

Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 11. С. 515–523
Thermal processes in engineering, 2023, vol. 15, no. 11, pp. 515–523

Научная статья
УДК 629.7.036.5

Результаты теоретического исследования повышения тяги кольцевого сопла с плоским центральным телом

А.А. Киршина¹✉, А.А. Левихин¹, А.Ю. Киршин¹

¹Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

✉kirshina_aa@voenmeh.ru

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы повышения удельных энергетических характеристик ракетного двигателя путем обеспечения расчетного режима работы сопла в широком диапазоне изменения давления окружающей среды. Одним из возможных путей ее решения является использование сопел со свободной границей струи на базе кольцевого сопла с плоским центральным телом, оптимизация конструкции которого методами численного эксперимента является весьма трудоемким процессом, требующим выполнения большого количества вычислений. Целью работы является разработка инженерной методики построения газодинамического профиля кольцевого сопла с центральным телом. Ее верификация осуществлялась путем сравнения полученных результатов с результатами моделирования в программном пакете ANSYS Fluent. В итоге были сформулированы рекомендации по построению оптимального газодинамического профиля кольцевого сопла с плоским центральным телом.

Ключевые слова: кольцевое сопло с плоским центральным телом, сопло Тарасова — Левина, ракетный двигатель, выходное устройство, тяговые характеристики

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в ходе реализации проекта «Создание опережающего научно-технического задела в области разработки передовых технологий малых газотурбинных, ракетных и комбинированных двигателей сверхлегких ракет-носителей, малых космических аппаратов и беспилотных воздушных судов, обеспечивающих приоритетные позиции российских компаний на формируемых глобальных рынках будущего», № FZWF-2020-0015.

Для цитирования. Киршина А.А., Левихин А.А., Киршин А.Ю. Результаты теоретического исследования повышения тяги кольцевого сопла с плоским центральным телом // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 11. С. 515–523. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=177597>

Original article

Theoretical studying results of thrust increasing of the annular nozzle with a flat central body

A.A. Kirshina^{1✉}, A.A. Levikhin¹, A.Yu. Kirshin¹

¹Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg, Russia
✉kirshina_aa@voenmeh.ru

Abstract. The article considers the problems concerning the rocket engine specific energy characteristics enhancing are by ensuring the rated operating mode of the nozzle in a wide range of the ambient pressure variation. One of the possible ways to this problem solution consists in employing the nozzles with a free jet boundary based on an annular nozzle with a flat central body, which structure optimization with the numerical experiment methods is exceedingly labor-intensive process that requires a large number of computations. The purpose of the presented work consisted in developing an engineering technique for constructing a gas-dynamic profile of an annular nozzle with a central body. The said technique verification was performed by comparing the obtained results with the simulation results by the ANSYS Fluent software package. All in all recommendations on the optimal gas-dynamic profile constructing of an annular nozzle with a flat central body were formulated.

Keywords: annular nozzle with a flat central body, Tarasov — Levin nozzle, rocket engine, outlet unit, propulsion performances

Funding. The work was financed by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation while realizing the project No. FZWF-2020-0015 “Creation of an advanced scientific and technical basis in the field of high-end technologies development of small gas turbine, rocket and combined engines of ultra-light launch vehicles, small spacecraft and unmanned aircraft, ensuring priority positions of Russian companies in the emerging global markets of the future”.

For citation. Kirshina A.A., Levikhin A.A., Kirshin A.Yu. Theoretical studying results of thrust increasing of the annular nozzle with a flat central body. *Thermal processes in engineering*, 2023, vol. 15, no. 11, pp. 515–523. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=177597>

Введение

Одним из способов повышения энергетической эффективности реактивных, в том числе ракетных двигателей, является обеспечение расчетного режима работы сопла на всех участках траектории движения летательного аппарата. Это может быть реализовано конструктивными способами путем изменения геометрии традиционно используемых круглых осесимметричных сопел, либо путем применения сопел со свободной границей струи — штыревое, тарельчатое, клиновоздушное и некоторые другие [1, 2].

С учетом того что результирующая сила давления по наружной поверхности в проекции на направление пустотной тяги равна $\delta P_{нар} = -F_a P_n$, где F_a и P_n — площадь в выходном сечении сопла и барометрическое давление окружающей среды соответственно, получаем, что эффект от исполь-

зования сопел со свободной границей струи особенно заметен при использовании на начальном участке траектории, когда P_n имеет максимальное значение и вклад $\delta P_{нар}$ существенен. Особое значение это приобретает для перспективных одноступенчатых средств выведения [3].

