



ЗАВОДСКИЕ ИСПЫТАНИЯ КА И РН

PRODUCTION TESTING OF SV AND LV

Статья поступила в редакцию 06.03.2012. Ред. рег. № 024/12. УДК 629.7.036.54-63
Заключение совета рецензентов: 11.03.2012. Заключение совета экспертов: 16.03.2012. Принято к публикации 21.03.2012.

Разработка и испытания уникальной камеры ЖРД РД-0126 «Ястреб» с разворотом потока в сопле на 180°

**А.Б. Архипов¹, А.Л. Воинов¹, В.Д. Горохов²,
Ю.А. Ефремов², В.А. Орлов², Н.Б. Пономарев¹**

¹ ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», д. 8, ул. Онежская, г. Москва, Россия, 125438,
тел. (495) 456-46-08, e-mail: kerc@elnet.msk.ru, kerc@comcor.ru

² ОАО КБХА, д.20, ул.Ворошилова, г.Воронеж, Россия, 394006,
тел. (473) 234-65-65, 263-36-80; факс (473) 234-65-71, 276-84-40.
E-mail: cadb@comch.ru

Представлена конструкция уникальной камеры безгенераторного кислородно-водородного ЖРД РД-0126 «Ястреб» с расположением кольцевой камеры сгорания в сверхзвуковой части сопла и разворотом потока в последнем на 180°. Камера прошла успешно огневые испытания с охлаждением стенок водой и питанием от стендовой вытеснительной системы подачи. Проведены оптимизация профиля тарельчатого сопла и выполнено сравнение параметров камеры с вариантом круглого сопла применительно к двигателю РД-0126. Проанализированы результаты продувок моделей тарельчатого сопла, которые использовались для разработки методики профилирования сверхзвуковых частей тарельчатых и кольцевых сопел.

Ключевые слова: кислородно-водородный, жидкостный ракетный двигатель, кольцевая камера сгорания, методики профилирования, сверхзвуковые части тарельчатых и кольцевых сопел.

The article has entered in publishing office 06.03.2012. Ed. reg. № 024/12. УДК 629.7.036.54-63
Referred: 11.03.2012. Expertise: 16.03.2012. Accepted: 21.03.2012

Development and testing of the unique RD0126 LPRE «YASTREB» chamber with 180° nozzle reverse flow

**A.B. Arkhipov¹, A.L. Voinov¹, V.D. Gorokhov²,
Y.A. Efremov², V.A. Orlov², N.B. Ponomarev¹**

¹SSC FSUE «Keldysh Research Center»

²OSC KBKhA, +7(473) 234-61-25, факс +7(473) 276-84-40, e-mail:cadb@comch.ru

The design of expander LOX-hydrogen LPRE RD-0126 «Yastreb» unique chamber is presented with annular CC position in supersonic part of the nozzle and 180° reverse flow in it. CC has been successfully tested during hot fire testing with walls cooling by water and supply from test stand pressurized feed system. The optimization for expansion-deflection nozzle profile has been carried out and the comparison between chamber parameters with annular nozzle design in respect to RD-0126 engine has been fulfilled. The results of expansion-deflection nozzle models purging were analyzed, they were used for development of profiling methodic of expansion-deflection and annular nozzles supersonic parts.

Keywords: oxygen-hydrogen, liquid rocket engine, annular combustion chamber, profiling methodic, expansion-deflection and annular nozzles supersonic parts.

