

УДК 621.454.2.046.2

О. М. Иванов, Д. Э. Смоленский

МЕТОД РАСЧЕТА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОЛЬЦЕВОГО ЗАБОРНОГО УСТРОЙСТВА НА ПРЕДЕЛЬНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Приведены расчетно-экспериментальные данные гидравлических параметров кольцевого заборного устройства на различных режимах работы. Предложен метод их расчета с учетом предельных отклонений влияющих факторов. Показана удовлетворительная сходимость расчетных и экспериментальных данных.

Наведено розрахунково-експериментальні дані гідрравлічних параметрів кільцевого заборного пристрою на різних режимах роботи. Запропоновано метод їх розрахунку з урахуванням граничних відхилень впливальних факторів. Показано задовільну збіжність розрахункових і експериментальних даних.

The paper presents the experiment-calculated data on hydraulic parameters of ring intake device in different operation modes. The method of their calculation is proposed taking into account limit deviations of influencing factors. Satisfactory convergence of calculated and experiment data is shown.

Введение

Реальные условия работы двигательной установки ракет-носителей часто не соответствуют расчетным. Полет ракеты происходит под воздействием различных возмущающих факторов – отклонений от номинальных расчетных условий. Одним из многих факторов, составляющих предельные отклонения гидравлического остатка и падения давления, является допускаемое отклонение расходов на двигательную установку.

Гидравлический остаток компонентов топлива – это количество топлива в системе питания двигательной установки, которое не может быть выработано на момент подачи команды на выключение двигателей из-за предъявляемых требований к сплошности топлива.

Предельные отклонения падения давления в трактах питания компонентами топлива двигательной установки используются при расчете давления наддува баков.

Двигательные установки могут состоять как из одного, так и из нескольких двигателей, каждый из которых имеет свой турбо-насосный агрегат. Подача компонента на двигателя может осуществляться по одной магистрали, которая имеет разветвление на каждый двигатель в нижней части, или по отдельным магистралям.

В полете может реализоваться случай, когда отклонения расхода какого-либо компонента на каждый двигатель будут различаться в допускаемых пределах.

Описание заборного устройства

В статье рассмотрено влияние разности расходов в двигателях на отклонения гидравлического остатка и падения давления на примере заборного устройства кольцевого типа с напорным желобом и двумя расходными магистралями. Конструктивная схема заборного устройства приведена на рис. 1.

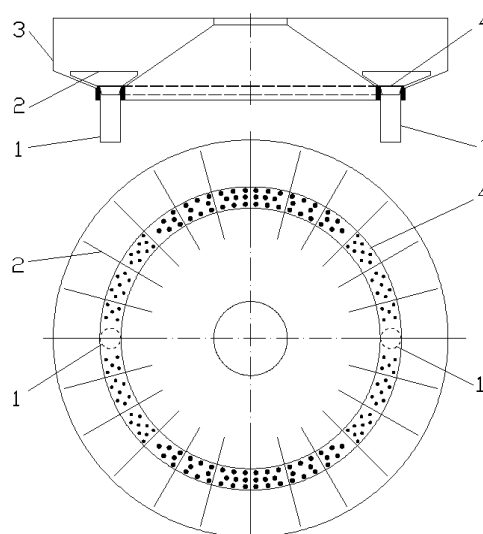


Рис. 1. Конструктивная схема заборного устройства:

1 – расходные магистрали; 2 – радиальные ребра;

3 – бак; 4 – пластина со сливными отверстиями

Напорный желоб представляет собой гидравлический лоток постоянного сечения, закрытый пластиной со сливными отверстиями. Компонент под давлением поступает в желоб через сливные отверстия, а из желоба – в расходные магистрали. Отверстия, распределенные специальным образом вдоль желоба, обеспечивают равномерную выработку компонента из бака и минимизируют гидравлический остаток.

Над сливной пластиной установлены радиальные ребра для уменьшения гидравлического остатка при отклонениях поверхности жидкости от горизонтального положения. Радиальные ребра делят пластину на сектора.

Результаты экспериментальных работ

Исследование основано на экспериментальных результатах. Экспериментальные работы проводились на опытной конструкции, которая представляла собой полномасштабную модель нижнего днища бака с расходными магистралями. В испытаниях решались следующие задачи: уточнение распределения отверстий, обеспечивающего равномерную выработку топлива, определение гидравлического остатка и падения давления. Измерения гидравлического остатка и падения давления проводились после уточнения распределения отверстий.

