

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТОНАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ¹

Шиндянин Г.П., Сапунков Я.Г., Поршнев В.А., Федорец О.Н.
Саратовский государственный университет, г. Саратов

Решение проблемы сводится к определению параметров газового потока за движущейся в замкнутой с одного конца и заполненной взрывчатой смесью трубе детонационной волной (ДВ).

1. Постановка задачи. Детонационная волна возбуждается с замкнутого конца трубы длиной l и распространяется по взрывчатой смеси к свободному ее концу. Задача заключается в определении газодинамических параметров среды по длине трубы в промежутке времени от начала возбуждения детонации до завершения оттока ее продуктов из трубы.

2. Определение параметров течения газа в трубе на этапе распространения фронта детонации.

На фронте детонационной волны, который движется относительно взрывчатой смеси со скоростью U , выполняются следующие соотношения между параметрами течения газа перед фронтом и непосредственно за ним:

$$\begin{aligned}\rho_1 (v_s - U) &= -\rho_1 \cdot U, \\ \rho_s + \rho_s (v_s - U)^2 &= p_1 + \rho_1 U^2, \\ \frac{(v_s - U)^2}{2} + \frac{\gamma_2}{\gamma_2 - 1} \frac{p_s}{\rho_s} &= \frac{U^2}{2} + \frac{\gamma_1}{\gamma_1 - 1} \frac{p_1}{\rho_1} + q,\end{aligned}\quad (1)$$

где γ_1, ρ_1, p_1 — отношение теплоемкостей, плотность и давление в области исходной взрывчатой смеси;

$\gamma_2, \rho_s, p_s, v_s$ — отношение теплоемкостей, плотность, давление и скорость движения продуктов детонации непосредственно за фронтом детонации;

q — количество тепла, которое выделяется при сгорании единицы массы взрывчатой смеси.

Соотношения (1) выражают законы сохранения массы, количества движения и энергии при переходе через фронт детонации. Для удобства расчетов вводится безразмерная величина h^2 , которая определяется согласно выражению

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Минобразования
Научно-технической программы. Код проекта 01.01.030

$$h^2 = 2q \frac{\rho_1}{p_1}. \quad (2)$$

Скорость звука во взрывчатой смеси определяется из зависимости

$$a_1 = \sqrt{\gamma_1 \frac{p_1}{\rho_1}}. \quad (3)$$

Число Маха, связанное с U и a_1 выражением

$$M_1 = \frac{U}{a_1} = U \sqrt{\frac{\rho_1}{\gamma_1 p_1}} \quad (4)$$

удовлетворяет уравнению

$$M_1^4 - 2 \frac{M_1^2}{\gamma_1} \left[\frac{1}{2} h^2 (\gamma_1^2 - 1) + \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{\gamma_1 - 1} \right] + \frac{\gamma_2^2}{\gamma_1^2} = 0 \quad (5)$$

и определяется по зависимости

$$M_1 = \sqrt{\frac{1}{\gamma_1} \left[\frac{1}{2} h^2 (\gamma_1^2 - 1) + \frac{\gamma_2^2 - \gamma_1}{\gamma_1 - 1} + \sqrt{\left[\frac{1}{2} h^2 (\gamma_1^2 - 1) + \frac{\gamma_2^2 - \gamma_1}{\gamma_1 - 1} \right]^2 - \gamma_1^2} \right]}. \quad (6)$$

После определения M_1 по зависимости (6) вычисляется скорость движения фронта детонации

$$U = M_1 a_1 = M_1 \sqrt{\gamma_1 \frac{p_1}{\rho_1}}. \quad (7)$$

Параметры движения продуктов детонации непосредственно за фронтом детонации вычисляются по зависимостям [2]:

$$p_s = \frac{p_1}{\gamma_2 + 1} (1 + \gamma_1 M_1^2), \quad \rho_s = \rho_1 \frac{\gamma_1 (\gamma_2 + 1) M_1^2}{\gamma_2 (1 + \gamma_1 M_1^2)},$$

