

РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ  
АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО КЛАПАНА АППАРАТОВ  
ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ (АПГ)

Рассмотрим механизм работы реактивного аэродинамического клапана, представляющего собой отрезок трубы определенного сечения и длины с соплом или выходном участке. Расчетная модель для прямого клапана представлена на рис. 1.

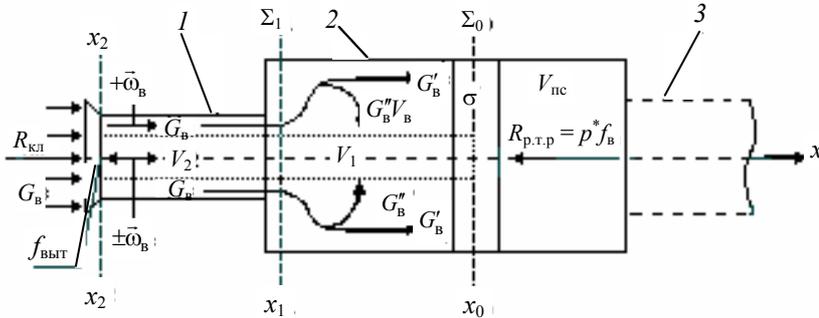


Рис. 1 Модель течения в аэродинамическом клапане:

1 – аэродинамический клапан; 2 – объем камеры сгорания, занимаемый воздухом; 3 – резонансная труба (условно),  $\sigma$  – объем зоны горения

Рассмотрим расчетную модель для прямого клапана (рис. 1).

В клапане существуют две зоны нестационарного потока воздуха: осевая зона – канал площадью  $f_{\text{ВЫТ}}$ , в котором поток периодически меняет свое направление, а следовательно его скорость будет  $\pm \vec{w}_B$  и зона с устойчивым несущим потоком, имеющим площадь кольца  $f_{\text{ВС}}^*$  и расположенными у стенки клапана, где его скорость всегда имеет направление  $+\vec{w}_B$ .

Направленная по  $x$  часть потока воздуха  $G_B$  поступает в камеру сгорания 2 и занимает объем  $V_B$ , расположенный перед зоной горения  $\sigma$ . Некоторая часть этого потока воздуха  $G'_B$  расходуется на поддержание стационарного пламени в зоне горения, которое согласно предложенной модели происходит в стабилизированном вихре, а часть  $G''_B$  поступает в осевую зону камеры сгорания.

Выделим в осевой зоне цилиндр объемом  $V_1$ , расположенный между сечениями  $x_0$  и  $x_1$ , в которых предполагается наличие поверхностей разрыва  $\Sigma_0$  и  $\Sigma_1$ . Площадь цилиндра объема  $V_1$  будет  $f_{\text{ВЫТ}} = f_{\text{КЛ}} - f_{\text{ВС}}^*$ . При циклическом изменении параметров потока в камере сгорания 2 поток воздуха в этом объеме периодически изменяет свое направление. В период всасывания окружающей воздух движется от входного сечения клапана  $x_2$  по направлению  $+x$  и поступает в объем  $V_1$ . Вместе с потоком  $G''_B$  это приводит к увеличению массы воздуха в объеме камеры сгорания перед зоной горения и, как следствие, к увеличению коэффициента избытка воздуха, участвующего в процессе горения. В период выталкивания воздух из объема  $V_1$  движется в направлении  $-x$ , т.е. к входному сечению клапана  $x_2$ . Очевидно, что место воздуха, удаляемого из объема  $V_1$  будет занимать поток воздуха  $G''_B$ . Это приведет к уменьшению количества воздуха участвующего в процессе горения, т.е. к уменьшению коэффициента избытка воздуха. Если среда сплошная, но контрольная поверхность разомкнута (истечение из клапана), то в процессе движения тела в потенциальном поле может изменяться ее масса в объеме  $V_B$ , тогда

$$\frac{d(mw)}{d\tau} = m \frac{\partial w}{\partial \tau} + w \frac{\partial m}{\partial \tau}. \quad (1)$$

В инерциальной системе координат для производных по времени в (1) справедливо соотношение  $\partial/\partial\tau = d/d\tau$  т.е. они являются субстанциональными, и, следовательно, имеют смысл полных производных. В то же время физический смысл этих производных различный. Действительно, первое слагаемое в (1) равно вектору внешних сил потенциального поля, действующих на замкнутую сплошную среду [1]

$$m \frac{\partial w}{\partial \tau} = \vec{F}_i \quad (2)$$

поэтому в состоянии равновесия или при стационарном движении  $\vec{F}_i = 0$ .