Схема компоновки с соплом типа aerospike обычно представляет собой двигатель, состоящий из нескольких камер с соплом Лавала. Оси этих камер расположены под углом к оси двигательной установки, чтобы продукты сгорания истекали вдоль поверхности центрального тела. Такая организация потока упрощает управление вектором тяги путем отключения отдельных камер [4]. Несмотря на известные преимущества сопла типа aerospike, его практическая реализация затруднена в основном из-за относительно большой поверхности центрального тела, что делает невозможным его охлаждение традиционными методами. При-

менение aerospike с укороченным центральным телом приводит к формированию «закрытой» донной области за плоским срезом, где могут возникать низкочастотные колебания из-за сложных газодинамических процессов, происходящих в донной области [5, 6].

Исследуемое кольцевое сопло в отличие от сопел с профилированным центральным телом имеет кольцевое сопло с плоским срезом, представляет собой модификацию хорошо известного сопла Тарасова — Левина с резонаторным усилителем тяги, отличающегося принципом своей работы.

Схема рассматриваемого сопла в отличие от сопел с профилированным центральным телом и клиновоздушного сопла имеет кольцевое сопло с плоским срезом. Такая компоновка, с одной стороны, вызывает увеличенные потери полного давления в струе из-за разворота потока, но с другой — позволяет значительно снизить массогабаритные характеристики, существенно уменьшить тепловые потоки в конструкцию, сократить временные и ресурсные затраты на изготовление.

В работах О.Н. Засухина [7] показано, что колебаний, присущих соплам типа aerospike, при истечении потока внутрь к оси симметрии не возникает. Наличие центральной застойной области, давление в которой выше наружного, эквивалентно профилированному центральному телу с переменной геометрией.

Исследования влияния сопел со сферическим центральным телом (резонатором) на тяговые характеристики пульсирующих воздушно-реактивных двигателей и воздушно-реактивных двигателей проводились авторскими коллективами под руководством С.Ю. Ларионова, А.И. Тарасова и В.И. Богданова [8–12]. Во всех этих исследованиях авторы экспериментально показывают эффективность использования такого сопла в составе двигателя.

Тем не менее следует отметить, что в настоящее время нет методик для проведения параметрической оптимизации для двигателей с кольцевым соплом, оснащенных плоским центральным телом.

Тяговые характеристики и потери удельного импульса у такого типа сопла зависят от трех основных параметров: площади донной области центрального тела, площади критического сечения и угла разворота внутренней кромки сопла относительно оси симметрии.

Существующая потребность в оптимизации конструкции сопел внешнего расширения для до-

стижения наименьших потерь удельного импульса и достижения прогнозируемого значения тяги в каждом отдельном случае приводит к применению методик вычислительного эксперимента, что является чрезвычайно трудоемким процессом, требующим выполнения большого количества вычислений. Процессы течения газа в донной области сопровождаются сложными ударно-волновыми явлениями, которые требуют значительного времени для численных расчетов.

Актуальной на сегодняшний день задачей является формирование облика сопла, у которого механико-геометрические соотношения в потоке соответствуют максимальной тяге, удельному импульсу.

Для ее решения предлагается применить подход, который комбинирует полуэмпирическую модель и CFD-моделирование. На основе этого подхода разработана инженерная методика, которая позволяет проводить оценку тяги и, следовательно, определять удельный импульс камеры [13].

В исследовании представлены результаты увеличения тяги ракетного двигателя с кольцевым соплом, оснащенным плоским центральным телом.

Объектом исследования является кольцевое сопло с плоским центральным телом. Геометрия сопла представлена на рис. 1, макет сопла прошел натурные испытания на лабораторном стенде. Определяющими размерами сопла являются площадь критического сечения (площадь кольцевого зазора) — $F_* = 2,55 \times 10^{-4}$, м², площадь выходного сечения сопла $F_a = 7,52 \times 10^{-4}$, м². Площадь входного сечения сопла соответствует площади камеры сгорания стендового жидкостного ракетного двигателя $F_{ch} = 5,67 \times 10^{-3}$, м².

