

УДК 621.45.02+536.8+519.6

ББК 39.62

C121

А. Н. Сабирзянов

Казань, Россия

А. Н. Кириллова

Казань, Россия

ВЛИЯНИЕ ПРОТЯЖЁННОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО УЧАСТКА В МИНИМАЛЬНОМ СЕЧЕНИИ СОПЛА НА КОЭФФИЦИЕНТ РАСХОДА

Современными методами вычислительной гидродинамики проведена оценка влияния протяженности цилиндрического участка в минимальном сечении реактивного сопла на коэффициент расхода в зависимости от его геометрических характеристик. Представлены зависимости влияния протяженности на коэффициент расхода для звуковых и сверхзвуковых сопел при различных углах конусности входа. Выявлены характерные особенности влияния наличия скругления при переходе к цилиндрическому участку.

Ключевые слова: реактивное сопло, коэффициент расхода, газовая динамика, моделирование.

A. N. Sabirzyanov

Kazan, Russia

A. N. Kirillova

Kazan, Russia

THE INFLUENCE OF CYLINDRICAL SITE EXTENT IN THE NOZZLE'S MINIMUM SECTION ON DISCHARGE COEFFICIENT

The article deals with the influence of cylindrical site extent in the jet nozzle's minimum section on coefficient of discharge which was evaluated according to the geometrical characteristics with the modern methods of computing hydrodynamics. It

shows the dependences of influence of extent on discharge coefficient for sound and supersonic nozzles at various taper angles. It gives idiosyncrasies of influence of a rounding off upon the transition to the cylindrical site.

Keywords: jet nozzle, discharge coefficient, gas dynamics, modeling.

При проектировании реактивных сопел основной целью является максимальное приближение процесса истечения газа из сопла к идеальному [Лаврухин, 2003]. Для оценки степени совершенства сопла применяют суммарный коэффициент расхода, в общем случае представляющий собой произведение различных его составляющих [Губертов, 2004]. Основная доля всех потерь, учитываемых коэффициентом расхода, приходится на газодинамическую составляющую.

В ряде случаев конструкция сопел летательных аппаратов (ЛА) содержит цилиндрический участок в минимальном сечении, обусловленный во многом технологическими причинами. Влияние такого участка на степень совершенства процессов в сопле изучено недостаточно полно. Например, в работе [Аблаков, 1987] для различных углов наклона контура дозвуковой части сопла $\theta_{кр}$ (рис. 1) и перепада давлений $\pi_c = 1-5$ ($\pi_c = p_{oc}/p_\infty$, где p_{oc} , p_∞ – давление в камере сгорания и давление окружающего пространства, соответственно) показано, что существуют участки, где коэффициент расхода не зависит от относительной длины цилиндрического участка $\bar{l} = l_{ц}/(2R_{кр})$ ($l_{ц}$ – длина цилиндрического участка; $R_{кр}$ – радиус минимального сечения). Однако представленные графические результаты в целом отражают колебания коэффициента расхода в зависимости от \bar{l} в пределах 1 %. Следует отметить, что увеличение потерь тяги на 1 % приводит к потерям скорости и дальности полета на 3,5 – 5 % в зависимости от вида ЛА [Лаврухин, 2003]. Потери тяги непосредственно связаны с потерями, учитываемыми коэффициентом расхода.

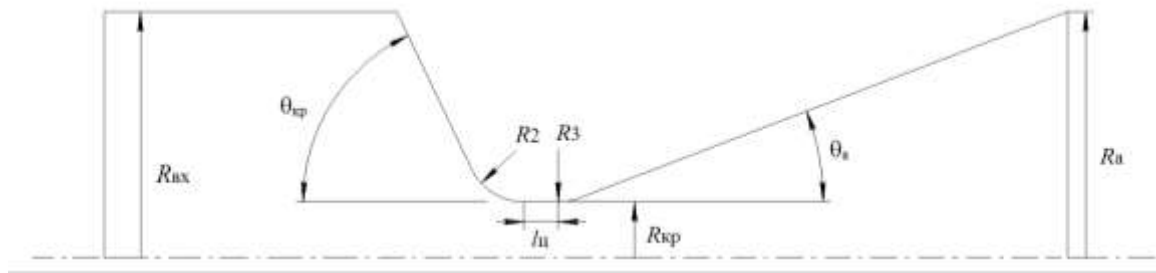


Рис. 1. Исследуемые контуры сопел

Помимо экспериментальных методов, существующие численные методы моделирования позволяют с достаточной точностью определить влияние на коэффициент расхода различных геометрических параметров [Тырышкин, 2010; Сабирзянов, 2016]. В данной работе объектом исследования являлись осесимметричные звуковые и сверхзвуковые сопла различной геометрии (рис. 1). Цель работы – с помощью современных методов вычислительной гидродинамики оценить влияние протяжённости цилиндрического участка в минимальном сечении реактивного сопла в зависимости от его геометрических характеристик на коэффициент расхода.