$$a_s = \sqrt{\gamma_2 \frac{p_s}{\rho_s}}, \quad v_s = U - a_s. \quad (8)$$

В области ВР 2, где скорость продуктов детонации изменяется от v_1 на фронте детонации OA до значения $v = 0$ на заднем фронте ВР OB , скорость звука a , плотность ρ и давление p выражаются по следующим зависимостям [2]:

$$a = a_s + \frac{\gamma_2 - 1}{2}(v - v_s), \quad \rho = \rho_s \left[1 + \frac{\gamma_2 - 1}{2} \frac{v - v_s}{a_s} \right]^{\frac{2}{\gamma_2 - 1}},$$

$$p = p_s \left[1 + \frac{\gamma_2 - 1}{2} \frac{v - v_s}{a_s} \right]^{\frac{2\gamma_2}{\gamma_2 - 1}}. \quad (9)$$

Скорость v и независимые переменные x и t в области 2 связаны уравнением прямолинейных характеристик в простой центрированной ВР

$$x = [v + a] \cdot t = \left[v + a_s + \frac{\gamma_2 - 1}{2}(v - v_s) \right] \cdot t = \left[\frac{\gamma_2 + 1}{2} v + a_s - \frac{\gamma_2 - 1}{2} v_s \right] \cdot t. \quad (10)$$

Отсюда в области центрированной ВР

$$v = \frac{2a_s}{\gamma_2 + 1} \left[\frac{x}{a_s t} + \frac{\gamma_2 - 1}{2} \frac{v_s}{a_s} - 1 \right]. \quad (11)$$

Область простой центрированной ВР определяется соотношением

$$\left[a_s - \frac{\gamma_2 - 1}{2} v_s \right] \cdot t \leq x \leq U t. \quad (12)$$

В области покоя 3 параметры продуктов детонации обозначим через p_3 — давление, ρ_3 — плотность, a_3 — скорость звука, $v_3 = 0$ — скорость продуктов детонации.

$$\text{Тогда } p_3 = p_s \left[1 - \frac{\gamma_2 - 1}{2} \frac{v_s}{a_s} \right]^{\frac{2\gamma_2}{\gamma_2 - 1}},$$

$$\rho_3 = \rho_s \left[1 - \frac{\gamma_2 - 1}{2} \frac{v_s}{a_s} \right]^{\frac{2}{\gamma_2 - 1}}, \quad a_3 = a_s - \frac{\gamma_2 - 1}{2} v_s. \quad (13)$$

Область покоя 3 определяется соотношением

$$0 \leq x \leq \left(a_s - \frac{\gamma_2 - 1}{2} v_s \right) \cdot t. \quad (14)$$

Построенное решение в автомодельных переменных представляется в виде

$$\frac{p}{p_s} = \begin{cases} [f(\xi)]^{\frac{2\gamma_2}{\gamma_2-1}}, & \text{если } \xi_* \leq \xi \leq 1; \\ b^{\frac{2\gamma_2}{\gamma_2-1}}, & \text{если } 0 \leq \xi < \xi_*; \end{cases}$$

$$\frac{\rho}{\rho_s} = \begin{cases} [f(\xi)]^{\frac{2}{\gamma_2-1}}, & \text{если } \xi_* \leq \xi \leq 1; \\ b^{\frac{2}{\gamma_2-1}}, & \text{если } 0 \leq \xi < \xi_*; \end{cases}$$

$$\frac{v}{v_s} = \begin{cases} \frac{2}{\gamma_2 + 1} \left[\frac{U}{v_s} \xi + \frac{\gamma_2 - 1}{2} - \frac{a_s}{v_s} \right], & \text{если } \xi_* \leq \xi \leq 1; \\ 0, & \text{если } 0 \leq \xi \leq \xi_*; \end{cases} \quad (15)$$