Метод измерения гидравлического остатка заключался в следующем. В результате гидродинамического провала уровня над сливными отверстиями газ попадал под пластину в желоб, уносился потоком в расходные магистрали и попадал в датчики сплошности, которые были установлены на выходах из магистралей. Принцип работы датчика сплошности основан на изменении проводимости рабочей жидкости в зависимости от содержания свободных пузырьков в ней. В момент поступления газожидкостной смеси в датчик сплошности менялось напряжение на его выходе. По этому сигналу переключался стендовый клапан – и рабочая жидкость направлялась в мерную емкость. В качестве рабочей жидкости использовали воду. Объем воды в мерной емкости за вычетом объемов стен-

довых трубопроводов между датчиком сплошности и емкостью и воды, протекающей в клапане за время переключения, считался гидравлическим остатком.

Потери давления в трактах питания измерялись датчиками перепада давления.

Методы измерения гидравлического остатка и потерь давления, экспериментальный стенд, принцип измерения сплошности подробно описаны в [1 – 3].

Гидравлический остаток для номинального режима работы двигательной установки хорошо описан зависимостью

$$V_r(Q) = 71,752 \cdot Q^{0,2546}, \quad (1)$$

где Q – расход через одну магистраль, $\text{дм}^3/\text{с}$.

Режим с предельными отклонениями расходов моделировался различными расходами по каждой магистрали опытной конструкции: в первой магистрали $\approx 108 \text{ дм}^3/\text{с}$, во второй – $\approx 78 \text{ дм}^3/\text{с}$. Затем расходы менялись и испытания повторялись. Суммарный расход из бака оставался постоянным.

На рис. 2 приведены результаты испытаний по определению гидравлического остатка. На оси абсцисс обозначен расход рабочей жидкости в первой магистрали, на оси ординат – гидравлический остаток в системе.

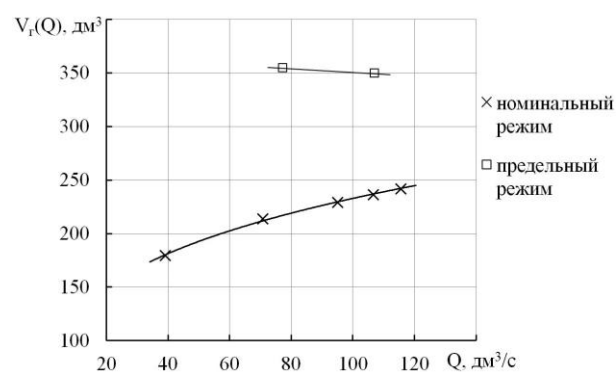


Рис. 2. Экспериментальные значения гидравлического остатка

Как видно из рис. 2, гидравлический остаток при работе двигателей на предельных режимах превышает гидравлический остаток для номинального режима на 120-160 дм^3 . Его значение не зависит от того, в

какой магистрали расход был больше, а в какой меньше.

Описание метода расчета

Увеличение гидравлического остатка можно объяснить следующим образом.

Распределение отверстий обеспечивает равномерную и, следовательно, одновременную выработку компонента из секторов на номинальном режиме. Когда расходы в магистралях различны, время выработки компонента из секторов будет обратно пропорционально расходам.

Для математического описания разделим бак условно на две одинаковые части. Для определенности обозначим расход из первой части Q_1 , а из второй – Q_2 и $Q_1 > Q_2$. Тогда остаток в баке будет состоять из гидравлического остатка в первой части и остатка компонента во второй части в момент нарушения сплошности на выходе из первой магистрали. Учитывая равномерную выработку компонента из бака в номинальных условиях, гидравлический остаток в первой части можно считать равным половине гидравлического остатка, рассчитанного по формуле (1). Математически это можно записать формулой

$$V_{\text{ост}} = \frac{V_r(Q_1)}{2} + \frac{V_0}{2} - Q_2 \cdot \tau, \quad (2)$$

где V_0 – объем в системе питания, дм^3 ; τ – время слива, с.

где ΔQ_1 , ΔQ_2 – погрешности измерения расходов; ΔV_0 – погрешность тарировки опытной конструкции.

Погрешность измерения расходов составила 1,1% измеряемой величины, погрешность тарировки бака – 0,3% текущего объема компонента в баке. Суммарная погрешность составляет 8 дм^3 . Расчетное значение остатка – $326 \pm 8 \text{ дм}^3$.

Время слива определяется по зависимости

$$\tau = \frac{V_0 - V_r(Q_1)}{2Q_1}. \quad (3)$$

Подставим (3) в (2) и преобразуем к следующему виду:

$$V_{\text{ост}} = \frac{V_r(Q_1)}{2} \cdot \left(1 + \frac{Q_2}{Q_1}\right) + \frac{V_0}{2} \cdot \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right). \quad (4)$$

При равных расходах зависимость (4) дает значения гидравлического остатка в соответствии с (1).