Второе слагаемое в (1) можно записать в следующем виде

$$w \frac{\partial m}{\partial \tau} = wG = \pm R_{\text{КЛ}}. \quad (3)$$

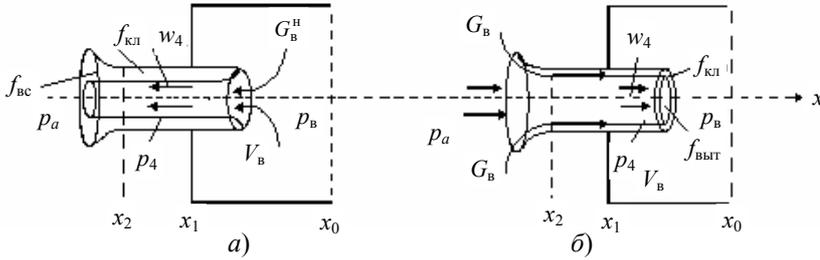
Следовательно, второе слагаемое в (1) представляет собой импульс реактивной силы в открытой системе. Реактивная сила воздействует на поверхность разрыва в зоне горения  $\Sigma_0$  и создает условия для повышения давления продуктов сгорания в объеме  $V_{\text{ПС}}$  при воздействии на них импульса сжатия со стороны резонансной трубы.

$$R_{\text{КЛ}} = -R_{\text{ТР}} = p^* f_{\text{ВЫТ}}. \quad (4)$$

Таким образом, аэродинамический клапан выполняет две функции. Обеспечивает подачу воздуха, необходимого для поддержания процесса горения, и создает импульс давления в процессе сжатия продуктов сгорания. Поэтому методика расчета геометрических размеров клапана, таких как площадь сечения клапана и его длина должна учитывать оба эти фактора.

Рассмотрим момент выталкивания воздуха.

Предлагаемая мгновенная картина течения воздуха в аэродинамическом клапане аналогична истечению несжимаемой жидкости из большого объема через насадок Борда. Особенно это характерно для аппаратов пульсирующего горения, в которых аэродинамический клапан утоплен в камеру сгорания (рис. 2, а) [2].



**Рис. 2** Схема мгновенной картины течения

через утопленный аэродинамический клапан:

а – истечение воздуха из камеры сгорания в окружающую среду;

б – поступление воздуха из окружающей среды в камеру сгорания

При всасывании картина течения представлена на рис. 2, б. Расход и скорость течения при всасывании определяется по известным газодинамическим уравнения [2]. При этом давление на входе в клапане  $p_a$ , а на выходе  $p_B$ .

При истечении воздуха из камеры сгорания через насадок Борда (рис. 2, а) коэффициент поджатия струи для несжимаемой жидкости равен  $f_{\text{выт}}/f_{\text{ккл}} = 0,5$ , а для идеального газа

$$\frac{f_{\text{выт}}}{f_{\text{ккл}}} = \frac{p_B - p_4}{\rho_4 w_4^2} = \left( \frac{p_B}{p_4} - 1 \right) \frac{1}{k M_4^2}, \quad (5)$$

где  $f_{\text{ккл}}$  определяем из условия всасывания,  $k = c_p / c_v$  – показатель адиабаты,  $M_4 = w_4 / a$  – число Маха в струе воздуха. При  $w_4 \leq a / 5$  имеем  $M_4 = 0,2 < 1$  и ожидаемый коэффициент поджатия струи газа, рассчитанный по формуле (5) будет 0,505, т.е. близок к несжимаемой жидкости.

