



УДК 621.45.02+536.8+519.6

А. Н. Сабирзянов, А. Н. Кириллова

Многофакторность влияния степени утолщенности сопла на коэффициент расхода

Современными методами вычислительной гидродинамики реализована оценка влияния геометрических параметров утолщенного сопла на совершенство процессов истечения. Проведена верификация численной модели, получено удовлетворительное соответствие численных и экспериментальных результатов исследований потерь удельного импульса. Установлены зависимости коэффициента расхода от геометрических параметров утолщенного сопла. По результатам численных исследований сформулированы некоторые рекомендации для проектирования радиусных утолщенных сопел.

Ключевые слова: газодинамика, ракетные двигатели, реактивные сопла, утолщенные сопла, коэффициент расхода, моделирование.

При разработке современных проектных работ в области создания ракетных двигателей основной целью является повышение скорости, дальности и маневренности летательного аппарата. Улучшить указанные показатели можно, например, увеличив расходные характеристики двигателя.

Одним из параметров, отражающих совершенство процессов истечения из сопла, является коэффициент расхода. Согласно работе [1], коэффициент расхода является интегральным коэффициентом, представляющим собой произведение различных составляющих: газодинамической, двухфазной, а также составляющих, учитывающих изменения площади критического сечения при разгаре и тепловых деформациях деталей и теплофизических свойств потока, проходящего через критическое сечение сопла. Далее они раскладываются на дополнительные, например, газодинамическую можно разложить на составляющие, учитывающие потери давления, неравномерность параметров в сопле, трение в дозвуковой части сопла [1]. Составляющая, учитывающая потери давления, состоит из потерь давления в канале и околосопловой области.

Газодинамические потери составляют основную долю всех потерь. Как правило, они определяются следующими геометрическими параметрами:

- отношением площади минимального сечения сопла к площади сечения камеры на входе в сопло $F_{кр} / F_{вх}$ (степень сужения сопла) [2];

- углом входной части сопла $\theta_{кр}$ [2, 3];
- отношением радиуса скругления входной части R_2 к радиусу минимального сечения $R_{кр}$ [1, 4];
- наличием цилиндрического участка в минимальном сечении сопла продолжительностью $L_{ц}$ [5].

Отличительной особенностью многих ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ) является наличие утолщенного (погруженного) сопла. Его использование позволяет уменьшить габаритные размеры двигателя и, как следствие, избежать увеличения потерь из-за химической неравновесности и рассеяния потока. Улучшение компоновочной схемы РДТТ приводит к появлению дополнительных потерь [6], несомненно меньше указанных, но также требующих учета.

В работах [3, 6] представлены данные потерь удельного импульса из-за утолщенности сопел РДТТ. При изменении степени утолщенности в диапазоне 0,03...0,75 потери удельного импульса варьируются в пределах 0,22 %...1,4 % при содержании алюминия в топливе 5...21,5 %. Здесь и далее под степенью утолщенности имеем в виду отношение длины утолщенной части сопла к длине заряда $\bar{L}_{ут} = L_{ут} / L_3$.

В известных работах [3, 6] отмечается тенденция увеличения потерь удельного импульса из-за увеличения степени утолщенности. При фиксированной степени утолщенности потери удельного импульса увеличиваются с ростом процентной доли содержания конденсированной фазы в продуктах сгорания. Наибольшие потери соответствуют двигателю с

максимальной рассматриваемой степенью утопленности $\bar{L}_{yt} = 0,75$ и высоким содержанием алюминия в топливе 21,5 %. Однако второе место по величине потерь занимает двигатель с 16%-ной долей содержания алюминия при $\bar{L}_{yt} = 0,26$. Данные факты ставят под сомнение указанную тенденцию влияния степени утопленности и содержания конденсированной фазы в продуктах сгорания на потери удельного импульса без учета формы утопленного сопла и, в свою очередь, определяют значимость газодинамической составляющей потерь. Таким образом, приведенные данные свидетельствуют о возможности исследовать влияние степени утопленности на совершенство процессов истечения при рассмотрении гомогенной среды.

