

УДК 621.454.

© Ермолаев И.В.

РАСЧЕТ ПОПЕРЕЧНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТЯГИ ДВИГАТЕЛЯ

Приводится эмпирическая зависимость для расчета поперечной составляющей тяги двигателя при вдуве (впрыске) рабочего тела в сверхзвуковую часть сопла.

С появлением потребностей в двигательных установках большой мощности особо остро встал вопрос об ограничении их весовых характеристик, особенно с появлением двигателей высотных ступеней, работающих на водородном топливе, вес которых значительно возрастает за счет сопел с большой степенью расширения. Используемые способы управления по тангажу и рысканию путем применения специальных рулевых двигателей значительно увеличивают пассивный вес ступеней ракет и уменьшают выигрыш за счет применения высокоэффективных топлив. В эти годы начался активный поиск новых способов управления вектором тяги. Казалось, что одним из наиболее эффективных способов является способ создания управляющего усилия путем вдува (впрыска) рабочего тела в сверхзвуковую часть сопла. Исследования этого способа активно и в больших объемах проводились как внутри страны, так и за рубежом. Подавляющее большинство этих исследований проводилось на моделях, значительно отличающихся от натурных двигателей, и поэтому позволяют судить только о возможности создания поперечной составляющей тяги. Это обусловлено отсутствием данных по сложному и недостаточно изученному характеру взаимодействия сверхзвуковых потоков не только на криволинейных поверхностях, но и на плоскости.

В свое время автор принял активное участие по исследованию данного способа управления вектором тяги с целью получения обобщенной зависимости для определения поперечной составляющей тяги двигателя.

Опыты проводились на соплах, устанавливаемых на экспериментальных жидкостных и твердотопливных двигателях. Двигатели имели тягу по 1000 кг. Жидкостный ракетный двигатель работал на горючем ТМ-185

и окислителе АК-27И при давлении в камере сгорания, равном 31–32 атмосферы. В качестве рабочего тела вдува использовался газогенераторный газ, получаемый из горючего НДМГ и окислителя АК-27И. Эксперименты на твердотопливном двигателе, работающем на порохе НМЗ-13, проводились на тех же соплах, что и на ЖРД. В качестве рабочего тела вдува использовался газ, отбираемый из камеры сгорания двигателя, а в дополнительных опытах для этой цели использовался воздух. Результаты опытов позволили определить границы области возмущенного течения, которые определялись по отложению продуктов неполного сгорания топлива на стенках сопла РДТТ. Сравнительные данные, полученные в опытах на ЖРД и РДТТ, позволили понять характер формирования возмущенной зоны при взаимодействии сверхзвуковых потоков в сопле и оценить влияние возмущенной зоны на величину поперечной составляющей тяги двигателя.

Анализ имеющихся результатов отечественных и зарубежных исследований позволил установить, что наибольший удельный импульс поперечной силы достигается в сечении, площадь которого равна 3/4 площади выходного сечения сопла. Правильность этого вывода необходимо было подтвердить, обработав все имеющиеся результаты отечественных и зарубежных опытов, подобрав соответствующий критерий. Такой критерий был найден – это $R_y^*/R_{y\max}^*$, где $R_y^* = P_y / m_{\text{вд}}^*$; P_y^* – относительная поперечная составляющая тяги двигателя; $m_{\text{вд}}^*$ – относительный массовый расход вдуваемого газа;

$$P_y^* = P_y / P^\infty; m_{\text{вд}}^* = m_{\text{вд}} / m_{\text{ос}};$$

P_y – поперечная составляющая тяги двигателя;

P^∞ – тяги двигателя в пустоте при $P_y = 0$;

$m_{\text{вд}}$ – массовый секундный расход вдуваемого газа;

$m_{\text{ос}}$ – массовый расход газа основного потока.

Этот критерий позволил объединить все имеющиеся данные отечественных и зарубежных опытов и подобрать эмпирическую формулу, позволяющую с до-

Ермолаев Иван Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент МГУЛа.

статочной точностью производить расчет управляющего усилия для ЖРД и РДТТ в зависимости от местоположения узла вдува на сопле, угла наклона стенки сопла к его оси, геометрических размеров сопла и параметров взаимодействующих потоков газа.

Данные зависимости относительного удельного импульса в сечении сопла, площадь которого равна 3/4 выходного сечения сопла при угле вдува $\Psi=120^\circ$, позволили аппроксимировать их эмпирической формулой

$$\frac{R_y^*}{R_{y \max}^*} = 1 - 2.4 \left(\frac{f_i}{f_a} - 0.75 \right)^2,$$

где f_i – площадь поперечного сечения сопла в потоке местоположения узла вдува;

f_a – площадь выходного сечения сопла двигателя.

Данные, полученные по зависимости $R_{y \max}^*$ при оптимальном местоположении узла вдува от угла наклона стенки сопла двигателя к его оси (θ), угла вдува (Ψ) и параметров основного и вдуваемого потоков газа, позволили подобрать формулу для определения $R_{y \max}^*$:

$$R_{y \max}^* = (2 - e^{52\theta^4}) (1 + C_*^2) + \Psi/2 - 1,$$

где C_* – относительная характеристическая скорость

$$C_* = \left(\frac{p_{вд}}{p_k} \right) \left(\frac{f_{вд}}{f_{кр}} \right) \left(\frac{m_{ос}}{m_{вд}} \right);$$

p_k – давление в камере сгорания двигателя;

$p_{вд}$ – давление газа на входе в сопло вдува;

$f_{вд}$ – площадь отверстия для вдува;

$f_{кр}$ – площадь критического сечения сопла двигателя;

$m_{ос}$ – массовый секундный расход основного потока газа;

$m_{вд}$ – массовый секундный расход вдуваемого газа.

Таким образом, расчетная формула для определения управляющего усилия при вдуве (впрыске) рабочего тела в сверхзвуковую часть сопла имеет следующий вид:

$$R_y^* = \left[1 - 2.4 \left(\frac{f_i}{f_a} - 0.75 \right)^2 \right] (2 - e^{52\theta^4}) (1 + C_*^2) + \frac{\Psi_{вд}}{2} - 1.$$

Других расчетных зависимостей управляющего усилия при вдуве (впрыске) рабочего тела в сверхзвуковую часть сопла к моменту получения данной формулы ни в отечественной, ни в зарубежной литературе не встречалось.

Данная формула впервые была опубликована в 1971 г. в журнале «Оборонная техника» N1.

Материал поступил в редакцию 20. 03. 2008г.