

О ПРОБЛЕМЕ РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЛАСТИ ПЕРЕХОДА В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ СОПЕЛ ЖРД С БОЛЬШОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СТЕПЕНЬЮ РАСШИРЕНИЯ

Безменова Н.В., Шустов С.А.

Самарский университет, г. Самара, bezmenova@mail.ru

Ключевые слова: сопла ЖРД, ламинарный пограничный слой, турбулентный пограничный слой, критическое число Рейнольдса, область перехода.

Актуальность проблемы расчетного определения области перехода в пограничном слое сопел ЖРД обусловлена тем, что характер течения в пограничном слое (ламинарный или турбулентный) обуславливает не только величину потерь удельного импульса из-за трения, но и теплообмен продуктов сгорания со стенкой. При этом следует учитывать, что в связи с необходимостью получения предельно-достижимых значений удельного импульса для современных ЖРД характерна тенденция использования сопел с большой геометрической степенью расширения \bar{F}_a , вплоть до $\bar{F}_a \sim 10^3$ [1]. Однако до настоящего времени удовлетворительное решение рассматриваемой проблемы отсутствует.

В результате специального экспериментального исследования состояния пограничного слоя в оптимальных соплах (рабочее тело – воздух, число Маха на срезе = 2.5 – 3.0 ($\bar{F}_a \sim 3$), теплообмен отсутствует (фактор теплообмена \bar{T}_w равен 0.9) установлено [2], что при числах $Re_{w0} \leq 10^7$ пограничный слой является ламинарным, а при числах $Re_{w0} \geq 3 \cdot 10^7$ турбулентным. В диапазоне чисел Рейнольдса $10^7 < Re_{w0} < 3 \cdot 10^7$ режим течения в пограничном слое является переходным. Число Рейнольдса Re_{w0} определяется следующим образом:

$$Re_{w0}(x) = \frac{w(x) \cdot \rho_{oc} \cdot x}{\eta_w(x)}, \quad (1)$$

где w – скорость в осевом направлении, ρ_{oc} – плотность заторможенного газа на входе в сопло, x – длина сопла, $\eta_w(x)$ – коэффициент динамической вязкости газа при температуре стенки. Использование числа Рейнольдса $Re_{w0}(x)$ для оценки характера течения в пограничном слое на стенке сопел ЖРД приводит к следующим результатам: для ЖРД тягой 0.4 кН переход от ламинарного к турбулентному характеру течения происходит при $\bar{F}_a \sim 10^2$, а начиная с ЖРД тягой 2.5 кН течение по всей длине сверхзвуковой части сопла является турбулентным.

При этом в работах [3,4,5] показано, что на переход в пограничном слое сверхзвуковых сопел существенное влияние оказывает ряд факторов, которые не учитывает изложенная выше методика, основанная на использовании числа Re_{w0} : продольный отрицательный градиент давления, теплообмен продуктов сгорания со стенкой, интенсивность турбулентности во внешнем потоке, шероховатость стенки, сжимаемость (число Маха), радиус кривизны профилированной сверхзвуковой части сопла.

В связи с тем, что соплам с $\bar{F}_a \sim 10^3$ соответствует число Маха на выходе из сопла $M_a \sim 8$, отметим, что работе [3] показано: увеличение числа Маха с 2.5 до 8 приводит к области перехода по числу Re_{w0} на порядок выше, чем указано в работе [2]. Кроме того, в работе [1], на основе проведенного экспериментального исследования, показано, что в ЖРД тягой 2.43 кН по всей длине

сверхзвуковой части сопла ($\bar{F}_a = 1030$) характер течения в пограничном слое оставался ламинарным, что согласуется с экспериментальными результатами работы [3].

В связи с этим авторами данной работы предложена методика расчетного определения области перехода в пограничном слое сопел ЖРД, которая учитывает указанные выше факторы, влияющие на переход в пограничном слое сопел ЖРД, а также согласуется с экспериментальными результатами работ [1,2]. Эта методика основана на сравнении чисел Рейнольдса $Re_{кр}^*(x)$ и $Re_i^*(x)$.