В указанных работах не учитываются различные составляющие потерь, т. е. многофакторность влияния степени утопленности сопла на совершенство процессов истечения. Под многофакторностью помимо неоднородности и неравномерности потока на входе в сопло подразумевается и зависимость потерь от различных геометрических параметров утопленной части сопла аналогично указанным ранее для классических осесимметричных сопел (рис. 1).

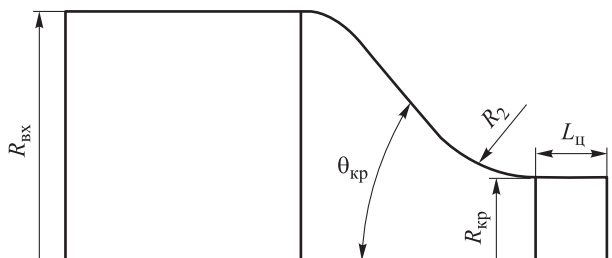


Рис. 1. Геометрические характеристики классического сопла, влияющие на коэффициент расхода

Среди многообразия геометрических форм утопленной части сопла при анализе влияния ее геометрических параметров на совершенство процессов истечения и сопоставления с существующими зависимостями в первую очередь целесообразно рассмотреть ее радиусную форму. Исследование влияния степени утопленности и геометрических параметров утопленной части сопла радиусной формы на газодинамическую составляющую потерь –

актуальный процесс, целью которого является повышение эффективности разрабатываемых и совершенствуемых двигателей.

В настоящей статье для оценки влияния геометрических параметров на совершенство процессов истечения использованы современные методы вычислительной гидродинамики. Моделирование проведено в рамках осесимметричного приближения в идеально-газовой адиабатной постановке стационарной задачи средствами программного продукта *ANSYS Fluent*. Объектом исследования являлись осесимметричные сверхзвуковые утопленные в камеру двигателя сопла.

На основе существующих экспериментальных результатов по исследованию потерь удельного импульса из-за утопленности сопла [3, 4, 6] можно провести верификацию метода численного моделирования [7] для оценки влияния утопленности сопла на потери удельного импульса и, соответственно, использовать данный подход при расчете коэффициента расхода для утопленных сопел.

Верификация расчетной модели проведена согласно схеме, представленной на рис. 2. Рассмотрен двигатель с диаметром минимального сечения $D_{кр} = 200$ мм, цилиндрическим зарядом с конусным участком у заднего днища $L_3 = 2400$ мм. Степень утопленности сопла варьировалась в пределах $\bar{L}_{yt} = 0,09...0,34$. В качестве рабочего тела рассмотрен воздух, подаваемый с поверхности заряда с температурой, соответствующей рабочим условиям.

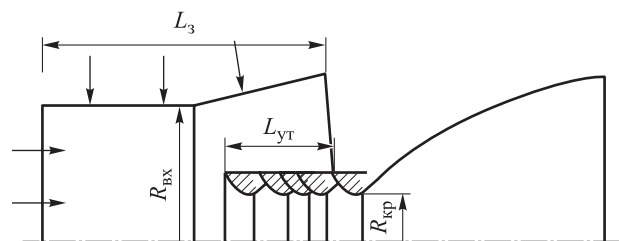


Рис. 2. Геометрическая схема расчетной модели

Геометрическая схема расчета помимо камеры сгорания и сопла содержала дополнительный объем для моделирования истечения струи в свободное пространство, что исключало необходимость определения граничных условий на выходе из сопла. Общее количество



расчетных ячеек составляло порядка 180 тыс., а безразмерное число u^+ , подсчитанное по пристеночному шагу сетки и динамической скорости, на входе в сопло не превышало 35.