В 1992 году КБХА начало разработку уникальной камеры безгенераторного кислородно-водородного ЖРД РД-0126 «Ястреб» с расположением кольцевой камеры сгорания в сверхзвуковой части сопла и разворотом потока в последнем на 180° (рис. 1). Эта камера имела на основном режиме тягу 4 тс и давление в камере сгорания $p_k = 73$ ата при среднем по камере сгорания соотношении компонентов топлива $K_m = 6,0$, длину 1900 мм, диаметр выходного сечения сопла $d_a = 1590$ мм, площадь минимального сечения такую же, как у обычного сопла с диаметром минимального сечения $d^* = 58,9$ мм, геометрическую степень расширения сопла $\bar{F}_a = 720$, регенеративное наружное проточное охлаждение стенок до диаметра сопла 600 мм ($\bar{F}_a = 104$) и радиационное охлаждение стенок ниже по потоку. По оценкам КБХА, эта камера должна была иметь пустотный удельный импульс тяги ~ 471 с и массу 95 кг. Камера была изготовлена с укороченным до $d_a = 600$ мм соплом (без радиационно охлаждаемой части) и в 1998 г. успешно прошла четыре огневых испытания длительностью ~ 30 с каждое с давлением в камере $p_k = 35 - 73$ ата с охлаждением стенок водой и питанием от стендовой вытеснительной системой подачи (рис. 1).

Конфигурация камеры близка к предложенной НИИ-1 (ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша») еще в 1961 г. и отличается от нее упрощенным методом профилирования и конструктивно проработанной системой подачи топлива (рис. 2). При выборе конфигурации камеры для безгенераторного РД-0126 предполагалось использовать ее преимущество перед обычной камерой, заключающееся в более интенсивном нагреве горючего-охлаждителя вследствие увеличенной площади горла сопла, увеличенной длины сопла (при заданной длине камеры) и соответственно увеличенной степени расширения сопла за счет расположения камеры сгорания в сверхзвуковой части сопла.

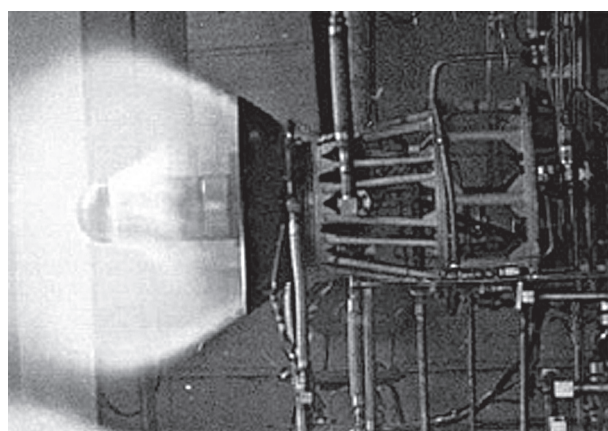
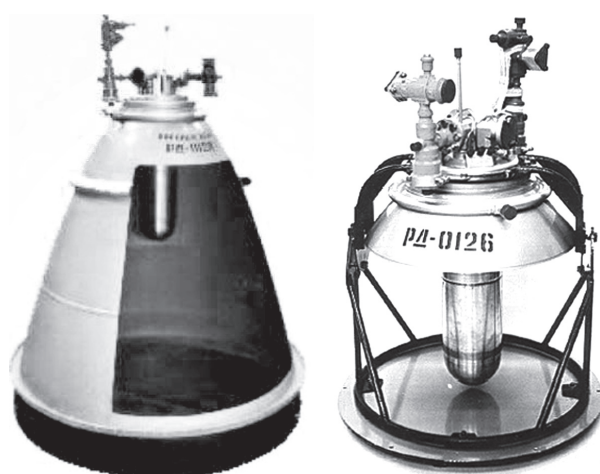


Рис. 1. Безгенераторный кислородно-водородный ЖРД РД-0126 «Ястреб» с разворотом потока в сопле на 180°, его вариант с сильно укороченным соплом для наземных испытаний и наземное испытание двигателя

Fig. 1. RD0126 liquid-propellant expander cycle rocket engine «Yastreb» chamber with 180° nozzle reverse flow – option with extra-shortened nozzle for ground testing and engine ground testing

Андрей Борисович Архипов Andrey Borisovich Arkhipov

Сведения об авторе: ведущий инженер ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша».

Область научных интересов: гидрогазодинамика, термодинамика, теплообмен в ЖРД и энергетических установках.

Публикации: 30 научных работ, из них 2 авторских свидетельства и патента.