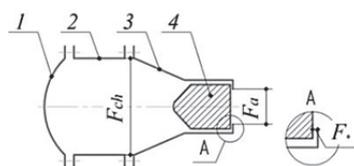


Рис. 1. Геометрия кольцевого сопла с плоским центральным телом: 1 — смесительная головка, 2 — камера сгорания, 3 — сопло, 4 — центральное тело. F_{ch} — площадь входного сечения, F_* — площадь критического сечения (кольцевого зазора), F_a — площадь выходного сечения сопла

Анализ тяги камеры с кольцевым соплом с плоским центральным телом

В соответствии с инженерной методикой расчета тяги [13] зависимость тяги от геометрических и тер-

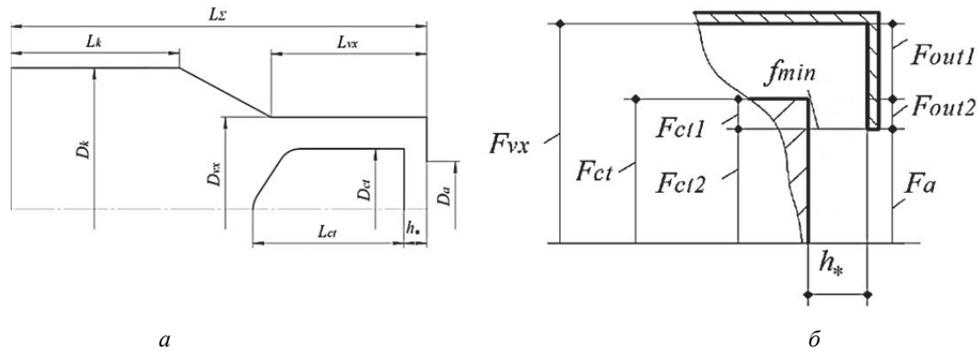


Рис. 2. Схема профиля камеры: *a* — размеры камеры, *б* — размеры выходного сечения сопла; h_* — щелевой зазор, D_i — диаметр соответствующего сечения, L_i — длина соответствующего сечения, F_i — площадь соответствующего сечения, f_{min} — площадь минимального сечения, F_{out1}, F_{out2} — площади стенок выходного сечения сопла, F_{ct1}, F_{ct2} — площади стенок центрального тела

молекулярных параметров выглядит следующим образом:

$$P_f = p_k (F_a - F_{vx}) k_a + p_k [F_a f + k_{ct} (F_{vx} - F_{ct})] + m W_* (g - k_{w*}), \quad (1)$$

где P_f — тяга, \dot{m} — суммарный массовый расход, W_* — скорость в критическом сечении, p_k — давление в камере сгорания, F_i — площадь соответствующего сечения, $g, f, k_{w*}, k_{ct}, k_a$ — расчетные коэффициенты.

Данная запись справедлива для схемы, представленной на рис. 2, при выполнении следующих условий и ограничений: $F_{out2} = F_{ct} - F_a$, $F_{out1} = F_{vx} - F_{ct}$, $F_{ct1} = F_{ct} - F_a$, $F_{ct2} = F_a$.

Расчетные коэффициенты $k_{ct} = 0,044$, $k_a = 0,078$, $k_{w*} = 0,189$ не зависят от давления внешней среды в отличие от коэффициентов скорости — g , давления — f , которые от внешней среды зависят и определяются по рис. 3.

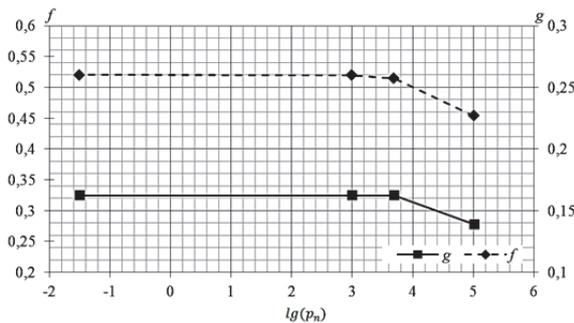


Рис. 3. Изменение параметров давления и скорости от воздействия внешнего давления $\lg(p_n)$

Анализ составляющих формулы тяги (1) заключается в оценке величин площадей соответствующих составляющим тяги. Для этого рассматриваются составляющие формулы (1):

$$p_k (F_a - F_{vx}) k_a, \\ F_a f + k_{ct} (F_{vx} - F_{ct}).$$

Неизменным условием формирования профиля сопла является соотношение площади входного сечения F_{vx} , выходного сечения F_a , площади центрального тела F_{ct} (2):

$$F_{vx} > F_a, F_{vx} > F_{ct}. \quad (2)$$

Отсюда следует: $F_a - F_{vx} < 0, F_{vx} - F_{ct} > 0$.

Отрицательное воздействие на значение тяги оказывает составляющая:

$$p_k (F_a - F_{vx}) k_a < 0.$$

Способом минимизации ее отрицательного вклада может быть снижение разности площадей ($F_a - F_{vx}$).

Приняв значение площади выходного сопла F_a постоянным и неизменным параметром, площадь входного сечения сопла F_{vx} может принимать следующее минимальное значение и рассчитывается по формуле:

$$F_{vx} = F_{ct} + f_* A_1,$$

где коэффициент масштаба A_1 должен удовлетворять следующим условиям:

$$A_1 \rightarrow 1, A_1 \neq 1.$$

Неопределенным соотношением площадей при формировании профиля сопла является соотношение площади центрального тела F_{ct} относительно площади выходного сечения сопла F_a .