Во время проведения исследования были заданы следующие граничные условия моделирования: на поверхности предполагаемого твердого топлива – равномерное распределение расхода рабочего тела, его температура и параметры турбулентности потока; на выходе дополнительного объема – постоянство атмосферного давления; стенки камеры сгорания и сопла гладкие с условиями прилипания и непротекания рабочего тела.

В качестве моделей турбулентности рассмотрена двухпараметрическая модель *RNG k – ε* с типовым набором модельных констант, прошедшая верификацию для данного типа задач [7].

Потери удельного импульса ξ определяются отношением разницы между теоретическим значением удельного импульса и реальным, отнесенной к теоретическому удельному импульсу [8]:

$$\xi = (I_{ид} - I) / I_{ид}.$$

Для сравнения полученных результатов моделирования с известными данными [3, 6] потери удельного импульса ξ можно выразить через эффективную скорость истечения и определить по формуле

$$\xi = \left[\omega_{эф}^{ид} - \left(\omega_a + \frac{p_a - p_H}{\rho_a \omega_a} \right) \right] / \omega_{эф}^{ид},$$

где $\omega_{эф}^{ид}$ – эффективная идеальная скорость истечения;

ω_a – расчетные значения скорости потока на срезе сопла;

p_a – расчетные значения давления на срезе сопла;

p_H – давление в дополнительном объеме, имитирующем окружающую среду;

ρ_a – плотность потока на срезе сопла.

Доля потерь удельного импульса, обусловленная утопленностью сопла $\xi_{ут}$, определяется как отношение разности потерь при наличии погруженности $\xi_{\bar{L}_{ут}}$ и при ее отсутствии $\xi_{\bar{L}_{ут}=0}$ к потерям для неутопленного сопла:

$$\xi_{ут} = \frac{\xi_{\bar{L}_{ут}} - \xi_{\bar{L}_{ут}=0}}{\xi_{\bar{L}_{ут}=0}}.$$

На рис. 3 отражен широкий диапазон изменения потерь удельного импульса в зависимости от степени погружения утопленной части сопла и содержания алюминия в топливе. Расчетные значения потерь, полученные для гомогенной среды, весьма хорошо согласуются с экспериментальными данными при минимальном содержании конденсированной фазы в продуктах сгорания. Удовлетворительные результаты верификации позволяют обосновать возможность исследования коэффициента расхода (только по газодинамической составляющей без учета конденсированной фазы) утопленного сопла РДТТ в зависимости от геометрических характеристик по газодинамической составляющей для расчетной модели с гомогенным рабочим телом.

Переходим к исследованию влияния геометрических характеристик радиусного сопла, погруженного в камеру. По результатам моделирования рассчитаем газодинамическую

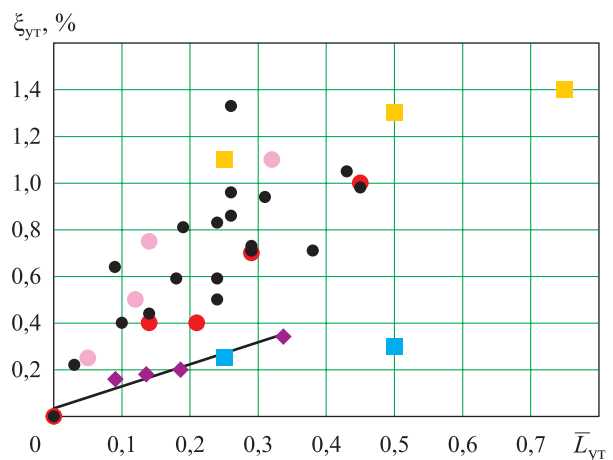


Рис. 3. Влияние степени утопленности сопла на потери удельного импульса:

- – высотные РДТТ с утопленными соплами [3];
- – отечественный экспериментальный РДТТ с содержанием алюминия в топливе 18 % [6];
- – зарубежный экспериментальный РДТТ с содержанием алюминия в топливе 5 % [6];
- – зарубежный экспериментальный РДТТ с содержанием алюминия в топливе 21,5 % [6];
- – экспериментальные данные потерь удельного импульса из-за утопленности сопел РДТТ (США) [6];
- ◆ – исследуемая в данной работе расчетная модель двигателя с гомогенным рабочим телом