Author's personal data: Leading Engineer of SSC FSUE «Keldysh Research Center».

Professional experience and field of researches: hydraulic gas dynamics, thermodynamics, heat-exchange of LPREs and power plants.

Publications: 30 scientific publications, 2 of them are author's certificates and patents.



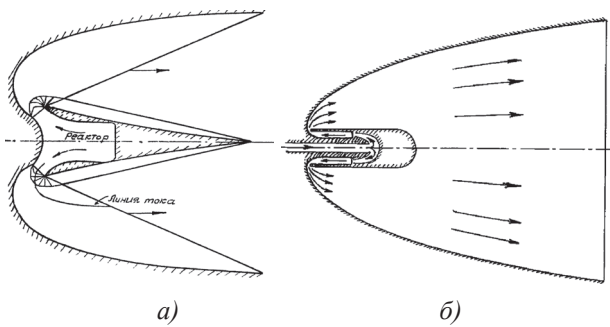


Рис. 2. Схемы камеры РД с соплом, разворачивающим поток на 180°: а) предложенная в НИИ-1 (ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша») в 1961 г., б) РД-0126 «Ястреб»

Fig. 2. Rocket engine chamber with 180° nozzle reverse flow: a) proposed by NII-1 (State Scientific Center Federal State Unitary Enterprise Keldysh Research Center) in 1961; b) Rocket engine RD0126 «Yastreb»

Предполагалось, что потери удельного импульса тяги камеры будут такими же, как у обычной; следовательно, ее удельный импульс тяги будет выше из-за большей степени расширения сопла при том же осевом габарите.

Однако выполненные в 1993 – 1994 гг. в ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» расчеты по сравнительной оптимизации тарельчатых сопел (рис. 2), профилируемых упрощенным способом, и обычных сопел, профилируемых методом характеристик [1], с оптимизацией степени расширения каждого из них при заданной длине камеры, с учетом, как в работе [1], всех составляющих потерь удельного импульса тяги и массы сопла при параметрах, близких к параметрам двигателя РД-0126 (рис. 3), показали, что при одинаковой заданной длине расширяющейся части сопла \bar{X}_a оптимальные тарельчатые сопла имеют большую степень расширения (например, $\bar{F}_a = 711$ по сравнению с $\bar{F}_a = 490$ при $\bar{X}_a = 62$), но суммарные потери удельного импульса тяги в них выше, чем в обычных соплах, по причине существенно более высоких потерь из-за трения при менее интенсивном разгоне потока вдоль стенки сопла и особенностей контура (при этом регенерационная добавка также возрастает, но не компенсирует рост потерь из-за трения). В результате преимущество по эффективному (с учетом массы сопла) удельному импульсу тяги камеры с соплом, разворачивающим поток на 180°, по сравнению с обычной камерой невелико и составляет ~2,5 с (при включении длины камеры сгорания в осевой габарит), причем уменьшается с увеличением \bar{X}_a (рис. 3).

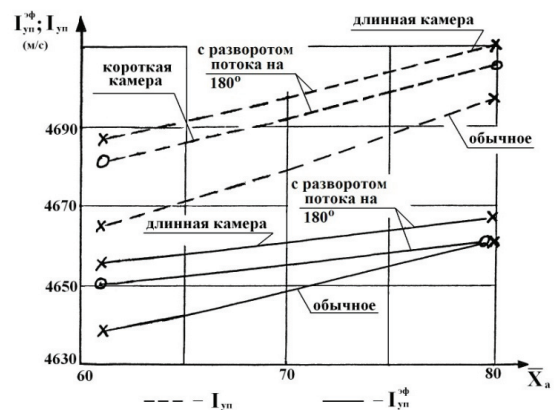
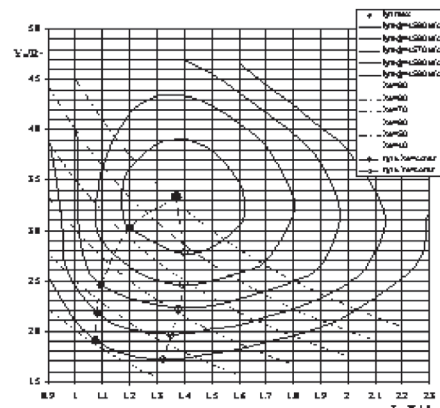


