

УДК 532.593:541.24

А.В. Давыдова, Е.Е. Лысенко

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЙ НА СЕТЧАТЫХ РАЗДЕЛИТЕЛЯХ ФАЗ В НЕСТАЦИОНАРНОМ ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ

У роботі представлений опис методики розрахунку перепаду тисків на сітчастих роздільниках фаз в умовах істотно нестационарного рідинного потоку, що протікає через них

Ключові слова: космічний літальний апарат, сітчастий розподільувач фаз, гідравлічний опір

В работе представлено описание методики расчета перепада давлений на сетчатых разделителях фаз в условиях существенно нестационарного жидкостного потока, протекающего через них

Ключевые слова: космический летательный аппарат, сетчатый фазовый разделитель, гидравлическое сопротивление

In work the description of a design procedure of difference of pressure on mesh dividers of phases in the conditions of essentially non-stationary liquid stream proceeding through them is presented

Key words: space vehicles, mesh phase divider, hydraulic resistance

Одним из наиболее существенных недостатков применения тканых металлических сеток в качестве разделителей фаз является наличие у них значительного гидравлического сопротивления (ГС). При уменьшении ячеек сетки ее ГС увеличивается. В тоже время, удерживающая способность сетчатого разделителя фаз (СРФ) тем выше, чем меньше его ячейки. Условия полета космического летательного аппарата (КЛА) предполагают многократный запуск и выключение его двигательной установки (ДУ). На этапах выхода ДУ на заданный режим работы течение топлива через СРФ является существенно нестационарным. Кроме того, не исключена ситуация блокировки некоторой части поверхности СРФ газовой фазой в топливном баке. В этих условиях жидкость поступает в сливную магистраль только через часть поверхности СРФ полностью погруженную в топливо. При этом для обеспечения ДУ необходимым количеством топлива его расход через смоченную часть СРФ повышается. По указанным причинам текущий перепад давления на СРФ может достигнуть такой величины, при которой либо происходит прорыв газовой фазы через СРФ, либо наступает механическое

© А.В. Давыдова, Е.Е. Лысенко, 2014

разрушение сетчатого материала. Это неизбежно влечет за собой прорыв газа в сливную магистраль и срыв запуска ДУ.

Исследованиям нестационарных гидродинамических процессов посвящено значительное количество работ [1,4,5,6]. Однако, в них рассматривается нестационарное обтекание тел относительно простой геометрии (осесимметричные каналы, диафрагмы, щели). Сетчатые разделители фаз обладают сложной пространственной структурой и поэтому нельзя использовать непосредственно результаты указанных работ в данном случае. В наиболее полном виде гидродинамика нестационарных процессов представлена в [5]. Однако основное внимание в этой работе при проведении теоретических и экспериментальных исследований уделялось колебательным движениям жидкости в осесимметричных трубах.

Настоящая работа посвящена скачкообразным изменениям расхода жидкости, вызванные запуском ДУ, которые имеют импульсный характер. На рис. 1 представлен график изменения массового расхода окислителя и горючего при запуске маршевого двигателя КЛА "Аgena" [7]. Длительность выхода массового расхода на расчетный режим по окислителю около 0,4 с, а по горючему - 0,2 с. При условии полного погружения СРФ в топливо среднее ускорение окислителя на указанном промежутке $\approx 0,41 \text{ м/с}^2$. Соответствующее ускорение горючего $\approx 0,71 \text{ м/с}^2$. Отметим, что указанные уровни ускорений потока топлива являются минимально возможными. При частичном погружении СРФ в топливо площадь проходного сечения СРФ уменьшается и градиенты скоростей на этапе запуска ДУ возрастают.