составляющую коэффициента расхода по соотношению

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

где \dot{m} – значение действительного расхода;
 $A(k)$ – газодинамическая функция;
 k – отношение теплоемкостей;
 p_{oc} – давление;
 R – равновесное значение газовой постоянной в минимальном сечении сопла;
 T_{oc} – температура торможения на входе в сопло.

Доля влияния степени утолщенности сопла на коэффициент расхода определяется отношением

$$\mu_{yt} = \frac{\mu_{\bar{L}_{yt}=0} - \mu_{\bar{L}_{yt}}}{\mu_{\bar{L}_{yt}=0}},$$

где $\mu_{\bar{L}_{yt}=0}$ – коэффициент расхода с неутолщенным соплом;

$\mu_{\bar{L}_{yt}}$ – коэффициент расхода с текущей степенью утолщенности.

В качестве расчетной геометрической модели использована камера двигателя с цилиндрическим зарядом со сверхзвуковым коническим соплом и радиусной входной погруженной частью (рис. 4). Степень утолщенности варьировалась в диапазоне $0 \dots 0,35$. Длина заряда составила $L_3 = 400$ мм, диаметр минимального сечения – $D_{кр} = 40$ мм. Граничные условия моделирования, рабочее тело, модель турбулентности аналогичны предыдущей модели расчета. Общее число расчетных ячеек порядка 150 тыс.; y^+ на входе в сопло, аналогично предыдущей модели расчета, не превышало 35. Исследуемые геометрические параметры:

- относительный радиус входа утолщенного сопла в минимальное сечение $\bar{R}_2 = R_2/R_{кр}$;
- относительный радиус входа утолщенной части сопла $\bar{R}_b = R_{кр}/R_b$ при постоянном значении R_2 ;
- относительный радиус входа внешней кромки утолщенной части сопла $\bar{R}_3 = R_3/R_{кр}$.

При исследовании влияния относительного радиуса входа утолщенного сопла в минимальное сечение на коэффициент расхода было рассмотрено изменение $\bar{R}_2 = 0,1 \dots 1,0$ для раз-

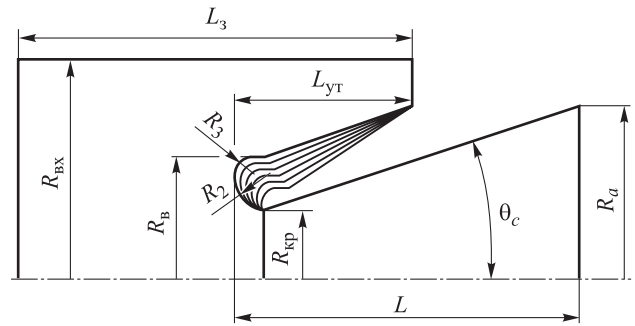


Рис. 4. Схема расчетной геометрической модели:
 θ_c – угол раскрытия сверхзвуковой части сопла

личной степени утолщенности сопла. Установлено, что влияние \bar{R}_2 на коэффициент расхода имеет одинаковый характер как для утолщенных сопел, рассматриваемых в настоящей статье, так и для классических сопел [2, 4] (рис. 5). В работе [4] приведены обобщенные результаты для сверхзвуковых сопел с малыми углами $\theta_{кр}$, что объясняет их более высокие значения. Полученные в настоящей статье результаты хорошо согласуются с данными для сопел с конической сверхзвуковой частью при $F_{кр}/F_{вх} = 0,25$ и $\theta_{кр} = 45^\circ \dots 90^\circ$ [2]. В расчетной модели (см. рис. 4) $F_{кр}/F_{вх} = 0,11$.

