.В. Давыдова

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Днепропетровск

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ НА СЕТЧАТЫХ СРЕДСТВАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СПЛОШНОСТИ ТОПЛИВА В УСЛОВИЯХ ИХ ОГРАНИЧЕННОГО КОНТАКТА С ГАЗОВОЙ ФАЗОЙ

Предлагается методика расчета перепада давления в потоке жидкого ракетного топлива при его прохождении через сетчатые средства обеспечения сплошности топлива при их частичном контакте с газовой фазой в условиях действия переменного поля массовых сил

Ключевые слова: жидкое ракетное топливо, невесомость, сетчатые средства обеспечения сплошности, газ наддува.

Введение

Для обеспечения повторного запуска двигателей космического летательного аппарата (КЛА) в условиях практической невесомости необходимо использовать специальные средства обеспечения сплошности топлива (СОСТ) для исключения поступления газа наддува из бака в сливную магистраль. В настоящее время для этой цели широко используются СОСТ сетчатого типа, или т. н. сетчатые разделители фаз (СРФ).

Наиболее сложными с точки зрения функционирования СОСТ и их наземной отработки являются переходные этапы работы двигательной установки (ДУ). При запуске (ДУ) происходит переход движения КЛА из состояния практической невесомости в поле массовых сил высокой интенсивности. Газ наддува в виде отдельных пузырей перемещается в полости бака. Газовые пузыри при определенных условиях прижимаются к поверхности СРФ, препятствуя прохождению через нее топлива. В зависимости от степени перекрытия пузырями поверхности СРФ определяется величина перепада давлений на СРФ при прохождении через них топлива. Поскольку работоспособность сетчатых СОСТ непосредственно зависит от действующих перепадов давлений на них в течении всего времени полета КЛА, очевидна необходимость разработки эффективных методик расчета коэффициента перекрытия газовой фазой СРФ в разнообразных динамических условиях.

Постановка задачи. Разработке методик расчета проектных параметров сетчатых СОСТ посвящено значительное количество работ в нашей стране и за ее пределами. Целью этих методик является анализ влияния на уровень работоспособности сетчатых СОСТ специфических условий их функционирования СОСТ при выполнении КЛА полетного задания, и выбор оптимальных значений проектных параметров. Так, в [9] эмпирическим путем принимается попытка оценки влияния вибрацион-

ных силовых воздействий на удерживающую способность СРФ в зависимости от особенностей их конструкции. Методика оценки снижения удерживающей способности сетчатых СОСТ вследствие движения потока топлива вдоль поверхности СРФ предложена в [3]. Методика расчета степени разделения потока топлива сетчатым СОСТ на протекающее через него топливо и топливо, движущееся вдоль его поверхности под действием внешних силовых импульсов приводится в [2].

Цель работы. Данная работа посвящена разработке методики определения коэффициента перекрытия поверхности СРФ газовой фазой при различных уровнях заполнения баков КЛА топливом. Под коэффициентом перекрытия СРФ понимается относительная часть поверхности СРФ контактирующая только с газовой фазой.

При работе СРФ на различных этапах полета КЛА возникают ситуации, в которых часть поверхности СРФ перекрывается газовыми пузырями. Газовая подушка в баках неизбежно дробится на части в условиях движения КЛА по пассивному участку траектории под действием разнонаправленных внешних силовых импульсов. Размеры отдельных пузырей могут иметь различную величину, что необходимо учитывать при определении значения коэффициента перекрытия СРФ газовой фазой.

Основной материал

Прежде чем переходить к описанию этапов расчета по предлагаемой методике, необходимо отметить для каких конструкций сетчатых СОСТ она наиболее эффективна, и в каких случаях эффективности этой методики будет низкой.

Предлагаемая методика может быть непосредственно использована не для всех элементов конструкций сетчатых СОСТ. Целесообразно использовать данную методику для:

- сетчатых СОСТ, поверхность которых непосредственно обращена внутрь полости бака;

- дополнительных фильтрующих перегородок, которые обычно устанавливаются во внутренней полости сетчатых СОСТ.

Снижение эффективности методики возможно для случаев отсутствия непосредственного контакта поверхности СРФ с газом наддува. В частности, капиллярные каналы в СОСТ реактивной системы управления КЛА "Space Shuttle" имеют СРФ, которые обращены к стенке топливного бака (ТБ) [8]. Зазор между поверхностью СРФ и стенкой бака не превосходит нескольких миллиметров. В этом случае на динамику газовых пузырей оказывает существенное влияние близость стенки ТБ, что данной методикой не учитывается. В тоже время, конструкцией СОСТ баков реактивной системы управления КЛА "Space Shuttle" предусматривается наличие внутри соединительной трубы между наддуваемым верхним и расходным нижним отсеками специального СРФ. Этот СРФ играет роль сепарирующего элемента пузырькового фильтра, который образован внутри фланцевого соединения выходной трубы и перегородки ТБ [8]. Для расчета потерь давления в данном случае может быть использована предлагаемая методика. Вообще говоря, практически любая из ныне действующих конструкций сетчатых СОСТ имеют в своем составе элементы, для расчета работоспособности которых может быть использована разработанная методика.