Рис. 3. Расчетная оптимизация профиля тарельчатого сопла с учетом массы сопла. Сравнение оптимальных тарельчатого и обычного сопел, спрофилированных при наличии ограничения на длину сопла ($\bar{X}_a = const$) и учете массы сопла

Fig. 3. Calculated optimization for expansion-deflection nozzle profile considering the nozzle mass. Comparison between the optimal and regular nozzles profiled with nozzle length restriction ($\bar{X}_a = const$), nozzle mass considered

При этом необходимо учитывать, что данные результаты получены без учета трения и регенерации по внутренней и внешней поверхностям внешней стенки кольцевой камеры сгорания (из-за сильного разгона потока около кромки этой стенки в горле сопла возможна ламинаризация пограничного слоя) с профилированием сопла при развороте потока на 180° и определением параметров течения в нем по упрощенной методике, не учитывающей особенности течения в трансзвуковой части сопла.

Для выяснения адекватности расчетов реальной картины течения в тарельчатом сопле на стенде СДС ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» были проведены с использованием воздуха в качестве рабочего тела

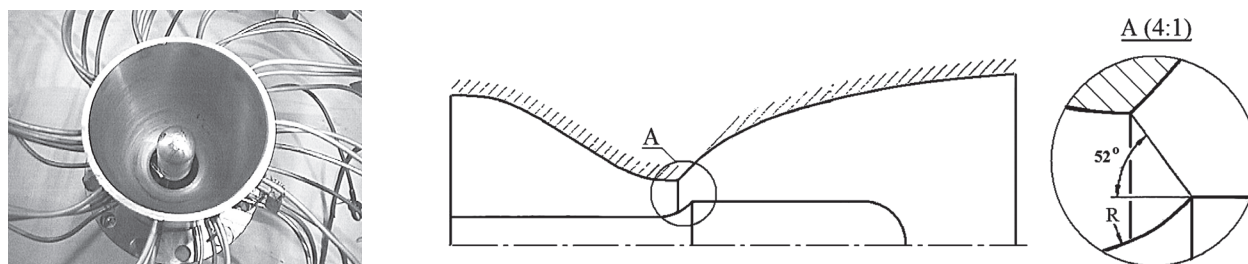


Рис. 4. Модельное сопло с центральным телом для моделирования и исследования на стенде СДС ФГУП «Центр Келдыша» картины течения в сопле двигателя РД-0126 на расчетных и нерасчетных режимах работы
Fig. 4. Mockup nozzle with centered body for simulation and research of flow profile in RD0126 rocket engine nozzle (estimated and actual operational modes) at Keldysh Research Center stand

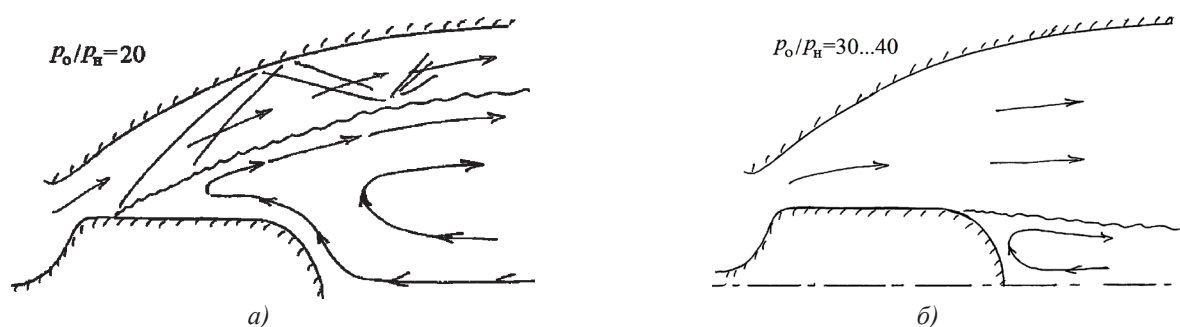


Рис. 5. Схемы течения в модельном сопле с центральным телом на режимах истечения:
 а) расчетных и б) нерасчетных