Полученные в данной статье результаты относительно степени утолщенности представ-

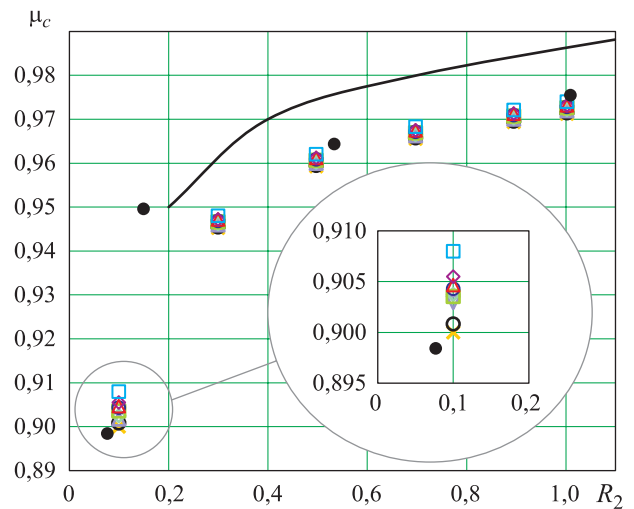


Рис. 5. Влияние \bar{R}_2 на коэффициент расхода для известных [4] (—), [2] (●) при $F_{кр}/F_{вх} = 0,25$, $\theta_{кр} = 45 \div 90$ и проведенных в настоящей статье исследований:

- – $\bar{L}_{yt} = 0$; ◇ – $\bar{L}_{yt} = 0,025$; △ – $\bar{L}_{yt} = 0,05$; ○ – $\bar{L}_{yt} = 0,1$; □ – $\bar{L}_{yt} = 0,15$; ◇ – $\bar{L}_{yt} = 0,2$; △ – $\bar{L}_{yt} = 0,25$;
- – $\bar{L}_{yt} = 0,3$; × – $\bar{L}_{yt} = 0,35$



лены на рис. 6. Показано, что для одинаковой степени утолщенности коэффициент расхода может существенно зависеть от \bar{R}_2 . Следует отметить, что при увеличении \bar{L}_{yt} коэффициент расхода уменьшается при всех рассматриваемых \bar{R}_2 .

Составляющая, учитывающая влияние степени утолщенности относительно неудо-

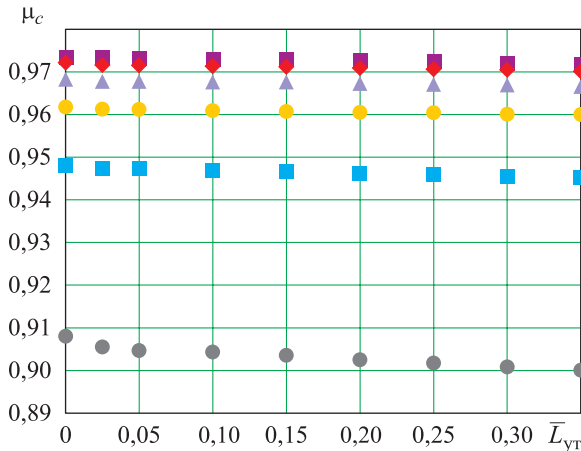


Рис. 6. Влияние радиуса входа в минимальное сечение сопла на коэффициент расхода:
 ■ – $\bar{R}_2 = 1$; ♦ – $\bar{R}_2 = 0,9$; ▲ – $\bar{R}_2 = 0,7$; ● – $\bar{R}_2 = 0,5$;
 ■ – $\bar{R}_2 = 0,3$; ● – $\bar{R}_2 = 0,1$

пленного сопла с соответствующим относительным радиусом и углом входной части сопла $\theta_{кр} = 90^\circ$, изменяется неравномерно для утолщенных сопел с различным \bar{R}_2 (рис. 7). Для сопел с $\bar{R}_2 = 1 \dots 0,5$ погружение сопла в камеру сгорания влияет на потери практически одинаково. При этом доля влияния утолщенности лежит в диапазоне $0 \dots 0,2\%$, тогда как для сопел с относительным радиусом $\bar{R}_2 < 0,5$ это влияние может достигать $0,88\%$. Можно сделать вывод, что сопла с $\bar{R}_2 > 0,5$ можно утапливать глубже без опасности резкого ухудшения расходных характеристик при прочих равных геометрических условиях. При моделировании сопел с \bar{R}_2 меньше $0,5$ необходимо учитывать существенной рост потерь при увеличении степени утолщенности сопла.