Результаты расчета

Рассчитаем остаток по зависимости (4) и сравним его с результатами эксперимента. Средние значения расходов по всем испытаниям в данной серии составили $Q_1 = 107,5 \text{ дм}^3/\text{с}$, $Q_2 = 77,5 \text{ дм}^3/\text{с}$. Объем в системе питания равен сумме объемов компонента в баке на высоте радиальных ребер 828 дм^3 и расходных магистралей $53,4 \text{ дм}^3$ – $V_0 = 881,4 \text{ дм}^3$. Расчет по формуле (4) дает значение 326 дм^3 .

Для сравнения с результатами испытаний нужно учитывать погрешность экспериментального определения остатка и погрешности величин, входящих в зависимость (4).

Погрешность экспериментального определения остатка составляет 5,4% измеренной величины.

Погрешность расчета остатка определим по зависимости

$$\Delta V_{\text{ост}} = \sqrt{\left(\frac{\partial V_{\text{ост}}}{\partial Q_1} \cdot \Delta Q_1\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{\text{ост}}}{\partial Q_2} \cdot \Delta Q_2\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{\text{ост}}}{\partial V_0} \cdot \Delta V_0\right)^2},$$

Испытания дают следующие результаты. При расходах $Q_1 = 107,5 \text{ дм}^3/\text{с}$, $Q_2 = 77,5 \text{ дм}^3/\text{с}$ среднее значение гидравлического остатка в системе питания с учетом погрешности равно $354 \pm 19 \text{ дм}^3$.

Разность между расчетным значением гидравлического остатка по формуле (4) и экспериментальным значением составляет $28 \pm 21 \text{ дм}^3$. Формула (4) удовлетворительно описывает результаты испытаний и может быть рекомендована для применения в рас-

четах отклонения гидравлического остатка в системах питания двигательных установок с несколькими двигателями для кольцевых заборных устройств с напорным желобом и радиальными ребрами.

Коэффициент падения давления тракта питания рассчитывался по зависимости

$$\zeta = \frac{2p_{\text{изм}}}{\rho w^2},$$

где $p_{\text{изм}}$ – измеренное значение падения давления в испытаниях, Па; ρ – плотность рабочей жидкости, кг/м³; w – скорость течения рабочей жидкости в магистрали, м/с.

На рис. 3 показаны экспериментальные значения коэффициента падения давления.

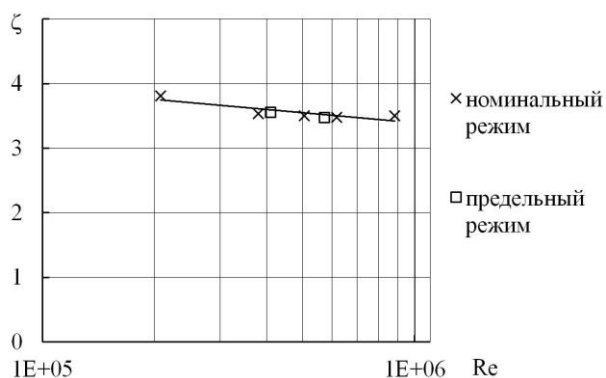


Рис. 3. Экспериментальные значения коэффициента падения давления

Как и следовало ожидать, коэффициент падения давления не зависит от разности расходов в магистралях в исследованном диапазоне чисел Рейнольдса.

Выводы

Представленный метод позволяет рассчитать отклонение гидравлического остатка в системах питания двигательных установок, вызванное допускаемыми отклонениями расхода на двигатели. Как видно из формулы (4), отклонение гидравлического остатка зависит от разности расходов на каждый двигатель и высоты радиальных ребер. Так как радиальные ребра устанавли-

вают для уменьшения номинального значения гидравлического остатка, то необходимо, чтобы их высота позволяла минимизировать номинальное значение гидравлического остатка при приемлемом его отклонении. Оптимальная высота ребер зависит от параметров двигательной установки, конфигурации нижнего днища и подлежит дальнейшему исследованию.

Таким образом, разработан уточненный метод расчета отклонений гидравлического остатка для кольцевого заборного устройства, позволяющий учесть предельные отклонения расходов на двигатели и увеличить надежность ракеты в целом.

Список использованной литературы

1. Ильин Г. И., Демченко С. А., Смоленский Д. Э. Экспериментальное исследование заборного устройства тороидального бака на высокорасходном проливочном стенде// Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – 2013. – Вып. 1. – Днепропетровск: ГП "КБ "Южное". – С. 54–59.
2. Василина В. Г. и др. Автономная экспериментальная отработка агрегатов и систем пневмогидросистемы подачи ЖРДУ: Учеб. пособие /В. Г. Василина, Г. И. Ильин, В. Ф. Несвит, В. И. Перлик. – Харьков: ХАИ, 2005. – 130 с.
3. Волошина М. А. и др. К вопросу измерения несплошности потока жидкости при экспериментальной отработке заборных устройств топливных баков летательных аппаратов// Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – 2010. – Вып. 2. – Днепропетровск: ГП "КБ "Южное". – С. 122–135.

Статья поступила 02.08.2017