Fig. 5. Flow profiles for mockup nozzle with centered body at nozzle flow modes: a) estimated and b) actual

Юрий Александрович Ефремов Yury Alexandrovich Efremov



Сведения об авторе: ведущий конструктор ОАО КБХА, кандидат техн. наук.
Область научных интересов: гидрогазодинамика, термодинамика в ЖРД и энергетических установках.
Публикации: 45 научных работ, из них 20 авторских свидетельств и патентов.
Author's personal data: Candidate of Technical Sciences, Project designer of OSC KBKhA. **Professional experience and field of researches:** hydraulic gas dynamics, thermodynamics of LPREs and power plants.
Publications: 45 scientific publications, 20 author's certificates and patents.

Вадим Александрович Орлов Vadim Alexandrovich Orlov



Сведения об авторе: главный специалист ОАО КБХА по расчетам конструкций ЖРД и энергетических установок, академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, кандидат техн. наук, доцент. **Область научных интересов:** гидрогазодинамика, термодинамика, теплообмен в ЖРД и энергетических установках.
Публикации: 250 научных работ, из них 80 авторских свидетельств и патентов.
Author's personal data: Candidate of Technical Sciences, main specialist of OSC KBKhA in LPREs and power plants structural analysis, Academician of Tsiolkovsky Russian Academy of Astronautics. **Professional experience and field of researches:** hydraulic gas dynamics, thermodynamics, heat-exchange of LPREs and power plants.
Publications: 250 scientific publications, 80 author's certificates and patents.

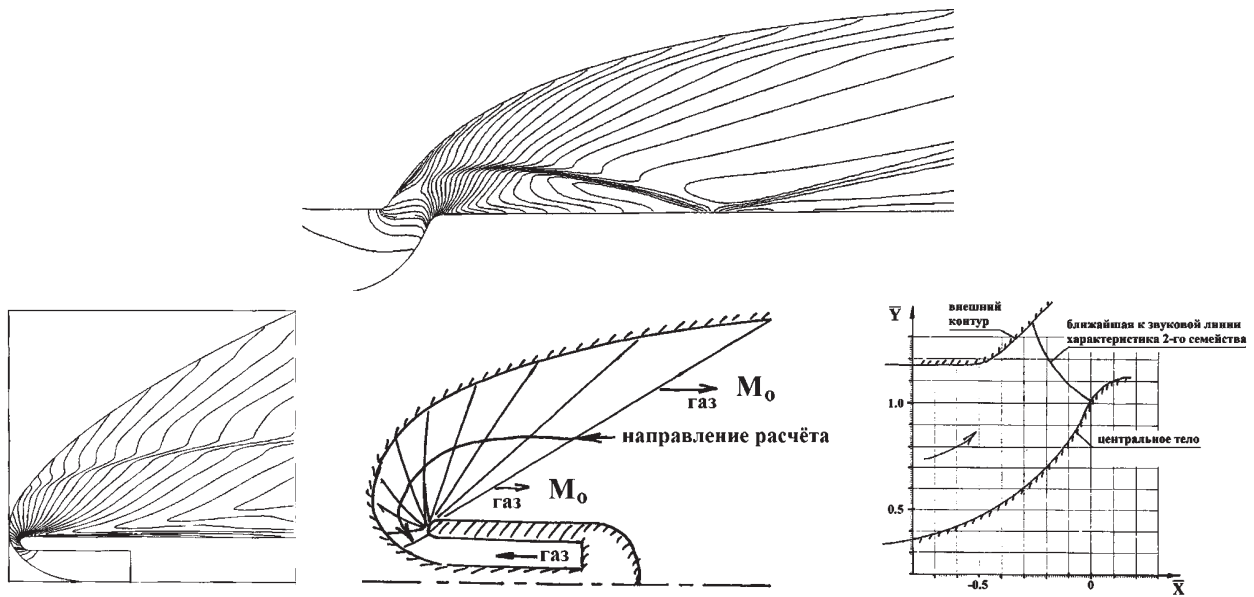


Рис. 6. Профилирование тарельчатых сопел и сопел с разворотом потока на 180° с помощью расчета веера характеристик в направлении против потока