Моделирование проводилось в рамках осесимметричной, адиабатной, стационарной постановки задачи в идеально-газовом приближении средствами программного продукта ANSYS-Fluent.

Геометрическая модель (рис. 1) помимо камеры сгорания и сопла включала дополнительный объем для истечения струи в свободное пространство, что исключает необходимость определения граничных условий на выходе из сопла.

В качестве граничных условий на входе в камеру сгорания задавалось равномерное распределение давления, температуры и параметров турбулентности потока. Длина камеры сгорания равнялась двум диаметрам минимального сечения. На границах дополнительного объёма (вход и выход) устанавливалось постоянство атмосферного давления и температуры. Стенки камеры сгорания и сопла гладкие, с условиями прилипания и не протекания рабочего тела.

Основные геометрические параметры рассматриваемых звуковых и сверхзвуковых конических сопел: угол наклона контура дозвуковой части сопла $\theta_{\text{кр}}$ изменялся в пределах от 20° до 80° ; $\theta_{\text{а}} = 20^\circ$; относительная площадь

$F_{кр}/F_{вх} = 0,51$; $R_{кр} = 0,005$ м; относительная длина цилиндрического участка \bar{l} изменялась в диапазоне от 0 до 2.

Рабочим телом являлся воздух с начальной температурой $T = 300$ К. Моделирование проведено при $\pi_c = 10$. В качестве модели турбулентности рассматривалась двухпараметрическая модель RNG k - ε с типовым набором модельных констант. Верификация используемых численных подходов представлена в работе [Сабирзянов, 2016].

По результатам моделирования коэффициент расхода рассчитывался по соотношению

$$\mu_c = \frac{\dot{m}}{A(k) p_{oc} F_{кр} / \sqrt{RT_{oc}}}, \quad (1)$$

где \dot{m} – значение действительного расхода, полученное в результате численного решения, p_{oc} , T_{oc} , k и R – давление и температура торможения, отношение теплоёмкостей и равновесное значение газовой постоянной в минимальном сечении сопла, $A(k)$ – газодинамическая функция.

Оценка влияния наличия и протяжённости цилиндрического участка в минимальном сечении сопла на коэффициент расхода проводилась по формуле

$$\Delta_i = \sqrt{\left(\frac{\mu_{(\bar{l}=0)} - \mu_{(\bar{l}=i)}}{\mu_{(\bar{l}=0)}} \right)^2}, \quad \%, \quad (2)$$

где $\mu_{(\bar{l}=0)}$ и $\mu_{(\bar{l}=i)}$ – коэффициент расхода, рассчитанный для вариантов с отсутствием цилиндрического участка и при его наличии с протяжённостью $\bar{l} = i$. Такой подход обеспечивает наглядное представление влияния протяжённости цилиндрического участка в минимальном сечении на абсолютное изменение коэффициента расхода. Наличие цилиндрического участка, как правило, приводит к уменьшению μ_c .

Для звуковых сопел с увеличением угла наклона контура дозвуковой части сопла растёт влияние наличия цилиндрического участка на коэффициент расхода (рис. 2). Следует отметить наглядные отличия в характере влияния, в зависимости от протяжённости цилиндрического участка для различных углов $\theta_{кр}$.

Существенно влияние скругления контура сопла на входе в критическое сечение (R_2) при наличии цилиндрического участка, например, для сопла с $\theta_{кр} = 60^\circ$ влияние уменьшается, а для сопла с $\theta_{кр} = 20^\circ$ – увеличивается (рис. 2).

