

Канд. техн. наук Г.И. Ильин

## К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАБОРНЫХ УСТРОЙСТВ ТОРОИДАЛЬНЫХ БАКОВ С ЖЕЛОБОМ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

*На основе гидравлики жидкости переменной массы получены аналитические зависимости для определения изменения пьезометрического давления и закона распределения отверстий по длине кольцевого желоба переменного сечения заборного устройства тороидального бака с одним отбором к турбонасосному агрегату.*

*На основі гідравліки рідини змінної маси одержано аналітичні залежності для визначення зміни п'єзометричного тиску і закону розподілу отворів по довжині кільцевого жолоба змінного перерізу забірної пристрою тороїдного бака з одним відбором до турбонасосного агрегату.*

*Based on the variable-mass liquid hydraulics, analytic relationships were obtained to define piezometric pressure change and a law of hole distribution along a variable-section ring groove of a toroidal tank intake with one intake to a turbopump.*

Широкое применение в ракетно-космической технике находят тороидальные баки, что обусловлено, в основном, стремлением к более плотной компоновке ракеты, уменьшению ее продольного размера и обеспечению необходимой центровки.

При проектировании заборных устройств подобных баков основной задачей является выбор такого варианта их конструкции, который обеспечивал бы максимальную выработку компонентов топлива из баков и, соответственно, минимальные гидравлические остатки при допустимых потерях давления и приемлемом весе конструкции заборных устройств.

Одним из главных требований, предъявляемых к подобным устройствам, является обеспечение равномерности опускания уровня жидкости в баке при работе двигательной установки. Неравномерность опускания уровня приводит к преждевременному прорыву газа в расходную магистраль и увеличению гидравлических остатков, а также является причиной нежелательных круговых движений жидкости в баке. Наиболее распространенным вариантом заборного устройства тороидального бака является установка кольцевого желоба, пол-

ностью охватывающего днище бака (рис. 1). Жидкость из бака 1 поступает в желоб 2 через расходные отверстия 3 в верхней стенке. Характер распределения отверстий по длине желоба должен выбираться из условия обеспечения равномерности опускания уровня жидкости в баке. Отбор компонента топлива к турбонасосному агрегату (ТНА) проводится в одной точке желоба (сеч. I-I) с помощью магистрали 4, которая герметично крепится к нижней части желоба. Желоб может быть как постоянного, так и переменного сечения.

Дальше по тексту рассматривается заборное устройство тороидального бака с кольцевым желобом переменного по длине сечения. Площадь поперечного сечения желоба в этом варианте изменяется по определенному закону и имеет минимальное значение в сеч. 0-0 (рис. 1), а максимальное в сеч. I-I (место отбора жидкости к ТНА).

В рассматриваемом варианте заборного устройства течение жидкости в желобе с увеличивающимся вдоль пути расходом является частным случаем более общего неустановившегося движения жидкости с переменным расходом вдоль пути. Основные закономерности этого движения отражены в работах [1-5].