Критическое число Рейнольдса $Re_{кр}^*(x)$, превышение которого приводит к потере устойчивости течения в пограничном слое, определяется выражением:

$$Re_{кр}^*(x) = Re_{кр}^{*nl} \cdot \bar{C}_f(x) \cdot \bar{C}_{f\varepsilon}(x) \cdot \bar{C}_\varepsilon(x) \cdot \bar{C}_M(x) \cdot \bar{C}_{\bar{T}_w}(x) \cdot \bar{C}_\Delta(x) \cdot \bar{C}_g(x), \quad (2)$$

где $Re_{кр}^{*nl}$ – критическое число Рейнольдса для обтекания пластины несжимаемым безградиентным потоком жидкости, а входящие в выражение (2) коэффициенты $\bar{C}_i(x)$ учитывают влияние таких факторов, как отрицательный градиент давления в осевом направлении, интенсивность турбулентности $\varepsilon(x)$ во внешнем потоке, сжимаемости (числа Маха $M(x)$), фактора теплообмена $\bar{T}_w(x)$, шероховатости стенки, радиуса кривизны профилированной сверхзвуковой части сопла.

В текущем числе Рейнольдса $Re_i^*(x)$ характерным размером является толщина вытеснения пограничного слоя $\delta^*(x)$:

$$Re_i^*(x) = \frac{u_e(x) \cdot \delta^*(x) \cdot \rho_e(x)}{\eta_w(x)}, \quad (3)$$

где нижний индекс «e» относится к параметрам на внешней границе пограничного слоя. При $Re_i^*(x) < Re_{кр}^*(x)$ характер течения в пограничном слое является ламинарным; при $Re_i^*(x) > Re_{кр}^*(x)$ характер течения в пограничном слое является турбулентным.

Список литературы

1. Kasunski, K.J., Smith, T.A., Pavli, A. J. Comparison of theoretical and experimental thrust performance of a 1030: laree ratio Rocket nozzle antechamber pressure of 2413 KN/m² (350 psia) . АПА Pap / 1987. N 2069. Pp. 1-21.
2. Пирумов У.Г. Особенности однофазного течения в сопле // Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Т.1: Методы расчета. М.: АН СССР, ВИНТИ, 1971. 190 с.
3. Ковтуненко, В.М. Проектирование газореактивных систем космических аппаратов // В.М. Ковтуненко [и др.]. М.: Машиностроение, 1973. 262 с.
4. Решотко Е. Программа исследования перехода // Ракетная техника и космонавтика.- 1975. №3. С. 8–14
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя [Текст] // перев.с немецкого. М.: Гл. ред. физ.-мат. литературы, Наука, 1969. – 742 с.

Сведения об авторах

Безменова Наталья Витальевна, канд. техн. наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов имени В.П. Лукачева Самарского университета; область научных интересов:термогазодинамика и теплообмен ракетных двигателей

Шустов Станислав Алексеевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры теории двигателей летательных аппаратов имени В.П. Лукачева Самарского университета; область научных интересов: термогазодинамика ракетных двигателей.

**ON THE PROBLEM OF COMPUTATIONAL DETERMINATION
OF THE TRANSITION REGION IN THE BOUNDARY LAYER OF LRE NOZZLES
WITH A LARGE GEOMETRIC DEGREE OF EXPANSION**

Bezmenova N. V., Shustov S. A.

Samara National Research University, Samara, Russia, bezmenova@mail.ru

Keywords: nozzles, laminar boundary layer, turbulent boundary layer, critical Reynolds number, transition region.

A method for solving the problem of the calculated determination of the transition region in the boundary layer of LRE nozzles is proposed, based on the use of the critical Reynolds number, in which the characteristic size is the displacement thickness.