Исходными данными для проведения соответствующих инженерных расчетов являются:

1. Основные геометрические размеры внутренней полости ТБ и используемого СРФ.

2. Абсолютная величина и направление вектора массового ускорения \vec{a}_m по отношению к продольной оси КЛА на момент проведения расчетов.

3. Расход топлива из бака на момент проведения расчетов Q .

4. Коэффициент опорожнения бака на момент проведения расчетов η .

5. Основные рабочие параметры используемого СРФ:

- гидравлической диаметр ячеек d_c ;
- коэффициент живого сечения СРФ f_c ;
- общая площадь сепарирующей поверхности S_c ;
- параметры для определения стационарного коэффициента гидравлического сопротивления СРФ: α и β .

6. Основные физические параметры топлива:

- плотность ρ ;
- коэффициент поверхностного натяжения σ ;
- коэффициент динамической вязкости μ ;

7. Температура топлива в баке на момент проведения расчетов T .

При известных всех указанных выше параметрах рассчитываются:

1. Средняя скорость топлива вблизи поверхности СРФ при условии отсутствия контакта его с газовой фазой

$$V = \frac{Q}{S_c} \quad (1)$$

2. Проекция действующего вектора массовой силы \vec{a}_m на нормаль к поверхности СРФ a_z . При условии если нормаль к поверхности СРФ является функцией пространственных координат необходимо разбить поверхность СРФ на участки, для которых положение нормали к поверхности можно приближенно считать постоянным.

При этом: $|a_z| = \text{const}$.

3. Максимально возможный приведенный радиус газовых включений R_p и их количество N_p с учетом коэффициента опорожнения бака η .

Здесь следует сделать некоторые комментарии. После выключения ДУ и наступления практической невесомости односвязная поверхность раздела между топливом и газом разрушается в результате действия разнонаправленных внешних силовых импульсов на ТБ. Состояние газовой фазы в условиях невесомости зависит от ее относительных размеров, времени нахождения в условиях пониженной гравитации, характера внешних силовых воздействий на корпус бака и ряда других факторов [7]. Можно определить максимально возможный устойчивый радиус газовых пузырей в полости бака R_p в зависимости от свойств жидкости, газа наддува и уровня внешних силовых воздействий.

Эта зависимость имеет вид [5]

$$R_p = \sqrt{(2,33 \sqrt{\frac{\rho}{\rho'}} - 1) \frac{\sigma}{|a|_{\max} \rho}} \quad (2)$$

где ρ' – плотность газа наддува на момент выполнения расчетов, кг/м^3 ; $|a|_{\max}$ – модуль максимального внешнего массового ускорения за время нахождения КЛА в условиях пониженной гравитации после последнего выключения ДУ, м/с^2 .

Зная величину R_p и общий объем газа в полости бака можно найти приближенное количество пузырей N_p на расчетный момент времени.

Расположение этих газовых пузырей относительно поверхности СРФ является, вообще говоря, является произвольным. Поэтому здесь необходимо рассмотреть несколько возможных ситуаций в зависимости от геометрии СРФ. Если поверхность СРФ не делится на участки, т. е. величина проекции a_z одинакова для всего СРФ, то наиболее неблагоприятной с точки зрения сепарации является равномерное распределений пузырей по поверхности СРФ. В этом случае часть относительной площади СРФ, приходящийся на один пузырь рассчитывается по формуле

$$R^* = \frac{S_c}{\pi N_p R^2} \quad (3)$$

При умови, когда СРФ разбит на несколько областей, распределение пузырей по областям СРФ, соответствующее наихудшему условию сепарации, не является столь очевидным. Для достоверного расчета максимальной величины коэффициента перекрытия СРФ газом необходимо перебрать все возможные ситуации распределения газовых пузырей по выделенным областям СРФ и выполнить соответствующие расчеты. Отметим, что при условии неравномерного распределения газовых пузырей по областям, значения параметра R^* будет различным в каждом выделенном участке СРФ.