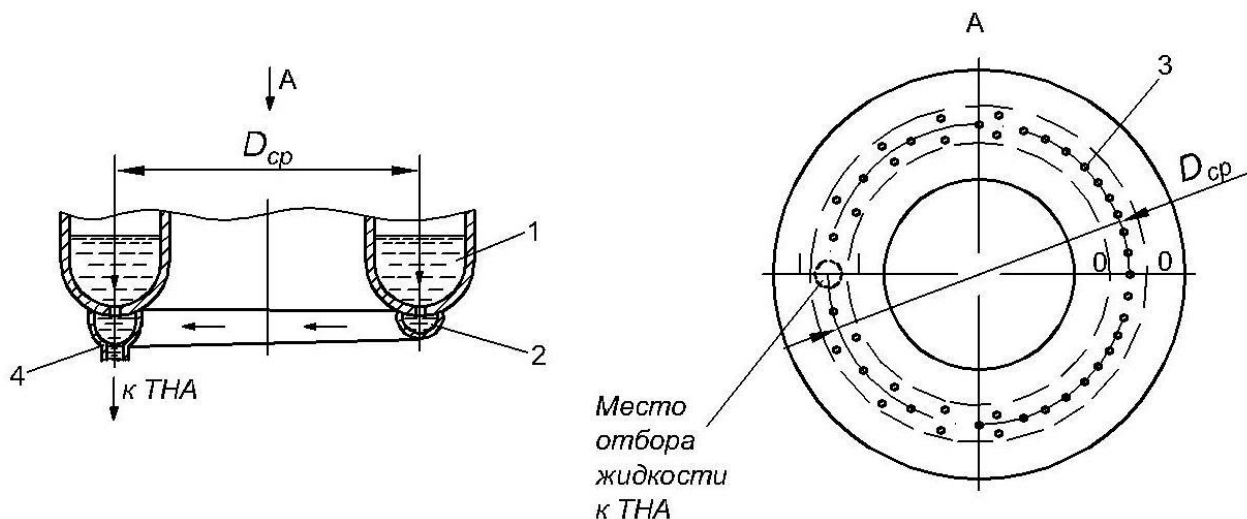


Рис. 1. Заборное устройство тороидального бака с кольцевым желобом переменного сечения и одним отбором к ТНА

С использованием общего уравнения движения жидкости в работах [6, 7] было получено дифференциальное уравнение для рассматриваемого случая (установившееся движение жидкости с присоединением расхода вдоль пути) в виде

$$\frac{\alpha_0 q_0^2}{g \omega} d\left(\frac{x^2}{\omega}\right) + \frac{dP}{\gamma} + \frac{\lambda q_0^2}{8g R \omega^2} x^2 dx - \frac{\alpha_0 \theta q_0}{g \omega} dx = 0, \quad (1)$$

где  $\alpha_0$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скорости по живому сечению потока;

$g$  – ускорение силы тяжести;

$\omega$  – площадь поперечного сечения потока (желоба);

$q_0$  – удельный расход жидкости на единицу длины желоба;

$$q_0 = \frac{Q_0}{\ell} = \text{const},$$

где  $Q_0$  – расход жидкости в кольцевом сечении желоба I-I;

$\ell$  – длина участка желоба между сеч. 0-0 и I-I по средней линии;

$x$  – текущая координата потока;

$P$  – гидродинамическое давление;

$\gamma$  – удельный вес жидкости;

$\lambda$  – коэффициент гидравлического трения;

$R$  – гидравлический радиус желоба;

$\theta$  – проекция на ось потока скорости присоединяемой массы.

Уравнение (1) устанавливает зависимость между геометрическими параметрами желоба и гидравлическими характеристиками потока жидкости в нем. Вследствие симметрии рассматривается только часть желоба между сеч. 0-0 и I-I (рис. 1).

Интегрируя выражение (1), определяем изменение пьезометрического давления по длине желоба  $\frac{P_0 - P}{\gamma} = f(x)$ , где  $P_0$  – давление в начальном сечении желоба (сеч. 0-0), практически равное давлению в баке, а  $P$  – давление в текущем сечении желоба  $x$ .

Для решения уравнения (1) необходимо знать законы изменения площади поперечного сечения желоба  $\omega$  и его гидравлического радиуса  $R$  по длине  $x$ .

Примем, что  $\lambda = \text{const}$ . Будем считать также, что присоединение жидкости через отверстие в желобе происходит под прямым углом к оси потока и проекции скорости присоединяемой массы равны нулю, т.е.  $\theta = 0$ .

Рассмотрим два возможных случая изменения  $\omega$  и  $R$  по длине желоба.

1. Значение величин  $R$  и  $\omega$  изменяются по линейному закону, т.е.

$$\omega = ax + v \text{ и } R = cx + d. \quad (2)$$

Такой закон изменения может быть с некоторым приближением принят, например, для желоба, представляющего собой отрезок цилиндра диаметром  $D_0$ , с площадью  $\omega_0$  в сеч. 0-0 и  $\omega_\ell$  в сеч. I-I (рис. 2).