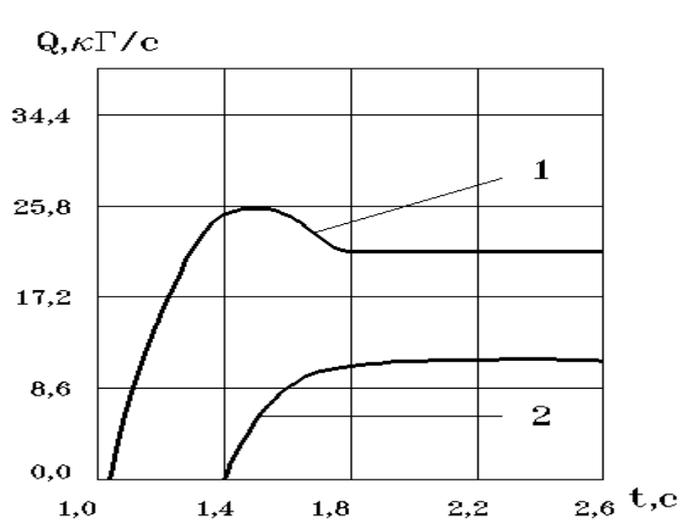


Рис. 1. Изменение массового расхода топлива при запуске маршевого двигателя КЛА "Аgena" [7]:

- 1- окислитель - азотная кислота;
- 2- горючее - несимметричный диметилгидразин.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований [2] свидетельствуют о том, что высокие градиенты расхода при сливе топлива из

баков КЛА могут приводить к значительному увеличению перепада давлений на СРФ. На этапе проектирования соответствующих устройств необходимо проводить оценку нестационарной составляющей ГС потока топлива при движении через СРФ.

Прорыв газовой фазы через СРФ за счет кратковременного (порядка 0,05 с) повышения на нем текущего перепада давления возможен [9], но мало вероятен. Большую опасность представляет собой кратковременное силовое воздействие на СРФ протекающего через него топлива. При определенном уровне силовых воздействий и нерасчетных проектных параметрах СФР может произойти неупругая деформация сетчатых элементов, вплоть до их механического повреждения. Поэтому при проектировании СФР необходима инженерная методика расчета динамических воздействий на его силовую конструкцию с учетом реальной геометрии СФР.

Для придания необходимой жесткости конструкции СРФ размещается на жесткой металлической опоре, к которой он обычно прикрепляется с помощью точечной сварки [8]. Эта опора имеет специальные “окна” размером порядка несколько сантиметров, через которые происходит движение топлива. Для оценки работоспособности всей системы подачи топлива КЛА необходимо, прежде всего, знать текущие перепады давлений на СРФ за счет протекания через них потока топлива на протяжении всего полетного задания. Расчет этих перепадов давления в условиях ускорения протекающего топлива, характерных для запуска ДУ, предлагается выполнять по методике, представленной ниже.

Для проведения необходимых инженерных расчетов необходимо знать следующие исходные параметры:

1. Площадь поверхности СРФ, доступная для прохождения через него топлива на расчетный момент времени S_c и площадь поверхности “окон” силовой опоры, в которых размещается СРФ, S_o .

2. Начальное Q_n и конечное Q_k значения расхода топлива из бака при проведении расчетов.

3. Время изменения расхода от начального до конечного, Δt .

4. Основные рабочие параметры СРФ:

- тип плетения;
- гидравлической диаметр ячеек - d_j ;
- коэффициент живого сечения - f_v ;
- толщина - b ;
- параметры для определения коэффициента ГС - α , β , γ и λ .

5. Основные физические параметры топлива:

- плотность ρ ;
- коэффициент кинематической вязкости ν ;

6. Температура топлива на момент проведения расчетов T .

При известных всех указанных выше параметрах рассчитываются:

1. Средняя скорость движения жидкости через СРФ в начальный момент времени - $V_H = \frac{Q_H}{S_c}$.

2. Средняя скорость движения жидкости через СРФ в конце расчетного промежутка времени - $V_K = \frac{Q_K}{S_c}$.

3. Среднее ускорение жидкостного потока на расчетном промежутке времени Δt : $A = \frac{(V_K - V_H)}{\Delta t}$.

Далее выделяется отдельное силовое окно и полагается, что гидродинамические процессы на остальных участках СРФ будут идентичными. Сетчатый разделитель фаз жестко закреплен в этом окне по его периметру. Через СРФ двигается жидкость со средней скоростью $V(t)$, которая меняется на протяжении времени $\Delta t=[t_n;t_k]$ от значения V_H до значения V_K . Стационарная составляющая перепада давлений на СРФ Δp_c рассчитывается по формуле [3]

$$\Delta p_c = \left(\alpha + \frac{\beta}{\text{Re}}\right) \frac{\rho V^2}{2}, \quad (1)$$

где α, β – эмпирические постоянные, зависящие от типа плетения СРФ [8];

$$\text{Re} = \frac{V d_{\text{я}}}{\nu} - \text{число Рейнольдса};$$

$V(t)$ – текущая средняя скорость потока топлива через СРФ на промежутке времени $\Delta t=[t_n;t_k]$.

