

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ТЯГИ СОПЛА ДВОЙНОГО РАСШИРЕНИЯ

Трушков Александр Сергеевич, trushkov_as@mail.ru

ГОУ ВО МО Государственный социально-гуманитарный университет, г.

Коломна, Россия

Сопло двойного расширения представляет собой многосопловой блок (см. рисунок 1). Единичные сопла располагаются на периферии блока по окружности. Радиус центров критических сечений сопел относительно оси изделия составляет r_c . В радиальном направлении истечение продуктов сгорания из сопел ограничено конической поверхностью, которая условно названа “kozyрьком”. На “kozyрьке” происходит смыкание струй единичных сопел, что обеспечивает автомодельность газодинамических процессов (за исключением, в некоторых случаях, приосевой области вихревого течения), то есть независимость энергетических характеристик сопла двойного расширения от внешнего давления. Донная часть соплового блока представляет собой выпуклую поверхность, с некоторой линии которой происходит отрыв потока с образованием области возвратно-циркуляционного течения в центральной части. Сопла наклонены на некоторый угол тангенциально к окружности радиуса r_c для обеспечения закручивающего момента.

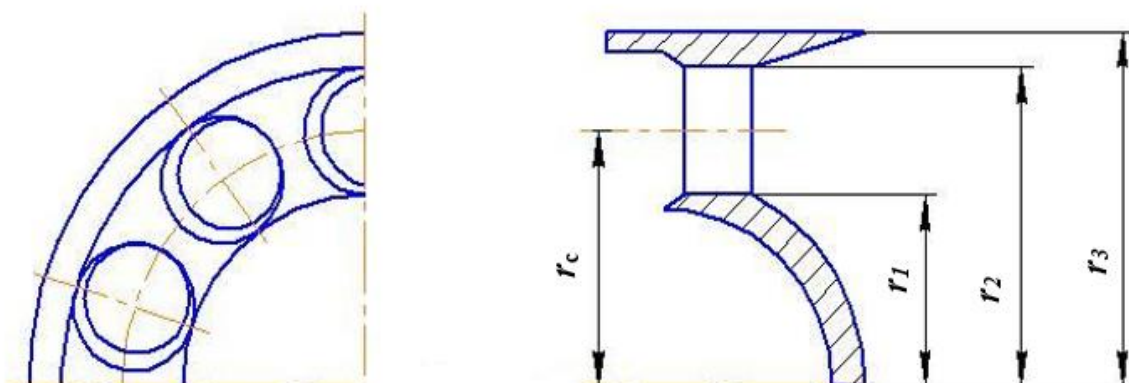


Рисунок 1- Схема сопла двойного расширения.

Пустотная сила тяги R сопла двойного расширения равна:

$R = R_{нов} + R_{коз} + R_{дно} + R_{сон}$, где $R_{нов}$ - сила давления на поверхности выхода сопел; $R_{коз}$ - сила давления на “kozyрьке”; $R_{дно}$ - сила давления на донной части соплового блока; $R_{сон}$ - суммарная тяга сопел.

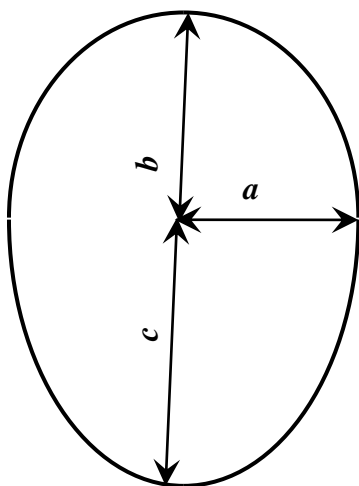
При делении этого соотношения на коэффициент $p_0 \cdot n \cdot \sigma_*$, где p_0 - внутрикамерное давление, n - количество единичных сопел, σ_* - площадь критического сечения единичного сопла, получим соотношение для пустотного коэффициента тяги k_R соплового блока:

$k_R = k_{нов} + k_{коз} + k_{дно} + k_{сон}$, где $k_{нов}$, $k_{коз}$, $k_{дно}$, $k_{сон}$ - коэффициенты тяги, реализующейся на поверхностях выхода сопел, “kozyрька”, донной части и в единичных соплах.

Сила давления на поверхности выхода сопел вычисляется по формуле:

$R_{нов} = p_{нов}(\sigma_2 - \sigma_1)$, где $p_{нов}$ - давление на поверхности выхода сопел, σ_2 - общая площадь кольцевой поверхности выхода сопел, σ_1 - суммарная площадь выходных сечений сопел.

Площадь кольцевой поверхности $\sigma_2: \sigma_2 = 2\pi r_c (r_2 - r_1) = 2\pi r_c \Delta r$



Площадь выходного сечения единичного сопла представляет собой два полуэллипса с общей полуосью a и разными полуосями b и c (рис.2). Площадь выходного сечения:

$$\sigma_{вых} = 0,5\pi ab + 0,5\pi ac = 0,5\pi a(b + c).$$

Суммарная площадь выходных сечений сопел составит: $\sigma_1 = n \sigma_{вых} = 0,5\pi na(b + c)$,

где n - количество единичных сопел в блоке.