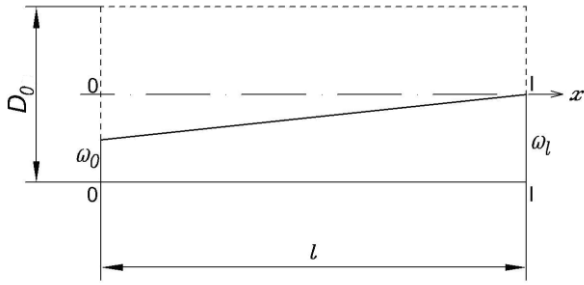


Рис. 2

В данном случае  $\alpha = \frac{\omega_l - \omega_0}{l}$ ;  $\epsilon = \omega_0$ ;

Интегрируя уравнение (3), запишем изменение пьезометрического давления по длине желоба как

$$\frac{P_0 - P}{\gamma} = \frac{\alpha_0 q_0^2}{g a^2} \left[ \ln(ax+b) - \ln b + \frac{b^2}{2(ax+b)^2} - \frac{1}{2} \right] + \frac{\lambda q_0^2}{8g} \left\{ A \left( \frac{b}{ax+b} - 1 \right) + B [\ln(ax+b) - \ln b] + C [\ln(cx+d) - \ln d] \right\}, \quad (4)$$

где  $A = \frac{b}{a^2(bc-ad)}$ ;  $B = \frac{b(bc-2ad)}{a^2(bc-ad)^2}$ ;  $C = \frac{d^2}{c(bc-ad)^2}$ . (5)

На этапе проектирования площадь желоба в кольцевом сечении I-I может быть определена из условия

$$\omega_l = \frac{Q_l}{V_l} = \frac{Q_{\text{сум}}}{2V_l},$$

2. Желоб в виде половины усеченного конуса (рис. 3).

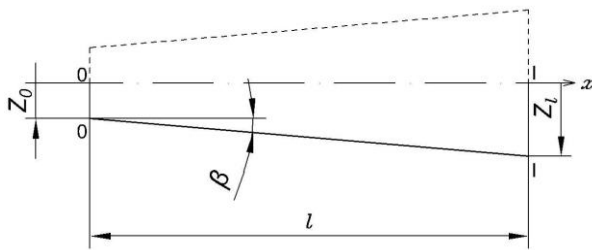


Рис. 3

Подставляя (6) в (1), получим:

$$\frac{\alpha_0 q_0^2}{g} \frac{\pi}{2} (\text{tg}\beta \cdot x + z_0)^2 \left[ \frac{x^2}{\frac{\pi}{2} (\text{tg}\beta \cdot x + z_0)^2} \right] + \frac{dP}{\gamma} + \frac{\lambda q_0^2}{8g} \cdot \frac{x^2 dx}{\frac{\pi^2}{4} (\text{tg}\beta \cdot x + z_0)^4 \cdot \frac{\pi}{2(2+\pi)} (\text{tg}\beta \cdot x + z_0)} = 0. \quad (7)$$

Проинтегрировав выражение (7), получим:

$$c = \frac{R_l - R_0}{\ell}; \quad d = R_0.$$

Подставляя (2) в (1) и учитывая, что  $\theta=0$ , получим:

$$\frac{\alpha_0 q_0^2}{g(ax+b)} d \left( \frac{x^2}{ax+b} \right) + \frac{dP}{\gamma} + \frac{\lambda q_0^2}{8g} \cdot \frac{x^2}{(ax+b)^2(cx+d)} dx = 0. \quad (3)$$

где  $Q_{\text{сум}}$  – расход жидкости из бака;  
 $V_l$  – скорость жидкости в кольцевом сечении желоба, которая может быть принята равной  $\sim 3,0$  м/с.