Нестационарная составляющая перепада давлений на СРФ Δp_H рассчитывается по формуле [2]

$$\Delta p_H = \frac{\gamma}{\text{Fr}^\lambda} \frac{\rho V^2}{2}, \quad (2)$$

где γ, λ – эмпирические постоянные, зависящие от типа плетения СРФ [8];

$$\text{Fr} = \frac{V^2}{A d_{\text{я}}} - \text{число Фруда}.$$

Далее определяется общее текущее значение перепада давлений на СРФ Δp на этапе запуска ДУ и выхода значения средней скорости потока на номинальный режим

$$\Delta p = \Delta p_c + \Delta p_H. \quad (3)$$

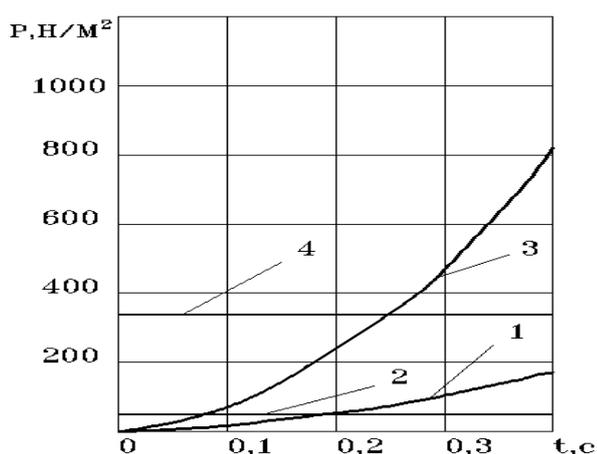
Результаты расчетов $\Delta p(t)$ используются в дальнейшем для оценки работоспособности СРФ на этапе запуска ДУ КЛА.

Для иллюстрации ошибок, к которым может привести неучет нестационарности потока топлива, на рис. 2 представлены результаты расчета потерь давления на СРФ в квазистационарном и в равноускоренном потоке с использованием представленной выше расчетной методики. Для расчетов использовалось два типа СРФ, основные параметры которых вместе со значениями эмпирических постоянных из формул (1)-(2), приведены в табл. 1. В качестве рабочей жидкости рассматривался азотный тетраоксид, плотность которого $\rho=1447\text{кг/м}^3$, а кинематическая вязкость $\nu=0,292\cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$. Температура жидкости на момент проведения расчетов $T = 20^0\text{С}$. При проведении расчетов предполагалось, что скорость протекания жидкости через ячейки СРФ линейно возрастает от начального значения $V_H=0\text{ м/с}$ до конечного значения $V_K=1,08\text{ м/с}$ (кривые 1 и 2) и до 2,6 м/с (кривые 3 и 4).

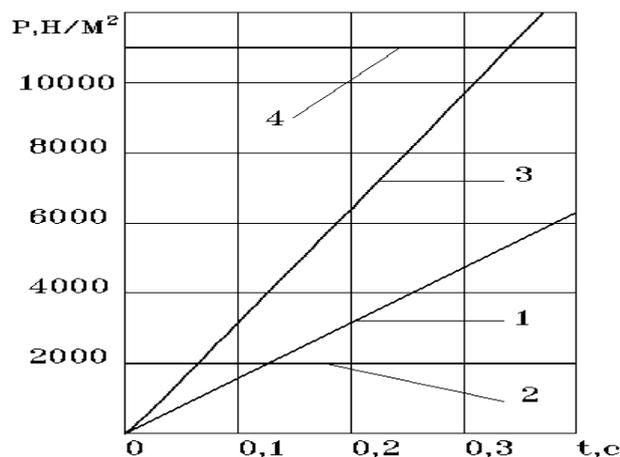
Таблица 1

Значения рабочих параметров СРФ и эмпирических постоянных, которые использовались при расчетах