Для его определения формула записи тяги (1) приводится к виду:

$$P_f = p_k [F_a (f + k_a) - F_{ct} k_{ct} - F_{vx} (k_a - k_{ct})] + m W_* (g - k_{w*})$$

и анализируется составляющая тяги:

$$F_a (f + k_a) - F_{ct} k_{ct}.$$

Зная, что коэффициенты f, k_a, k_{ct} принимают положительные значения [13]:

$$f + k_a > k_{ct},$$

определим соотношение составляющих:

$$F_a(f + k_a) > F_{ct} \times k_{ct}.$$

При условии, что площадь центрального тела F_{ct} не может быть меньше площади выходного сечения сопла F_a , то есть:

$$F_{ct} \geq F_a,$$

рекомендованным соотношением площадей является равенство площади центрального тела F_{ct} и площади выходного сечения сопла F_a :

$$F_{ct} = F_a.$$

Результаты сравнения геометрии сопел

Сравнение первоначальной геометрии (рис. 4, а) и геометрии, построенной по приведенным выше рекомендациям (рис. 4, б), проводилось в программной среде ANSYS Fluent.

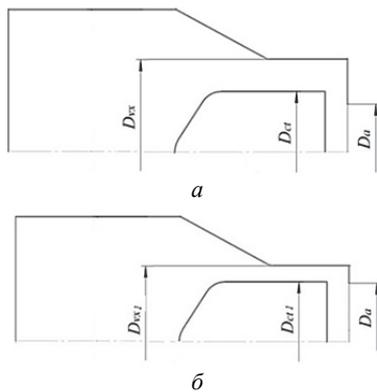


Рис. 4. Схема профиля: а — исходный профиль, б — измененный профиль

Решение двумерной задачи выполнялось в стационарной осесимметричной постановке с использованием программного пакета ANSYS Fluent.

В математической модели используются уравнения Навье — Стокса, осредненные по Рейнольдсу, применительно к идеальному газу:

– уравнение сохранения массы для двумерной стационарной осесимметричной постановке задачи:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = 0,$$

где ρ — плотность, кг/м³, v_x — осевая скорость, м/с, v_r — радиальная скорость, м/с, r — радиальная координата, x — осевая координата;

– уравнение сохранения импульса, в двумерной стационарной осесимметричной постановке задачи

уравнения сохранения осевого и радиального импульса принимает вид (3)–(4) соответственно:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_x) = \\ & = \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] + \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где μ — динамическая вязкость, кг/(м·с);

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) = \\ & = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] + \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] - \\ & - 2 \mu \frac{v_r}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \cdot \vec{v}), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r}$;

– уравнение энергии:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(k_T + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right],$$

где u_i — скорость потока, м/с, E — полная энергия, Дж, p — давление, Па, k_T — коэффициент теплопроводности Вт/(м·К), c_p — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К), μ_t — турбулентная вязкость, кг/(м·с), Pr_t — турбулентное число Прандтля, T — температура, К, $(\tau_{ij})_{eff}$ — тензор девиаций напряжений.

Система уравнений дополняется SST-модификацией k- ω модели турбулентности. Модель турбулентности k- ω SST показывает хорошую сходимость с результатами экспериментов [14, 15] и описывается уравнениями (5), (6):

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k, \quad (5)$$

где k — кинетическая энергия турбулентности, Дж/кг, Γ_k — эффективный коэффициент диффузии, G_k — интенсивность турбулентной кинетической энергии, Y_k — кинетическая энергия диссипации,

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega, \quad (6)$$

где ω — удельная скорость рассеивания турбулентности, $1/c$, G_ω — эффективная диффузионная способность ω , G_ω — интенсивность ω , Y_ω — диссипация ω , D_ω — перекрестная диффузия.

Для установления связи между давлением и скоростью в программной среде используется метод Coupled, схема третьего порядка MUSCL используется для аппроксимации по скорости, плотности, турбулентной кинетической энергии, удельной скорости диссипации и энергии. Для аппроксимации по давлению применяются уравнения второго порядка.

Для проведения расчета для двух различных геометрий была создана тетраэдрическая неструктурированная сетка.

Размеры ячеек сетки для изначальной геометрии, как показано на рис. 5, а, составляют 760 359 расчетных ячеек и 383 897 узлов. В пограничном слое плотность сетки увеличивается. Размер первого слоя — 1,7 мкм, скорость увеличения — 1,2. Общее количество слоев — 10. Размер сеточных элементов у стенки обеспечивает значение y^+ приблизительно равное 1.