Влияние относительного радиуса входа утолщенной части сопла на коэффициент расхода исследовано для геометрической модели с входной частью сопла с постоянным радиусом R_2 и при $R_3 = 0$ (рис. 8). При исследова-

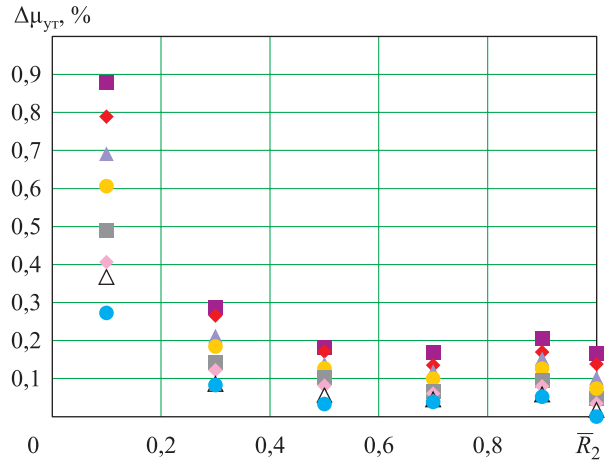


Рис. 7. Влияние радиуса входа в минимальное сечение сопла на относительную составляющую коэффициента расхода, учитывающую влияние степени утолщенности:
 ■ – $\bar{L}_{yt} = 0,35$; ♦ – $\bar{L}_{yt} = 0,3$; ▲ – $\bar{L}_{yt} = 0,25$;
 ● – $\bar{L}_{yt} = 0,2$; ■ – $\bar{L}_{yt} = 0,15$; ◆ – $\bar{L}_{yt} = 0,1$;
 △ – $\bar{L}_{yt} = 0,05$; ● – $\bar{L}_{yt} = 0,025$

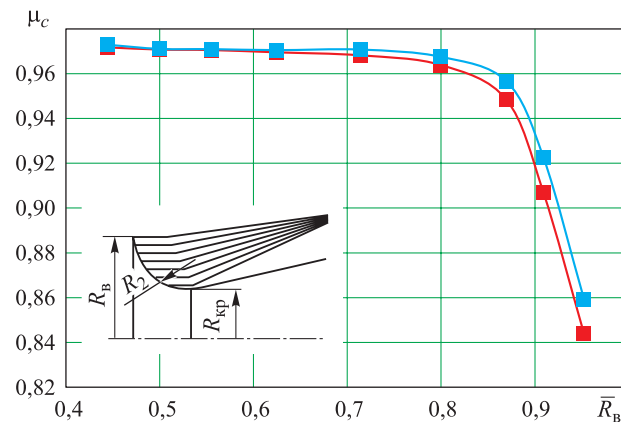


Рис. 8. Влияние относительного радиуса входа утолщенной части сопла на коэффициент расхода:
 ■ – $\bar{L}_{yt} = 0,35$; ■ – $\bar{L}_{yt} = 0,15$

нии влияния \bar{R}_2 радиус R_2 был смоделирован как четверть окружности с началом и концом в горизонтальной и вертикальной плоскости соответственно. С уменьшением радиуса входной части сопла уменьшалась доля окружности. Расчет проведен для максимального относительного радиуса $\bar{R}_2 = 1$.