№ СРФ	Тип плетения СРФ	Эмпирические постоянные		Коеф. живого сечения f_v	Приведен. диаметр ячейки d_j , мкм	Толщина СРФ b , мкм
		α/β	γ/λ			
1	полотняное	0,4/4,9	4000/1	0,338	48,5	72
2	фильтровое	8,9/392	3400/0,6	0,388	39,0	128



а)



б)

Рис.2. Перепад давления на сетчатом разделителе фаз при ускоренном движении жидкости:

а) СРФ № 1: 1 - без учета нестационарности потока, ускорение $2,7\text{ м/с}^2$; 2 - нестационарная добавка при ускорении $2,7\text{ м/с}^2$; 3 - без учета нестационарности потока, ускорение $6,5\text{ м/с}^2$; 4 - нестационарная добавка при ускорении $6,5\text{ м/с}^2$.

б) СРФ № 2: 1 - без учета нестационарности потока, ускорение $3,0 \text{ м/с}^2$; 2 - нестационарная добавка при ускорении $3,0 \text{ м/с}^2$; 3 - без учета нестационарности потока, ускорение $6,2 \text{ м/с}^2$; 4 - нестационарная добавка при ускорении $6,2 \text{ м/с}^2$.

Как видно из графиков рис. 2, нестационарная составляющая перепада давлений при равноускоренном движении топлива не зависит от времени, а определяется только типом СРФ и уровнем действующего ускорения (кривые 2 и 4). В тоже время, квазистационарная составляющая перепада давлений на СРФ растет по мере увеличения средней скорости жидкости (кривые 1 и 3). Начиная с определенного момента времени, квазистационарная составляющая становится доминирующей. Следовательно, при достаточно высоких уровнях расхода влияние нестационарности движения топлива на перепад давлений на СРФ можно не учитывать. В тоже время, при запусках ДУ, когда расход начинает расти от нулевого значения, этого делать не следует.

В заключение отметим, что в уравнения (1) – (2) входят 4 эмпирические постоянные, значения которых могут быть достоверно определены путем проведения соответствующих экспериментальных исследований. Их величина существенно зависит от типа плетения СРФ, материала, уровня загрязнения ячеек СРФ и ряда других факторов. В тоже время, для приближенной оценки текущего перепада давлений на СРФ вполне допустимо использовать значения эмпирических постоянных, которые приведены в табл. 1. Использование для расчета перепада давлений на СРФ зависимости (1) для стационарного потока может привести к ошибкам в выборе проектных параметров СРФ, режим работы которых в системе подачи топлива КЛА предполагает высокие градиенты расхода топлива из бака.

Библиографические ссылки

1. **Громека И.С.** К теории движения жидкости в узких цилиндрических трубках / Громека И.С. - М.: Изд-во АН СССР, 1952, С. 149 - 171.
2. **Давыдова А.В.** Расчет деформации сетчатых элементов средств обеспечения сплошности топлива на переходных этапах работы двигателя / А.В. Давыдова // Космическая техника. Ракетное вооружение: Зб. наук. праць. - Дніпропетровськ, 2012. - Вып. 1, стр. 235-242.
3. **Идельчик И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Идельчик И.Е. – М.: Машиностроение, 1975.– 559с.
4. **Лойцянский Л.Г.** Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов / Лойцянский Л.Г. – М.: Наука, 1987. – 840с.
5. **Попов Д.Н.** Нестационарные гидромеханические процессы / Попов Д.Н. – М.: Машиностроение, 1982. - 240с.
6. **Слезкин Н.А.** Динамика вязкой несжимаемой жидкости / Слезкин Н.А. – М.: Гостехиздат, 1955. - 520с.
7. **DeBrok S.C.** Agena primary and integrated secondary propulsion system / S.C. DeBrok, C.J. Rudey // AIAA Paper. – 1973.- № 1212. - 15p.

8. **Tegart J.R.** Effect of vibration on retention characteristics of screen acquisition systems/ J.R. Tegart , A.C. Park //NASA CR № 135264.–1977.–165 p.

9. **Tegart J.R.** Influence of pressure transients on the performance of capillary propellant acquisition systems / J.R. Tegart // AIAA Paper. – 1976. – № 597. – 8 p.

Надійшла до редколегії 3.06.2014