Размеры ячеек сетки для измененной геометрии (рис. 5): общее количество расчетных ячеек — 779 579, количество узлов — 392 913. Для улучшения точности расчета пограничного слоя производится сгущение сетки в направлении внутренних стенок камеры; параметры сгущения соответствуют условиям, определенным при построении сетки для исходной геометрии.

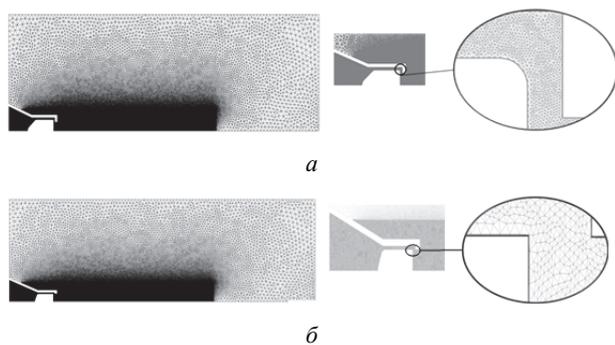


Рис. 5. Расчетная сетка: а — исходный профиль, б — измененный профиль

Подробно методика численного расчета представлена в [13]. Отметим лишь, что расчет тяги осуществлялся в программе ANSYS Fluent с применением различных типов граничных условий на внутренних поверхностях камеры.

Результат сравнения тяги камеры с кольцевым соплом с плоским центральным телом в зависимости

сти от давления внешней среды в логарифмических координатах представлен на рис. 6.

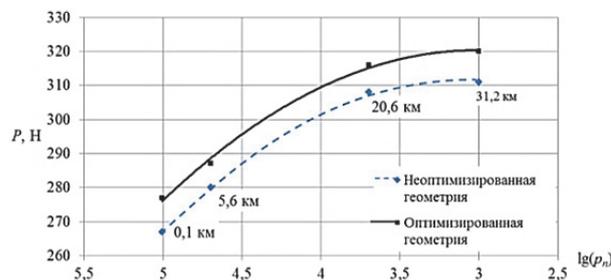


Рис. 6. Зависимость тяги сопла P, Н от давления окружающей среды $\lg(p_n)$, где p_n — давление окружающей среды, Па

В результате проведенного моделирования численно определен рост тяги у сопла оптимизированной геометрии. Увеличение тяги составило 4% на участке давления внешней среды от 50 000 до 101 325 Па и 3% на участке от 5 000 до 0,0319 Па.

Валидация методики расчета методом численного моделирования

Валидация результатов численного метода определения тяги проводилась путем сравнения с результатами, полученными на основе аналитических зависимостей для круглого осесимметричного сопла:

$$P = P_{расч} + F_a(p_a - p_n),$$

$$P_{расч} = \dot{m}_\Sigma \sqrt{2n / (n - 1) \cdot R T_k \cdot \left[1 - (p_a / p_k)^{\frac{n-1}{n}} \right]},$$

где p_k, p_a — давление в камере сгорания и давление на срезе сопла соответственно, n — показатель процесса, R — газовая постоянная в камере, T_k — температура в камере сгорания.

Расчетный режим работы сопла Лавале осуществлялся при давлении $p_a = p_n = 50\,000$ Па. Расчет тяги на нерасчетном режиме проводился при значении давления окружающей среды $p_n = 101\,325$ Па.

Сравнение значений тяги, полученных через программное моделирование и аналитические методы, подтверждает достоверность численного моделирования и его применимость для анализа процессов, происходящих в камере с исследуемым соплом (табл. 1).

Табл. 1. Сравнение тяги сопла Лавале

Условие истечения	Тяга, Н	
	Численное моделирование	Аналитическое значение
$p_n=101\,325$ Па	268	267
$p_n=p_a=50\,000$ Па	307	306

Рекомендации выбора площади выходного сечения сопла F_a

Ранее введенные рекомендации по соотношению площади входного сечения $F_{вх}$, площади центрального тела основывались на допущении постоянства и заранее утвержденном значении площади выходного сечения F_a . В отличие от камеры с соплом Лавалья, где выходная площадь сопла определяется исходя из расчетного режима работы двигателя, в случае сопла с центральным телом для определения площади выходного сечения сопла необходимо определить оптимальное выходное давление, при проектировании на которое значение тяги во всем диапазоне будет стремиться к своему максимальному значению.