4. Рассчитать для каждого участка СРФ (если их несколько):

– число Фруда – $Fr = \frac{V^2}{R_p a_z} ;$

– число Архимеда – $Ar = \frac{R_p^2 a_z \rho}{\mu V} ;$

– капиллярное число – $Ca = \frac{\mu V}{\sigma} .$

На основании полученных расчетов определить, пользуясь критерием отсутствия контакта пузырей с поверхностью СРФ [6]

$$\left\{ \begin{array}{l} Ar \geq 4,5, \text{ если } R_p \leq 0,05 \text{ мм;} \\ Ar \geq 9,0, \text{ если } 0,05 \text{ мм} \leq R_p \leq \sqrt{\frac{\sigma}{16\rho a_z}} ; \\ CaFr \geq 0,09, \text{ если } \sqrt{\frac{\sigma}{16\rho a_z}} \leq R_p. \end{array} \right. \quad (4)$$

вероятность отсутствия такого контакта. При отсутствии контакта следует считать, что коэффициент перекрытия поверхности СРФ газовой фазой в расчетной области равен нулю.

5. При наличии контакта пузыря с СРФ, т.е. при невыполнении критериальной зависимости (4), рассчитать:

– число Вебера – $We = \frac{\rho V^2 d_c}{2\sigma} ;$

– число Бонда – $Bo = \frac{a_z \rho R_p^2}{\sigma} .$

6. Рассчитать коэффициент деформации пузырей z^* на выбранном участке СРФ путем численного решения уравнения [4]

$$2N_p (z^*)^2 - (N_p z^*)^{1/2} - \frac{(z^*)^{-5/2}}{\sqrt{N_p}} + Boz^* + We \frac{(R^* z^*)^4}{((R^* z^*)^2 - 1)^2} = 0, \quad (5)$$

где $z^* = z/R_p$; z – длина полуоси деформированного пузыря в направлении перпендикулярном поверхности СРФ, м.

Уравнение (5) решается для каждого участка СРФ, если там происходит контакт пузыря с сетчатой поверхностью. При решении уравнения (5) необходимо определить влияние на величину деформации пузырей степени их дробления на части (параметр N_p). Значение N_p зависит от степени опорожнения бака на момент проведения расчетов η и среднего радиуса пузырей R_p , максимально возможное значение которого определяется из уравнения (2). На этом этапе расчета определяется максимальная величина коэффициента перекрытия СРФ газовой фазой $(f_{п})_{\max}$ в выбранной части СРФ (если их несколько) по формуле

$$\sup(f_{п})_{\max} = \sup \frac{\sqrt[3]{N_p}}{z^* (R^*)^2}, \text{ при } \forall N_p \in [1, N_{\max}], \quad (6)$$

где N_{\max} – максимально возможное количество пузырей в баке на расчетный момент времени.

Аналогичные расчеты коэффициента перекрытия СРФ газом проводятся во всех областях, где вероятен контакт СРФ с газовой фазой. После этого определяется общий максимально возможный коэффициент перекрытия поверхности СРФ газовой фазой по формуле

$$F = \sum_{i=1}^M \frac{S_i}{S_c} ((f_{п})_{\max})_i, \quad (7)$$

где S_i – площадь поверхности i -той части СРФ, m^2 ; $((f_{п})_{\max})_i$ – рассчитанное максимальное значение коэффициента перекрытия поверхности i -той части СРФ газом наддува; M – количество расчетных областей СРФ.

После определения коэффициента F при всевозможных вариантах распределения газовых пузырей между M расчетными областями СРФ выбирается максимальное значение F_{\max} из всех рассчитанных F . Далее, с учетом полученного значения F_{\max} , определяется максимально возможный перепад давлений на СРФ $(\Delta p_c)_{\max}$ за счет гидравлического сопротивления по формуле [1]

$$(\Delta p_c)_{\max} = \frac{\alpha \rho (V^*)^2}{2} + \frac{\beta \mu V^*}{2d_c}. \quad (8)$$

При этом в уравнении (8) максимальная средняя скорость движения топлива в ячейках СРФ в расчетный момент времени определяется как

$$V^* = \frac{Q}{f_c (1 - F_{\max})}. \quad (9)$$

После проведения необходимых оценок всех остальных составляющие общего перепада давлений на СРФ [1], выполняется сравнение полученного

общего перепада давлений $\Delta p_{об}$ в расчетный момент времени с удерживающей способностью СРФ Δp_{max} . При выполнении неравенства

$$\Delta p_{max} \geq k \Delta p_{об}, \quad (10)$$

делается заключение о работоспособности сетчатого СОСТ.

Коэффициент запаса работоспособности k , входящий в неравенство (10), не превосходит обычно $1,3 \div 1,5$ [1].