Учитывая, что на этапе проектирования камеры пульсирующего горения с аэродинамическим клапаном, неизвестны два параметра: скорость воздуха при всасывании  $w_{\text{вс}}$  и давление воздуха  $p_B$ , то одним из них задаемся  $w_{\text{вс}} = w_4 = u_{\text{пл}}$  (скорость распространения пламени).

Площадь сечения клапана, необходимая для прохождения воздуха на горение равна

$$f_{\text{вс}} = \frac{G'_B}{\rho_B w_4}. \quad (6)$$

Количество воздуха, участвующего в горении определяется коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$ .  $G'_B = G_B^{\circ} = \alpha G_B^0$  где  $G_B^{\circ}$  – действительный расход воздуха,  $G_B^0$  – теоретически необходимое количество воздуха.

При установившемся периодическом законе изменения давления в камере сгорания соответственно будут чередоваться режимы всасывания и выталкивания воздуха через аэродинамический клапан. Согласно (5) площадь сечения, необходимая для выталкивания части воздуха из камеры сгорания, равна  $f_{\text{выт}} = 0,5 f_{\text{ккл}}$ . В то же время, за счет существования устойчивого направленного движения несущего потока, всасывание воздуха должно происходить и в момент выталкивания по кольцевому каналу.

Следовательно, площадь сечения аэродинамического клапана должна быть  $f_{\text{ккл}} = f_{\text{вс}} + f_{\text{выт}} = 2 f_{\text{вс}}$ . При сохранении необходимой скорости, за полупериод цикла всасывания в камеру сгорания поступает количество воздуха в два раза больше, чем это необходимо для поддержания устойчивого процесса горения.

$$G_B = \rho_B w_4 f_{\text{ккл}} = 2 \rho_B w_4 f_{\text{вс}}. \quad (7)$$

Оставшаяся часть воздуха не участвует в процессе горения и выталкивается через клапан за половину периода цикла обратно в атмосферу.

$$G_B'' = G_B - G'_B. \quad (8)$$

На основании (8) можем определить массу воздуха находящуюся в аэродинамическом клапане за время выталкивания  $\tau = 1/2T$

$$m_{\text{выт}} = \int_0^{\tau} G_B''(\tau) d\tau. \quad (9)$$

Масса, определяемая уравнением (8) создает реактивную силу, которая обеспечивает избыточное давление в камере сгорания, что в свою очередь создает условия для поддержания устойчивого направленного движения несущего потока. Зная массу воздуха в аэродинамическом клапане можно определить его длину

$$l_{\text{кл}} = \frac{m_{\text{ВЫГ}}}{\rho_{\text{В}} f_{\text{ВЫГ}}}. \quad (10)$$

По предложенной методике определены размеры клапана для АПГ и рассчитаны импульсы действующих сил, входящих в уравнение (4).

Расчетные значения  $R_{\text{кл}} = 6,97 \text{ Н}$        $R_{\text{тр}} = 5,75 \text{ Н}$

Экспериментальные значения  $R_{\text{кл}} = 6,5 \text{ Н}$        $R_{\text{тр}} = 5,3 \text{ Н}$

Расчетные значения  $R_{\text{кл}} / R_{\text{тр}} = 1,04$ ; экспериментальные значения  $R_{\text{кл}} / R_{\text{тр}} = 1,22$ .

Вывод: 1) экспериментальные значения сил и расчетные отличаются менее чем на 10 %, что вполне допустимо для практического применения.

2)  $R_{\text{кл}} > R_{\text{тр}}$  – это объясняется необходимостью преодолением сил трения несущего потока.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика Т. I. Механика: Учеб. пособие для студентов вузов. 3-е изд., перераб. М.: Наука, 1973. 208 с.

2 Седов Л.И. Механика сплошной среды: Учебник для студентов университетов и вузов. 3-е изд., перераб. М.: Наука, 1976. Т. 2. 573 с.

*Кафедра «Гидравлика и теплотехника»*