Сравнение влияния расчетного выходного давления на тягу камеры с кольцевым соплом с плоским центральным телом производилось методом численного моделирования по ранее описанной методике. Геометрии сопел были спроектированы на расчетное давление 0,068 МПа, 0,059 МПа, 0,025 МПа. Моделирование производилось для давления внешней среды в диапазоне от 101 325 до 1000 Па, что соответствует высоте полета от 0 до 31 200 м. Результат проведенных расчетов представлен на рис. 7.

Таким образом, определено, что интегральные значения тяги всех геометрий сопел в пределах высот от 0 до 5,6 км остаются одинаковыми. Однако при этом замечено, что скорость увеличения тяги у геометрии, рассчитанной на давление 0,025 МПа, превышает остальные.

В интервале высот от 5,6 до 31,2 км тяга сопла, рассчитанная на давление 0,025 МПа, превышает тягу геометрий, рассчитанных на давления 0,068 и 0,059 МПа.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что интегральное изменение тяги выше у геометрии, рассчитанной на давление 0,025 МПа.

Стоит отметить, что для ракетного двигателя важным фактором являются массогабаритные параметры. Проведя аналитическую оценку массы сопел, масса сопла, рассчитанная на давление 0,025 МПа, на 45% больше, чем масса сопла, рассчитанная на более высокое внешнее давление.

Анализ полученных результатов

Анализ простых алгебраических зависимостей, которые входят в основу инженерной методики, позволил сформировать рекомендации по формированию первоначального облика кольцевого сопла

с плоским центральным телом, которые затем были подтверждены с использованием метода численного моделирования.

Рекомендации по формированию профиля сопла:

- величина зазора между внешней обечайкой и центральным телом должна быть минимальна и быть больше площади критического сечения камеры ракетного двигателя;

- диаметр выходного сечения сопла и диаметр центрального тела должны быть равны;

- выбор давления на срезе сопла, на которое формируется выходная площадь сопла, влияет на значение тяги. При этом стоит иметь в виду, что построение сопла на большую геометрическую степень расширения приводит не только к увеличению тяги, но и к росту массы сопла, что необходимо учитывать при формировании облика. В соответствии с рис. 7 можно определить рекомендуемые значения давлений в зависимости от назначения сопла. Так, для атмосферозависимых летательных аппаратов рекомендуемое давление на срезе должно соответствовать от 1 до 0,068 МПа. Для двигателей летательных аппаратов, работающих в широком диапазоне высот, оптимальным с точки зрения тяги и массогабаритных размеров является результат проектирования сопла на давление 0,05–0,06 МПа. Для двигателей летательных аппаратов — 0,25 МПа и ниже.

При выполнении ранее указанных условий и ограничений по формированию облика камеры теоретическое значение тяги камеры может увеличиться до 4% по сравнению с неоптимизированной геометрией.

Заключение

В настоящей работе предложены рекомендации по формированию облика кольцевого сопла с плоским центральным телом. Выполнение данных рекомендаций позволит повысить тягу и, как следствие, удельный импульс двигателя. На тягу, режимы течения кольцевого сопла с плоским центральным телом влияет варьирование размеров, формирующих кольцевое критическое сечение; соотношение центрального тела и площади выходного сечения сопла, то есть донной области центрального тела.

Рекомендации содержат ряд геометрических соотношений, которые были получены исходя из анализа алгебраических зависимостей, включенных в формулу тяги. В сравнении с геометрией сопла, построенной по произвольному геометриче-