Полученные результаты служат доказательством того, что независимо от степени утолщенности относительный радиус входа утолщенной части сопла должен быть $\bar{R}_B \leq 0,75$ (см. рис. 8). Дальнейшее уменьшение относительного радиуса входного участка резко ухуд-



шает расходные характеристики при прочих равных геометрических параметрах. Ухудшение коэффициента расхода при уменьшении относительного радиуса входной части с 0,44 до 0,95 достигает 13,16 % при $\bar{L}_{\text{вт}} = 0,35$. При уменьшении степени утопленности влияние на коэффициент расхода уменьшается. В работе [9] приведен рекомендуемый диапазон $\bar{R}_b = 0,48 \dots 0,53$.

Исследование влияния относительного радиуса входа внешней кромки утопленного сопла \bar{R}_3 на коэффициент расхода проводилось при постоянном радиусе R_2 для двух степеней утопленности. Получено, что для $\bar{R}_2 = 1$ влияние несущественно и не достигает 0,1 %. Однако для $\bar{R}_2 = 0,1$ при $\bar{L}_{\text{вт}} = 0,35$ влияние утопленности на коэффициент расхода при изменении $\bar{R}_3 = 0,05 \dots 0,45$ достигает 0,31 %, а для $\bar{L}_{\text{вт}} = 0,15 - 0,29$ % (рис. 9). При этом влияние составляющей, учитывающей степень утопленности, для $\bar{R}_2 = 0,1$ (при изменении \bar{R}_3) и $\bar{L}_{\text{вт}} = 0,35$ варьировалось в пределах $\Delta\mu_{\text{вт}} = 0,8 \dots 1,1$ % и $\Delta\mu_{\text{вт}} = 0,36 \dots 0,64$ % для $\bar{L}_{\text{вт}} = 0,15$. Следует отметить снижение влияния \bar{R}_3 при уменьшении степени утопленности.

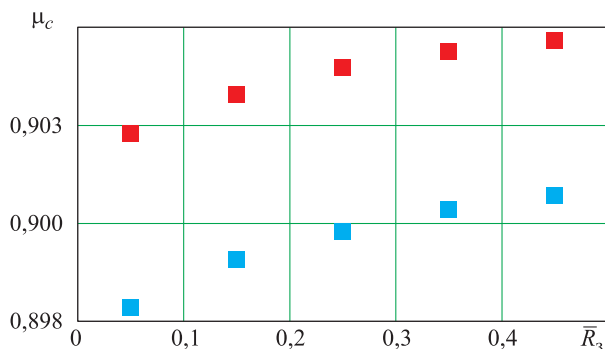


Рис. 9. Влияние относительного радиуса внешней кромки утопленной части сопла на коэффициент расхода:

■ – $\bar{L}_{\text{вт}} = 0,35$; ■ – $\bar{L}_{\text{вт}} = 0,15$

Таким образом, для двигателей с утопленными соплами ухудшение расходных характеристик во многом определяется не только степенью утопленности и содержанием конденсированной фазы в продуктах сгорания, неоднозначность влияния которых подтверждается анализом существующих экспериментальных данных и результатами расчетов,

но и геометрическими параметрами входной части утопленного сопла. Верификация численной модели служит подтверждением возможности использования газодинамической составляющей коэффициента расхода для анализа совершенства процессов истечения в двигателях с утопленными соплами. В ходе численных исследований установлено, что для сопел с равной степенью утопленности коэффициент расхода может изменяться на величину до 13 % при изменении геометрии входной части.

По результатам исследований для проектирования радиусных утопленных сопел можно сформулировать следующие рекомендации:

- проектирование сопла с высокими относительными радиусами \bar{R}_2 и \bar{R}_3 позволит значительно увеличить степень утопленности без роста потерь;
- при необходимости проектирования сопел с малыми \bar{R}_2 и \bar{R}_3 следует учитывать возникновение дополнительных потерь при глубоком погружении сопла в камеру;
- при возникновении необходимости проектирования сопла с малым радиусом \bar{R}_2 рекомендуется использовать больший радиус \bar{R}_3 ;
- не рекомендуется использовать относительный радиус входа утопленной части сопла более $\bar{R}_b = 0,75$, так как при дальнейшем увеличении наблюдается резкий рост потерь.