Fig. 6. Expansion-deflection nozzle and 180° reverse flow nozzle profiling by means of characteristic fan estimation in the upstream direction

испытания моделей тарельчатых сопел с продленным в сверхзвуковую часть сопла центральным телом (моделирующим камеру сгорания, расположенную в сверхзвуковой части сопла) с измерением распределения статического давления вдоль основной (внешней) стенки сопла и вдоль его центрального тела (рис. 4).

В результате получено, что на основной (внешней) стенке сопла автомодельное течение наступает при отношении давления перед соплом к давлению окружающей среды на срезе сопла $p_0/p_n > 30$ ата, а при $p_0/p_n < 30$ ата у концевой части этой поверхности имеют место волнообразные повышения давления, превосходящие давление окружающей среды, по-видимому, связанные с приходом волн возмущения от отрывной зоны около центрального тела (рис. 5).

Обтекание центрального тела и его торца становится автомодельным при $p_0/p_n > 53$.

Эти эксперименты, а также последующие расчеты по программе [2] показали, что при упрощенном профилировании сверхзвуковой части расчетом веера волн разрежения (характеристик) около точки или дуги центрального тела против потока от равномерной выходной характеристики до некоторой, близкой к звуковой линии характеристики того же семейства (рис. 6), вследствие несогласования полученного таким образом контура сверхзвуковой части сопла с течением в дотрансзвуковой, трансзвуковой и сверхзвуковой частях сопла формируется течение, отличающееся от предполагаемого при таком профилировании, что приводит к непредвиденным возмущениям сверхзву-

Николай Борисович Пономарев Nikolay Borisovich Ponomarev

Сведения об авторе: начальник сектора ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», кандидат техн. наук.

Область научных интересов: гидрогазодинамика, термодинамика, теплообмен в ЖРД и энергетических установках.

Публикации: 50 научных работ, из них 5 авторских свидетельств и патентов.

Author's personal data: Chief of Sector in SSC FSUE «Keldysh Research Center», Candidate of Technical Sciences.

Professional experience and field of researches: hydraulic gas dynamics, thermodynamics, heat-exchange of LPREs and power plants.

Publications: 50 scientific publications, 5 of them are author's certificates and patents.