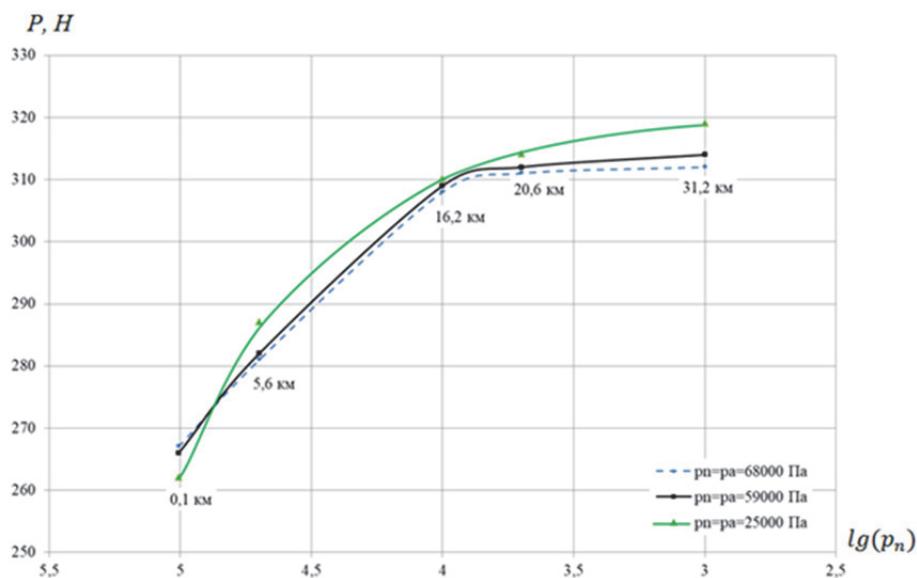


Рис. 7. Зависимость тяги сопла $P = f(\lg(p_n))$, p_n — давление внешней среды, Па; \diamond — характеристика сопла, рассчитанного на давление внешней среды 68 000 Па; \blacksquare — характеристика сопла, рассчитанного на давление внешней среды 59 000 Па; \blacktriangle — характеристика сопла, рассчитанного на давление внешней среды 25 000 Па

скому соотношению, рост тяги у геометрии оптимизированного сопла может достигать 4%. Такой рост отмечается в широком диапазоне работы сопла, что было подтверждено методом CFD моделирования. Формирование облика сопла по рекомендованным геометрическим соотношениям позволит приблизиться к достижению максимальной тяги, удельному импульсу камеры с кольцевым соплом с плоским центральным телом.

Список источников

1. Ваулин С.Д., Хажиахметов К.И. Жидкостные ракетные двигатели с центральным телом: состояние и перспективы // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 10. С. 74–83. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-10-74-83.
2. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: учебник / под редакцией Д.А. Ягодникова. Москва: МГТУ им. Баумана, 2020. 472 с.
3. Кольцова Т.А. Численное моделирование течения в донной области многоразовой многоступенчатой ракеты-носителя в полете с учетом работающего двигателя внешнего расширения с центральным телом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 5. С. 392–398.
4. Kbab Hakim, Hamitouche Toufik, Mouloudj Y. Study and Simulation of the Thrust Vectoring in Supersonic Nozzles // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. 2022. Vol. 93. No. 1. P. 13–24. DOI: 10.37934/arfmnts.93.1.1324
5. Bulat P., Komar K., Prodan N., Volkov K. Oscillatory and transient flow modes in block nozzle arrangements with a base region // Acta Astronautica. 2022. Vol. 194. P. 532–543. DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.11.022
6. Bulat P.V., Zasukhin O.N., Upyrev V.V., Silnikov M.V., Chernyshov M.V. Base pressure oscillations and safety of load launching into orbit // Acta Astronautica. 2017. Vol. 135. P. 150–160. DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.11.042
7. Донное давление: сборник научных статей Международного научного подразделения Университета ИТМО «Механики и энергетических систем» / ЦТТ «КУЛОН»; БГТУ «ВОЕНМЕХ»; Университет ИТМО; под редакцией П.П. Булата. Краснодар: «Издательский дом — ЮГ», 2016. 196 с.
8. Ларионов С.Ю. Расчетно-экспериментальное исследование течения совершенного газа в резонаторе пульсирующего детонационного двигателя: дисс. ... канд. техн. наук. Москва: Московский авиационный институт, 2012. 123 с.
9. Левин В.А., Мухин А.Н., Афонина Н.Е., Богданов В.Н., Хмелевский А.Н. Измерения тяги в моделях кольцевых сопел с дефлектором // XLIV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Сборник тезисов. В 2 т. Москва, 2020. Т. 2. С. 157–159.
10. Богданов В.И., Ханталин Д.С. Выходные устройства с резонаторами-усилителями тяги для реактивных двигателей // Инженерно-физический журнал. 2022. Т. 95. № 2. С. 448–458.
11. Богданов В.И., Кувтырев Д.В., Ханталин Д.С. Сопло со сферическим резонатором — усилителем тяги: анализ влияния его размерности на тяговые характеристики, оптимизация облика // Вестник Ры-

бинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2020. № 2 (53). С. 22–28.

12. **Богданов В.И., Кузнецов С.П., Кувтырев Д.В., Ханталин Д.С.** Особенности расчёта сопла с резонатором-усилителем тяги и эксперимент в составе малоразмерного ГТД // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2021. № 3 (58). С. 9–13.
13. **Киршина А.А., Левихин А.А., Киршин А.Ю.** Численная методика расчета тяги сопла широкодиапазонного ракетного двигателя // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22. № 5. С. 1016–1024. DOI: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-1016-1024
14. **Chaudhuri A., Hadjadj A.** Numerical investigations of transient nozzle flow separation // *Aerospace Science and Technology*. 2016. Vol. 53. P. 10–21.
15. **Menter F.R.** Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // *AIAA Journal*. 1994. Vol. 32. No. 8. P. 1598–1605.