При условии нарушения неравенства (10) следует принять меры, снижающие величину $\Delta p_{об}$ прежде всего за счет снижения Δp_c . Этого возможно достичь:

- увеличением общей площади рабочей поверхности СРФ S_c ;
- изменением внутренней геометрии СРФ, с целью достижения минимального перекрытия поверхности СРФ газовой фазой;
- снижением уровня дискретизации газовой фазы и общей площади контакта ее с СРФ за счет дополнительного массового ускорения.

Выводы

Представленная в данной работе методика позволяет провести оценку перепада давления на СРФ за счет движения через них топлива на различных этапах опорожнения ТБ КЛА в зависимости от степени дробления газовой полости на части.

Выполнение инженерных расчетов по предлагаемой методике позволяет достаточно точно рассчитать потери давления на СРФ в любой момент времени полета КЛА. При этом возникает возможность научно обоснованной замены одного типа СРФ на другой, с более низким уровнем удерживающей способности. Такая замена приводит, в конечном счете, к совершенствованию всей системы подачи топлива КЛА.

Необходимо отметить, что данная методика не учитывает эффекты взаимного влияния газовых пузырей друг на друга, что в определенных условиях может оказывать влияние на значение коэффициента перекрытия газовой фазой поверхности СРФ.

Представленная в работе методика может использоваться в инженерной практике при разработке новых КЛА многоцелевого назначения на этапе эскизного проектирования для оптимизации конструкций СОСТ сетчатого типа и всей системы подачи топлива.

Список литературы

1. Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов [Текст] / В.В. Багров, А.В. Курпатенков, В.М. Поляев и др.; под ред. В. М. Поляева. – М.: УНПЦ «ЭНЕРГОМАШ», 1997. – 328 с.
2. Горелова К.В. Моделирование динамики топлива в баках летательных аппаратов с учетом сетчатых фазоразделителей [Текст] / К.В. Горелова. // Вісник Дніпропетровського університету: серія “Механіка”. – 2013. – Вип. 17, Т. 1. – С. 147–155.
3. Давыдов С.А. Расчет снижения удерживающей способности средств обеспечения сплошности топлива при его движении вдоль поверхности раздела фаз [Текст] / С.А. Давыдов // Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Збірник наукових праць. Нові рішення в сучасних технологіях. – 2010 – № 57 – С. 96–100.
4. Давыдова А.В. Деформация газовой полости на поверхности сетчатого разделителя фаз в жидкостном потоке [Текст] / А.В. Давыдова // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: Зб. наук. праць. – Дн-ськ, 2000. – Вип. II. – С. 93 – 97.
5. Кутателадзе С.С. Гидродинамика газо-жидкостных систем [Текст] / С.С. Кутателадзе, М.Н. Стырикович – М.: Энергия, 1976. – 296 с.
6. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика [Текст] / В.Г. Левич – М.: Изд-во АН СССР, 1952. – 537с.
7. Der J.J. Liquid propellant tank ullage bubble deformation and breakup in low gravity reorientation / J.J. Der, C.L. Stevens // AIAA Paper. – 1987. – № 2021. – 12 p.
8. Fester D.A. Surface tension propellant acquisition system technology for Space Shuttle reaction control tanks / D.A. Fester D.A., A.D. Villars, P.E. Uney // AIAA Paper. – 1975. – № 1196. – 7 p.
9. Tegart J.R. Effect of vibration on retention characteristics of screen acquisition systems [Text] / J.R. Tegart, A.C. Park. // NASA CR № 135264. – 1977. – 165 p.

Поступила в редакцию 30.04.2015

Рецензент: д-р. техн. наук, проф. Н.М. Дронь, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Днепропетровск.

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПЕРЕПАДУ ТИСКУ НА СІТЧАСТИХ ЗАСОБАХ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СУЦІЛЬНОСТІ ПАЛИВА В УМОВАХ ЇХ ОБМЕЖЕНОГО КОНТАКТУ З ГАЗОВОЮ ФАЗОЮ

А.В. Давидова

Пропонується методика розрахунку перепаду тиску у потоці рідкого ракетного палива при його проходженні скрізь сітчасті засоби забезпечення суцільності палива при їх частковому контакті з газовою фазою в умовах дії змінного поля масових сил

Ключові слова: рідке ракетне паливо, невагомість, сітчасті засоби забезпечення суцільності, газ наддуву.

THE METHOD OF CALCULATION OF PRESSURE DROP ON THE NET CONTINUITY ENSURING MEANS OF FUELS IN TERMS OF THEIR LIMITED CONTACT WITH THE GASEOUS PHASE

A.V. Davydova

The method of calculation the pressure drop in the flow of liquid rocket fuel have been proposed when it passes through the mesh continuity ensuring means of the fuel at partial contact with the gaseous phase under the action of the alternating field of mass forces

Keywords: liquid rocket fuel, mass, and mesh continuity ensuring means, the pressurization gas.