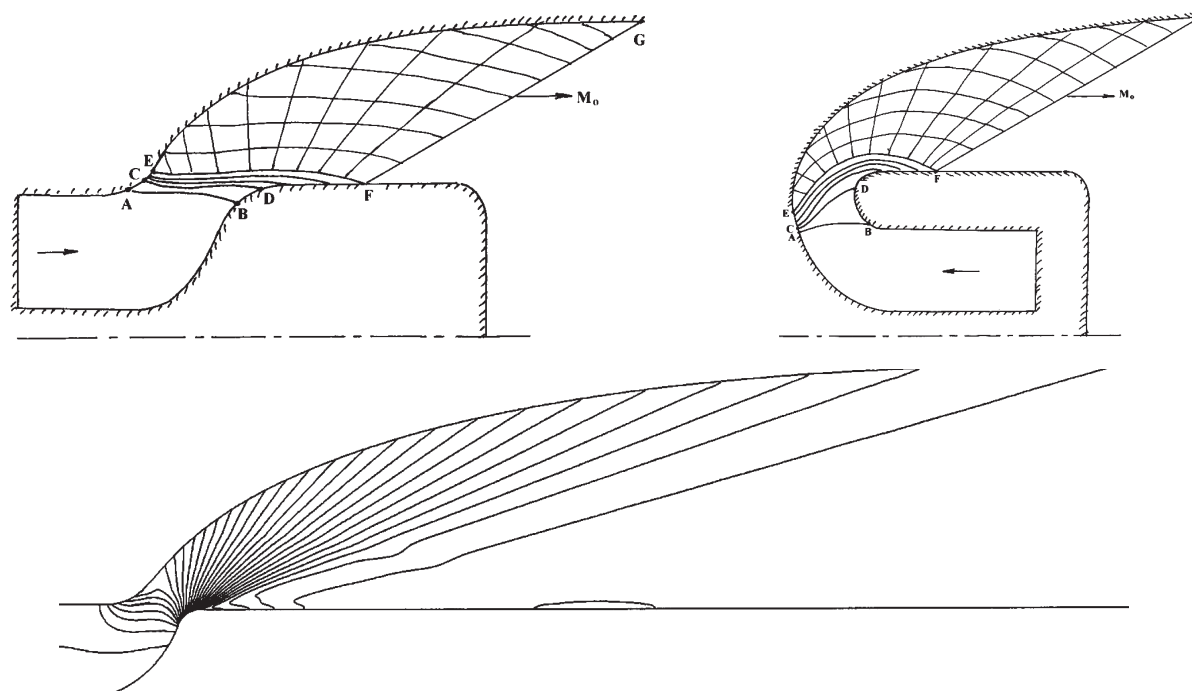


Рис. 7. Профилирование тарельчатых сопел и сопел с разворотом потока на 180° с помощью нового метода, предложенного ГИЦ ФГУП «Центр Келдыша»
Fig. 7. Expansion-deflection nozzle and 180° reverse flow nozzle profiling using the new method proposed by Keldysh Research Center

кового потока в сопле (в частности, к скачку уплотнения – рис. 6) и, следовательно, ухудшает тяговые и расходные характеристики сопла.

Для преодоления указанного недостатка в ГИЦ ФГУП «Центр Келдыша» была разработана новая методика профилирования сверхзвуковых частей тарельчатых и кольцевых сопел с разворотом потока на 180°.

Согласно этой методике (рис. 7) вначале с помощью программы [2] и специально разработанного метода построения квазиортогональной сетки, основанной на использовании полярных координат, в области разворота потока в до- и трансзвуковой части сопла, профили которой заданы, рассчитывается течение газа, т.е. решается прямая задача теории сопла, и в результате рассчитывается ближайшая к звуковой линии характеристика второго семейства.

Затем от данной характеристики классическим методом, модифицированным с учетом перехода угла наклона вектора скорости потока к оси симметрии сопла через 90°, рассчитывается веер характеристик второго семейства (волн разрежения) около небольшого участка внешнего контура до получения выходной характеристики этого веера, приходящей на центральное тело с заданным числом Маха. Далее между последней характеристикой веера и проведенной от

нее равномерной выходной характеристикой первого семейства решается задача Гурса и определяется контур сверхзвуковой части сопла на данном участке.

Таким образом обеспечивается полное согласование профилей до- и сверхзвуковой частей сопла между собой, а также равномерный, параллельный оси сопла поток за равномерной выходной характеристикой при условии цилиндрического центрального тела на этом участке (рис. 7).

Для профилирования сопла двигателя РД-0126 указанная методика не использовалась, так как в 2002 году все работы по этому двигателю были прекращены.

Список литературы

1. Пономарев Н.Б., Лозино-Лозинская И.Г., Воинов А.Л. Расчетные и экспериментальные методы определения удельного импульса тяги нового двигателя. В сб. «Рабочие процессы в жидкостном ракетном двигателе и их моделирование»/Под ред. акад. РАН А.С. Коротеева. М.: Машиностроение, 2008.
2. Иванов И.Э., Крюков И.А. Квазимонотонный метод повышенного порядка точности для расчета внутренних и струйных течений невязкого газа // Математическое моделирование, № 6, 1996.