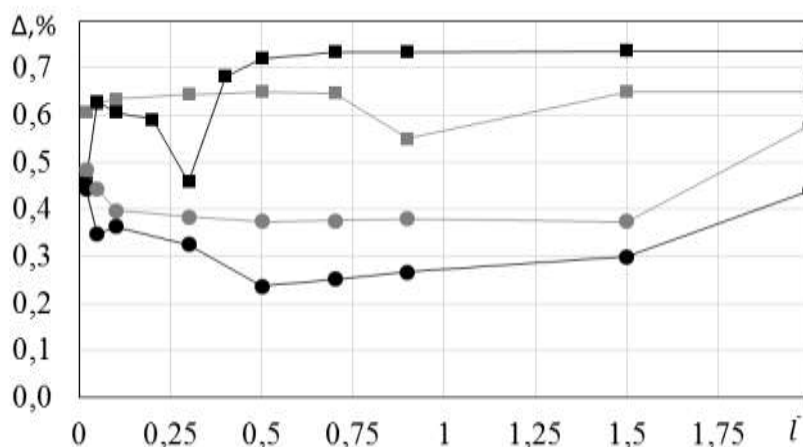


Рис. 2. Зависимость коэффициента расхода конических звуковых сопел от протяженности цилиндрического участка: ● – $\theta_{кр} = 20^\circ, R_2 = 0$; ● – $\theta_{кр} = 20^\circ, R_2 = 0,3$ мм; ■ – $\theta_{кр} = 60^\circ, R_2 = 0$; ■ – $\theta_{кр} = 60^\circ, R_2 = 0,2$ мм

Для сверхзвуковых сопел влияние протяженности цилиндрического участка на коэффициент расхода оказывается меньшее, чем для звуковых (рис. 3). Так, для сверхзвукового сопла с $\theta_{кр} = 60^\circ$ влияние протяженности соизмеримо с влиянием, получаемым на звуковом сопле с $\theta_{кр} = 20^\circ$.

Для сверхзвуковых сопел наибольшее влияние протяженности \bar{l} на коэффициент расхода получено при $\theta_{кр} = 80^\circ$ и $R_2 = R_3 = 0$ (рис. 4) – рост влияния протяженности наблюдается до значения $\bar{l} = 0,5$, а далее существует монотонный характер в пределах исследуемой области. Следует отметить, что наличие скруглений $R_2 = 0,15$ мм при $R_3 = 0$ и $R_2 = 0,15$ мм при $R_3 = 2,25$ мм сводит влияние \bar{l} к значению, не превышающему 0,15 % (рис. 4).

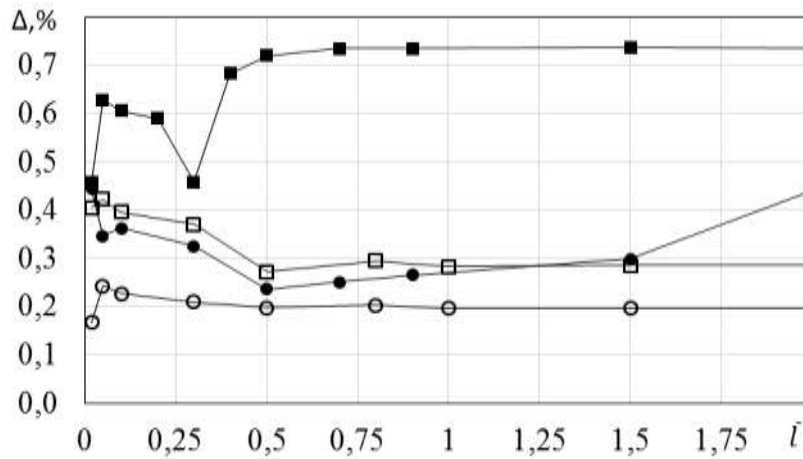


Рис. 3. Зависимость коэффициента расхода конических звуковых (● – $\theta_{кр} = 20^\circ$; ■ – $\theta_{кр} = 60^\circ$) и сверхзвуковых сопел (○ – $\theta_{кр} = 20^\circ$; □ – $\theta_{кр} = 60^\circ$) от протяжённости цилиндрического участка при $R_2 = 0$

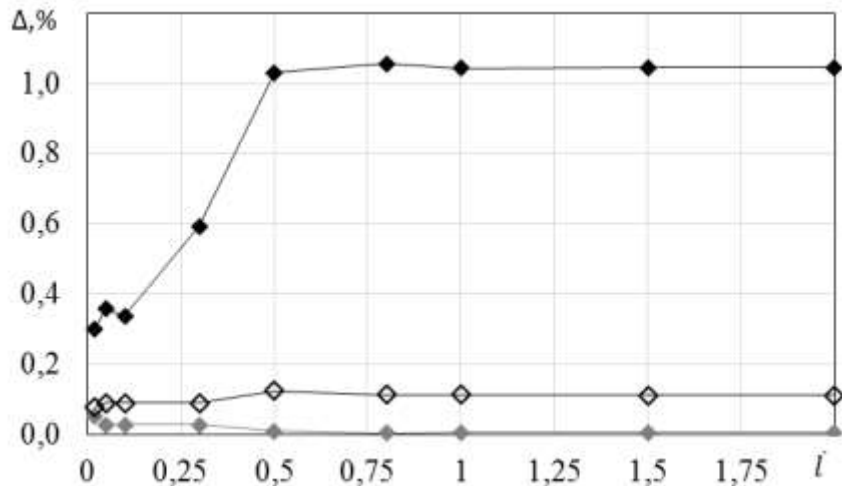


Рис. 4. Зависимость коэффициента расхода конических сверхзвуковых сопел с $\theta_{кр} = 80^\circ$: ◆ – $R_2 = 0, R_3 = 0$; ◆ – $R_2 = 0,15 \text{ мм}, R_3 = 0$; ◇ – $R_2 = 0,15 \text{ мм}, R_3 = 2,25 \text{ мм}$