Для данного варианта можно записать следующие зависимости для  $\omega$  и  $R$ :

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \frac{\pi}{2} (\text{tg}\beta \cdot x + z_0)^2 \\ R &= \frac{\pi}{2(2+\pi)} (\text{tg}\beta \cdot x + z_0) \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

$$\frac{P_0 - P}{\gamma} = \frac{8\alpha_0 z_0 q_0^2}{g\pi^2 \operatorname{tg}^2 \beta} \left[ \frac{z_0}{4(\operatorname{tg} \beta x + z_0)^4} - \frac{1}{3(\operatorname{tg} \beta x + z_0)^3} + \frac{1}{12z_0^3} \right] + \frac{\lambda q_0^2 (2 + \pi)}{g\pi^3 \operatorname{tg}^3 \beta} \left[ \frac{2z_0}{4(\operatorname{tg} \beta x + z_0)^3} - \frac{1}{2(\operatorname{tg} \beta x + z_0)^2} - \frac{z_0^2}{4(\operatorname{tg} \beta x + z_0)^4} + \frac{1}{12z_0^2} \right]. \quad (8)$$

Используя выражения (4) или (8), можно определить соответствующий закон распределения отверстий по длине желоба, при котором обеспечивается равномерное опускание жидкости в баке. Для этой цели может быть использовано известное уравнение расхода жидкости через отверстие:

$$Q_{отв} = \mu \omega_{отв} \sqrt{2g \frac{P_0 - P}{\gamma}}, \quad (9)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода через отверстие;

$\omega_{отв}$  – площадь отверстия.

При условии равномерного опускания уровня жидкости в баке расход через отверстия, приходящиеся на единицу длины желоба, будет равен  $q_0$ , т.е.

$$q_0 = \mu \omega'_{отв} \sqrt{2g \frac{P_0 - P}{\gamma}}, \quad (10)$$

где  $\omega'_{отв}$  – площадь отверстий на единицу длины желоба.

Из уравнения (10) можно записать:

$$\omega'_{отв} = \frac{q_0}{\mu \sqrt{2g \frac{P_0 - P}{\gamma}}}. \quad (11)$$

Выражение (11) позволяет определить закон распределения отверстий по длине желоба заборного устройства, обеспечивающий равномерное опускание жидкости в баке и минимальные гидравлические остатки.

Рассмотренный вариант конструкции заборного устройства тороидального бака с кольцевым желобом переменного сечения при правильном выборе геометрических

параметров и закона распределения отверстий по его длине позволяет получить меньшие значения гидравлических остатков жидкости в баке по сравнению с желобом постоянного сечения за счет уменьшения объема желоба. Однако этот вариант технологически более сложен в изготовлении.

#### Список использованной литературы

1. Маккавеев В.М., Коновалов И.М. Гидравлика. – М.: Речиздат, 1940.
2. Ненько Я.Т. О движении жидкости с переменной вдоль потока массой. – Харьковский гидрометеорол. ин-т, 1937.
3. Петров Г.А. Гидравлика переменной массы (Движение жидкости с изменением расхода вдоль пути). – Харьковский гос. ин-т, 1964.
4. Кожевников А.С. Общие уравнения установившегося движения потока с переменным расходом и их решение. – М.: Госэнергоиздат, 1949.
5. Мещерский И.В. Работы по механике тел переменной массы. – М.-Л.: Гостехиздат, 1949.
6. Ильин Г.И. Теоретические и экспериментальные исследования заборных устройств тороидальных топливных баков РДД и КА: Дис... канд. техн. наук. – Днепропетровск: ГКБЮ, 1971. – 152 с.
7. Ильин Г.И. Методика проектирования заборных устройств тороидальных баков с желобом постоянного сечения // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – Днепропетровск: ГП "КБ "Южное", 2009. – Вып. 2. – С. 197–207.

Статья поступила 12.08.2013