Рисунок 2 - Схема выходного сечения единичного сопла.

Величины полуосей a , b , c определяются для фактической геометрии раструба сверхзвуковой части сопла.

Давление $p_{нов}$ на поверхности выхода сопел рассчитывается по методике [1] при внезапном расширении площади проходного сечения канала с величины σ_1 до σ_2 (рис. 3) по следующему алгоритму:

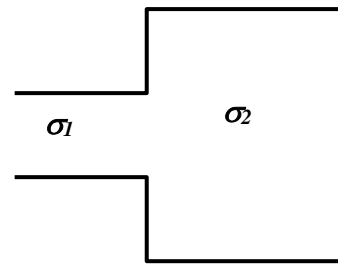


Рисунок 3 - Схема расчета давления на поверхности выхода

$$p_{нов} = \frac{\sigma_1 g(\lambda_2)}{\sigma_2 g(\lambda_1)} \pi(\lambda_1) p_0, \lambda_2 = \frac{k_1}{\varepsilon} + \sqrt{\frac{k_1^2}{\varepsilon^2} - \frac{1}{\varepsilon} \frac{\sigma_1}{\sigma_2}}, \varepsilon = 1 + \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \left(1 - \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right),$$

$$k_1 = \frac{\lambda_1 + \lambda_1^{-1}}{2}, \text{ где: } g(\lambda) = \frac{1}{\lambda} \left(1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \lambda^2 \right), \pi(\lambda) = \left(1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \lambda^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} -$$

газодинамические функции; γ - показатель адиабаты.

Величина безразмерной скорости λ_1 вычисляется, как корень решения

$$\text{уравнения: } q(\lambda_1) = \frac{n \cdot \sigma_*}{\sigma_1}, \text{ где } q(\lambda) = \lambda \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \left(1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \lambda^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} -$$

приведенная плотность потока массы.

Пустотный коэффициент тяги на поверхности выхода сопел вычисляется

$$\text{следующим образом: } k_{нов} = \frac{R_{нов}}{p_0 \sigma_* \cdot n} = \frac{p_{нов} (\sigma_2 - \sigma_1)}{p_0 \sigma_* \cdot n}.$$

Коэффициенты тяги “козырька” $k_{коз}$ и донной части соплового блока $k_{дно}$ рассчитываются с помощью программы расчета параметров течения идеального газа во всем диапазоне чисел Маха для произвольной двумерной области[2]. Многосопловая струя заменяется кольцевой с тем же расходом, что и исходная. Безразмерная скорость на поверхности

выхода сопел вычисляется, как корень уравнения: $q(\lambda) = \frac{n \sigma_*}{\sigma_2}$, которое

можно решить с использованием газодинамических таблиц. Остальные параметры струи вычисляются программой на основе теории одномерного изэнтропического течения.

Безразмерные значения внешних начальных данных задаются следующим

образом: безразмерное внешнее давление - $\bar{p}_a = \frac{1}{n_a \gamma \pi(1)}$, безразмерная

внешняя полная энергия - $\bar{E}_a = \frac{1}{2} \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}$, безразмерная внешняя плотность

$$- \bar{\rho}_a = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{\bar{p}_a}{\bar{E}_a}.$$

Программа вычисляет безразмерную силу давления по i -му участку контура в проекции на продольную ось соплового блока. Пусть \bar{F}_i - проекция на продольную ось безразмерной силы давления по i -му участку контура. Тогда коэффициент тяги по этому участку контура будет равен:

$$k_i = \frac{2\pi \bar{F}_i l_m^2 \gamma \pi(1)}{n \sigma_*}, \text{ где } l_m - \text{длина стороны ячейки разностной сетки в}$$

единицах длины.

Для вычисления коэффициентов тяги “kozyрька k_{koz} ” и донной части соплового блока $k_{дно}$ необходимо просуммировать коэффициенты тяги k_i участков контура, из которых состоят “kozyрьки” и донная часть соплового блока.

Коэффициент тяги k_{con} сопел блока определяется с помощью программы расчета параметров сверхзвукового пространственного течения идеального газа [3]. Для определения энергетических характеристик конического кососрезанного сопла в программу необходимо ввести следующие параметры: φ - угол полураствора конуса сверхзвукового раструба; ψ - угол среза сопла; x_{min} - начало косога среза; x_{max} - конец косога среза; x_s - абсцисса пересечения линии косога среза с осью сопла; $p_{нов}$ - безразмерное

$$k_{зак} = \frac{2\gamma}{\pi} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} I \cos(\psi + \Delta\psi) \text{ и } \text{направлен по касательной к}$$

окружности радиуса r_c .

Данный алгоритм расчета применяется в течении многих лет при разработке сопловых блоков стартовых двигателей малогабаритных ракет.

Литература

1. Орлов Б.В., Мазинг Г.Ю. Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе.// М.: "Машиностроение", 1968.
2. Трушков А.С. Газодинамическое проектирование энергоустановок на твердом топливе /"Новые технологии", № 2, 2000 г.
3. Численное решение многомерных задач газовой динамики. Под редакцией Годунова С.К. // М.: "Наука", 1976.