References

1. **Vaulin S.D., Khazhiakhmetov K.I.** Zhidkostnye raketnye dvigateli s tsentral'nym telom: sostoyanie i perspektivy [Liquid rocket engines with a central body: status and prospects]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie*, 2021, no. 10, pp. 74–83 (In Russ.). DOI: 10.18698/0536-1044-2021-10-74-83
2. **Dobrovolsky M.V.** Zhidkostnye raketnye dvigateli. Osnovy proektirovaniya [Liquid rocket engines. Design Fundamentals]. Study book. Ed. by D.A. Yagodnikov. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2020, 472 p. (In Russ.)
3. **Koltsova T.A.** Numerical simulation of flow in the bottom of a reusable one-stage launch vehicle in flight with a running externally expanded cruise engine with a central body and gas intaken in the bottom. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2019, no 5, pp. 392-398. (In Russ.)
4. **Kbab Hakim, Hamitouche Toufik, Mouloudj Y.** Study and Simulation of the Thrust Vectoring in Supersonic Nozzles. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2022, vol. 93, no. 1, pp. 13–24. DOI: 10.37934/arfmnts.93.1.1324
5. **Bulat P., Komar K., Prodan N., Volkov K.** Oscillatory and transient flow modes in block nozzle arrangements with a base region. *Acta Astronautica*, 2022, vol. 194, pp. 532–543. DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.11.022
6. **Bulat P.V., Zasukhin O.N., Upyrev V.V., Silnikov M.V., Chernyshov M.V.** Base pressure oscillations and safety of load launching into orbit. *Acta Astro-*

nautica, 2017, vol. 135. P. 150–160. DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.11.042

7. Ground pressure: collection of scientific articles of the International scientific division of ITMO University «Mechanics and power systems» / Center of a transfer of technologies «KULON»; BGTU «MILITARY MECHANICAL INSTITUTE»; ITMO University; under P.V. Bulat's edition. Krasnodar: Publishing house — South, 2016, 196 p. (In Russ.)
8. **Larionov S.Yu.** Raschetno-eksperimental'noe issledovanie techeniya sovershen'nogo gaza v rezonatore pul'siruyushchego detonatsionnogo dvigatelya [Computational and experimental study of the flow of perfect gas in the resonator of a pulsating detonation engine]. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Moscow: Moscow Aviation Institute (national research university). 2012, 123 p. (In Russ.)
9. **Levin V.A., Muhin A.N., Afonina N.E., Bogdanov V.N., Khmelevsky A.N.** Thrust force measurements in annular nozzle models with deflector. *XLIV Academic space conference dedicated to the memory of academician S.P. Korolev and other outstanding national scientists — pioneers of space exploration abstracts*. In 2 vol. Moscow, 2020. Vol. 2, pp. 157–159. (In Russ.)
10. **Bogdanov V.I., Khantalin D.S.** Exit devices with resonators-thrust amplifiers for jet engines. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2022, no. 2, vol. 95, pp. 448–458. (In Russ.)
11. **Bogdanov V.I., Kuvtyrev D.V., Khantalin D.S.** Nozzle with a spherical resonator — thrust augmentor: analysis of dimension impact on propulsion performances, concept optimization. *Vestnik Rybinskoi gosudarstvennoi aviatsionnoi tekhnologicheskoi akademii im. P.A. Solov'eva*, 2020, no. 2 (53), pp. 22–28. (In Russ.)
12. **Bogdanov V.I., Kuznetsov S.P., Kuvtyrev D.V., Khantalin D.S.** Features of calculation of a nozzle with a resonator thrust augmentor and experiment within a small-sized gas turbine engine. *Vestnik Rybinskoi gosudarstvennoi aviatsionnoi tekhnologicheskoi akademii im. P.A. Solov'eva*. 2021, no 3 (58), pp. 9–13. (In Russ.)
13. **Kirshina A.A., Levikhin A.A., Kirshin A.Yu.** Numerical method for calculating the nozzle thrust of a wide-range rocket engine. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 5, pp. 1016–1024 (In Russ.). DOI: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-1016-1024
14. **Chaudhuri A., Hadjadj A.** Numerical investigations of transient nozzle flow separation. *Aerospace Science and Technology*, 2016, vol. 53, pp. 10–21.
15. **Menter F.R.** Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605.

Статья поступила в редакцию 28.10.2023; одобрена после рецензирования 10.11.2023; принята к публикации 18.11.2023.

The article was submitted on 28.10.2023; approved after reviewing on 10.11.2023; accepted for publication on 18.11.2023.