Список литературы

1. Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива / А. М. Губерт, В. В. Миронов, Д. М. Борисов и др.; под ред. А. С. Коротеева. М.: Машиностроение, 2004. 512 с.
2. Лаврухин Г. Н. Аэрогазодинамика реактивных сопел. В 3 т. Т. 1. Внутренние характеристики сопел. М.: Наука, ФИЗМАТЛИТ, 2003. 376 с.
3. Шликов А. А., Панин С. Д., Румянцев Б. В. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива. М.: Машиностроение, 1989. 240 с.
4. Соколов В. Д., Ягудин С. В. Коэффициент расхода осесимметричных сужающихся сопел с произвольным контуром // Ученые записки ЦАГИ. 1975. Т. VI. № 1. С. 117–121.
5. Кириллова А. Н., Сабирзянов А. Н. Численное моделирование влияния геометрических па-



раметров цилиндрического участка сопла в минимальном сечении на коэффициент расхода // *Материалы X Школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В. Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении»*, 13–15 сентября 2016. Казань, 2016. С. 195–197.

6. Милехин Ю. М., Ключников А. Н., Бурский Г. В., Лавров Г. С. Энергетика ракетных двигателей на твердом топливе. М.: Наука, 2013. 207 с.

7. Сабирзянов А. Н., Кириллова А. Н. Численное моделирование влияния геометрических параметров сопла на коэффициент расхода ДЛА // *Материалы докладов Международной*

научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», 22–24 июня 2016. Ч. 2. Самара: Самарский университет, 2016. С. 39–40.

8. Абугов Д. И., Бобылев В. М. Теория и расчет ракетных двигателей твердого топлива. М.: Машиностроение, 1987. 272 с.

9. Николаев Ю. М., Панин С. Д., Соломонов Ю. С., Сычев М. П. Основы проектирования твердотопливных управляемых баллистических ракет. В 2 ч. Ч. 2. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 140 с.

Поступила 05.12.17

Сабирзянов Андрей Наилевич – кандидат технических наук, доцент кафедры реактивных двигателей и энергетических установок КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева, г. Казань.

Область научных интересов: термогазодинамика, горение, кинетика, теплофизические свойства, моделирование, энергосиловые установки.

Кириллова Анна Николаевна – аспирант КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева, инженер-конструктор третьей категории АО «Казанское ОКБ «Союз», г. Казань.

Область научных интересов: численные методы, решение задачи гидродинамики, моделирование, ракетные двигатели твердого топлива.



Complex effect of recess depth in nozzle design on the discharge coefficient

We used contemporary computational fluid dynamics techniques to evaluate how the geometric parameters of a recessed nozzle affect the perfection of flow processes. We verified our numerical simulation and obtained acceptable agreement between numerical and experimental investigation results in terms of specific impulse loss. We plotted the discharge coefficient as a function of the geometrical parameters of a recessed nozzle. Our numerical investigation forms the basis of certain guidelines we developed for designing arc-based recessed nozzles.

Keywords: gas dynamics, rocket engines, jet nozzles, recessed nozzles, discharge coefficient, simulation.

Sabirzyanov Andrey Nailevich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Jet Engines and Power Plants, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI”, Kazan.

Science research interests: thermodynamics and gas dynamics, combustion, kinetics, thermophysical properties, simulation, power plants.

Kirillova Anna Nikolaevna – post-graduate student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI”, Design Engineer of the third rank, Joint Stock Company “Kazan Experimental Design Bureau “Soyuz”, Kazan.

Science research interests: numerical methods, solution to the hydrodynamic problem, simulation, solid-propellant rocket engine.