Для сопел $\theta_{кр} = 20^\circ$ наличие скруглений на входе и выходе цилиндрического участка имеет меньшее влияние, в зависимости от протяжённости \bar{l} , и его характер становится более плавным. Анализ газодинамических параметров потока показал, что его структура в цилиндрическом участке существенно зависит от условий входа.

Различия коэффициентов расхода для сверхзвуковых и звуковых исследуемых сопел при отсутствии цилиндрического участка соответственно составля-

ют 0,1 % для $\theta_{кр} = 20^\circ$ и 0,32 % $\theta_{кр} = 60^\circ$, что соответствует имеющимся данным [1].

Скругления являются технологической особенностью, из чего следует, что для реальных моделей наличие цилиндрического участка и его протяжённость в минимальном сечении сверхзвуковых сопел имеет среднее влияние, не превышающее 0,2 %. Для звуковых сопел получено большее влияние, лежащее в диапазоне 0,3% – 0,4% при малых углах конусности, и с увеличением $\theta_{кр}$ оно возрастает.

Полученные в работе результаты являются предпосылкой дальнейшего исследования влияния протяжённости цилиндрического участка в минимальном сечении для звуковых сопел при различных характеристиках потока.

Библиографический список

1. *Абалаков Г. В.* Экспериментальное исследование критических расходомерных сопел с прямолинейными образующими проточной части / Г. В. Абалаков, В. М. Чефанов, А. П. Герасимов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 1987. № 2. С. 3–7.
2. *Губертов А. М.* Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива / А. М. Губертов, В. В. Миронов, Д. М. Борисов и др. Под ред. А. С. Коротеева. М.: Машиностроение, 2004. 512 с.
3. *Лаврухин Г. Н.* Аэрогазодинамика реактивных сопел. Т. 1. Внутренние характеристики сопел. М.: Наука. ФИЗМАТЛИТ, 2003. 376 с.
4. *Сабирзянов А. Н.* Численное моделирование влияния геометрических параметров сопла на коэффициент расхода ДЛА / А. Н. Сабирзянов, А. Н. Кириллова // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. научно-техн. конф. 22–24 июня 2016 г. Самара: Самарский университет, 2016. Ч. 2. С. 39–40
5. *Тырышкин Р. А.* Применение RANS моделей турбулентности для расчета коэффициента расхода в расходомере со стандартной диафрагмой / Р. А. Тырышкин, В. А. Фафурин, В. В. Фефелов и др. // Вестник Удмуртского университета «Математика. Механика. Компьютерные науки». 2010. Вып. 2. С. 109–116.

Reference:

1. *Abalakov G.V.* Pilot study of critical flow-measuring nozzle with rectilinear forming a flowing part / G.V. Abalakov, V.M. Chefanov, A P. Gerasimov // News of higher educational institutions. Aircraft equipment. 1987. №. 2. P. 3–7.
2. *Gubertov A.M.* Gasdynamic and heatphysical processes in rocket engines of solid fuel / M. Gubertov, V.V. Mironov, D M. Borisov, etc. Under the editorship of A.S. Koroteyev. M.: Mechanical engineering, 2004. 512 p.
3. *Lavrukhin G.N.* Aero gas dynamics of jet nozzle. T. 1. Internal characteristics nozzle. M.: Science. FIZMATLIT, 2003. 376 p.
4. *Sabirzyanov A.N.* Numerical modeling of influence of geometrical parameters of a nozzle on DLA expense coefficient / A.N. Sabirzyanov, A.N Kirillova // Problems and prospects of development of engine-building: reports of international. scientific technical conference. On June 22–24, 2016 Samara: Samara university, 2016. Part 2. P. 39–40
5. *Tyryshkin P.A.* Application of RANS turbulence models for calculation of coefficient of an expense in a flowmeter with a standard diaphragm / R.A. Tyryshkin, V.A. Fafurin, V.V. Fefelov, etc.//the Bulletin of the Udmurt university "Mathematics. Mechanics. Computer sciences". 2010. Issue 2. P. 109–116.