где

$$f(\xi) = 1 + \frac{\gamma_2 - 1}{\gamma_2 + 1} \left[\frac{U}{a_s} \xi - \frac{v_s}{a_s} - 1 \right]; \quad \xi = \frac{x}{Ut};$$

$$\xi_* = \frac{1}{U} \left[a_s - \frac{\gamma_2 - 1}{2} v_s \right]; \quad b = f(\xi_*) = 1 - \frac{\gamma_2 - 1}{2} \frac{v_s}{a_s}. \quad (16)$$

3. Расчет импульса тяги ПДД. Имея представленный выше математический аппарат можно перейти непосредственно к расчету значения основной составляющей импульса тяги ПДД, создаваемой только детонационной камерой (ДК) (влияние соплового насадка на величину импульса в данной статье не рассматривается).

Для расчета импульса тяги необходимо первоначально определить импульс давления I_p

$$I_p = \int_0^{t_\phi} p(t) dt + p_3(t_3 - t_\phi) + \int_{t_3}^{t_k} p(t) dt \approx p_3 t_3 + \int_{t_3}^{t_k} p(t) dt. \quad (17)$$

Данное приближение можно допустить из условия малости временного интервала $t_\phi \leq 3 \cdot 10^{-5} \text{ с} \ll t_3$. Выражение (17) рассчитывается в процессе решения приведенных выше зависимостей (2)...(16). Теоретическое значение единичного импульса тяги I_1' определяется формулой

$$I_1' = I_p A_{\partial n} \quad (18)$$

Реальное значение импульса тяги определяется из зависимости [3]

$$I_1 = K_n \cdot K_z \cdot \alpha \cdot I_1^t,$$

где K_n - коэффициент качества продувки ДК;
 K_z - коэффициент качества заполнения ДК;
 α - коэффициент избытка окислителя.

Коэффициенты K_n , K_z , α определены экспериментально [3].

4. Результаты расчетов. Для расчетов параметров течения газа в ДК на персональном компьютере на языке «PASCAL» составлена программа, в которой реализован метод Лакса-Вендроффа. Расчеты проводились для компонентов топлива и ДК, на которых проводился натурный эксперимент, включающий 106 детонационных циклов.

Исходные данные для расчета:

компоненты топлива – C_2H_2 + воздух; длина ДК $l = 0,283$ м;
площадь дна ДК $A_{dk} = 0,0512$ м²; $\gamma_1 = 1,4$; $\gamma_2 = 1,28$; $\rho_1 = 1,35$ кг/м³,
 $h^2 = 60$.

Результаты расчетов:

$M_1 = 5,3087$; $p_s = 23,3476 \cdot 10^5$ Па; $\rho_s = 1,7478 \rho_1$; $a_2 = 1451,45$ м/с;
 $v_2 = 1014,54$ м/с; $p_3 = 6,5537 \cdot 10^5$ Па; $\rho_3 = 0,7979$ кг/м³; $U = 1762,47$ м/с;
 $t_0 = 0,0001606$ с; $t_{op} = 0,0004327$ с; $t_3 = 0,0005933$ с; $t_k = 0,0013314$ с,
 $I_1^t = 17,97$ Н·с; $I_1 = 4,2265$ Н·с (для $K_n = 0,42$; $K_z = 0,56$; $\alpha = 1,0$).

При этом экспериментальное значение единичного импульса $I_1^a = 3,8475$ Н·с.

5. Вывод. Развита модель достаточно хорошо описывает газодинамические процессы в ПДД.

Список литературы

1. Алемасов В.Е., Дрегаллин А.Ф., Тишин А.Н. Теория ракетных двигателей. Изд.4-е. Под ред. В.П. Глушко – М.: Машиностроение, 1989. – 484 с.
2. Станюкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды. Изд. 2-е. – М.: Наука, 1971. – 856 с.
3. Поршнев В.А., Федорев О.Н. Теоретико-экспериментальная методика расчёта основных параметров детонационных реактивных двигателей // Аэродинамика. Ударно-волновые процессы. Межвузовский сборник научных трудов. Вып. 15(18). – Саратов: СГУ, 2000. – С.82-88.