

УДК 533.697.4+544.452+519.63

Исследование кольцевого сопла на продуктах сгорания углеводородных топлив*

В.А. Левин¹, Н.Е. Афонина¹, В.Г. Громов¹, Г.Д. Смехов¹,
А.Н. Хмелевский¹, В.В. Марков^{1,2}

¹Институт механики Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова

²Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Москва

E-mail: gromov@imec.msu.ru

Методами натурного и вычислительного экспериментов исследованы течения в тяговом реактивном модуле с кольцевым соплом и с дефлектором в виде сферического сегмента. В качестве рабочего газа использовались продукты сгорания смесей воздуха с ацетиленом, газофазными авиационным керосином и природным газом. Экспериментальные исследования проводились в импульсной аэродинамической установке в диапазоне давления торможения от 0,48 до 2,05 МПа. Расчеты для случаев истечения продуктов сгорания в наземных и высотных условиях выполнялись по оригинальным вычислительным программам, в которых использовались системы уравнений Эйлера и Навье–Стокса, дополненные уравнениями химической кинетики. Установлено, что тяга реактивного модуля с кольцевым соплом в высотных условиях почти вдвое превосходит тягу звукового сопла, но меньше (примерно на 25 %) тяги идеального расчетного сопла Лавалья, причем разница заметно снижается с уменьшением высоты полета и давления торможения.

Ключевые слова: тяговый реактивный модуль, сопло Лавалья, кольцевое сопло, скачок уплотнения, горение.

Введение

Кольцевые и линейные двухщелевые сопла с центральным телом по ряду характеристик конкурентоспособны с традиционными соплами Лавалья в выходных устройствах реактивных двигателей. Так, они заметно короче, а течение в них имеет свойство автоматически подстраиваться к изменению внешних условий при изменении высоты полета. В настоящее время подобные сопла исследуются в России и за рубежом, а некоторые из них нашли применение в конструкциях перспективных образцов ракетной и авиационной техники [1–4].

Представляет интерес сравнительное исследование модели тягового реактивного модуля с кольцевым соплом и с дефлектором в виде сферического сегмента и эквивалентного по расходу газа сопла Лавалья. Принцип работы такого устройства состоит в следующем. Из реактора через подводящую систему и кольцевое сопло в полузамкнутую полость со звуковой скоростью поступают высокоэнтальпийные продукты сгорания

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 11-01-00068-а, № 12-01—90416-Укр_а), Роснауки (проект № ИИИ-5911.2012.1) и Программ Президиума РАН.

углеводородного топлива, которые догорают в ней и истекают через выходное сопло в окружающее пространство, создавая тягу, воспринимаемую тяговой стенкой дефлектора. Согласно полученным ранее расчетно-экспериментальным данным, течение в рассматриваемой модели может быть либо стационарным, либо пульсирующим с высокой частотой [5–11]. В стационарном режиме оно подобно течению в сопле с центральным телом, роль которого играет формирующаяся в полости тороидальная вихревая зона [12–13].

В настоящей работе сравнение тяговых характеристик реактивного модуля с кольцевым соплом и сопла Лавала проводится для равновесных продуктов сгорания топливных смесей в предположении равенства расходов газа, давлений торможения, давлений в окружающем пространстве, а также при условии расчетности истечения из сопла Лавала. Теоретическое исследование выполняется численными методами по оригинальным программам, разработанным с использованием нестационарных уравнений Эйлера или Навье–Стокса для многокомпонентных реагирующих смесей. Эксперименты с моделями выходных устройств выполнены в лабораторной импульсной аэродинамической установке. В отличие от недавно опубликованных работ [12–13], рассматриваются важные для практики топливоздушные смеси — авиационный керосин и сжиженный природный газ. Кроме того, проведено сравнение тяговых характеристик реактивного модуля с коническим и цилиндрическим выхлопными соплами, сравнение с параметрами расчетного сопла Лавала, получены данные по влиянию степени нерасчетности истечения на структуру течения и его локальные характеристики, а также на силовые параметры исследуемой модели тягового реактивного модуля.

Расчетно-экспериментальные исследования

Подробное описание экспериментальной установки дано в работах [5, 13]. Она состоит из реактора (сфера диаметром 0,286 м), отделенного диафрагмой от кольцевого подводящего канала, соплового устройства и цилиндрического ресивера объемом 0,28 м³. Сопловое устройство реактивного модуля — это соединенные вместе кольцевое сопло с критическим сечением 0,0044 м, дефлектор и выхлопное коническое сопло с углом раствора 45°, диаметром основания 0,0664 м и длиной 0,015 м вдоль оси (или цилиндрический патрубок такой же длины с диаметром в 0,0664 м). Дефлектор — сферический сегмент диаметром 0,072 м, высотой 0,022 м и с диаметром основания 0,0664 м. Эксперимент начинается с заполнения реактора топливной смесью. Воздух из ресивера откачивается до давления порядка 1 КПа. Смесью поджигается электровзрывателем из тонкой нихромовой проволоки, и в результате ее сгорания повышается давление до величины, при которой раскрывается диафрагма в виде шести лепестков вдоль нанесенных на ее поверхности насечек. Через образовавшееся отверстие диаметром 0,05 м продукты горения через кольцевой подводящий канал и кольцевое сопло в радиальном направлении втекают в полость соплового устройства. Сила тяги, создаваемая избыточным давлением на дефлектор, измеряется тензометрическим датчиком. Кроме того, специальными пьезоэлектрическими датчиками регистрируется давление на боковой стенке реактора и на стенке подводящего канала на расстояниях 0,08 м и 0,025 м от критического сечения кольцевого сопла и в центре дефлектора. Сигналы с датчиков записываются скоростными цифровыми электронными осциллографами типа НР-54624А с полосой пропускания 50 МГц и параллельно менее скоростным цифровым многоканальным усилителем типа MGCplus НВМ.

В расчетах использовалась газофазная кинетическая модель химических реакций стехиометрических смесей ацетилена, метана или керосина в воздухе, в которой в качестве продуктов выступают десять химических компонентов: О, Н, О₂, Н₂, ОН, СО, СО₂, НО₂, Н₂О, N₂. Кинетическая схема включает шесть реакций диссоциации-рекомбинации

и тринадцать обменных реакций. Подробное описание расчетной модели представлено в работах [12–13]. Предполагается, что стехиометрическая смесь горючего с воздухом с заданными начальными значениями давления p_{in} , температуры T_{in} и мольных концентраций компонентов X_{in} сгорает в реакторе при постоянном объеме с образованием газовой смеси с параметрами p_0 , T_0 , X_0 . Продукты горения поступают по подводящему каналу в кольцевое сопло и истекают со звуковой скоростью в полость соплового устройства, из которого газ через выхлопное сопло вытекает в ресивер, заполненный неподвижным воздухом с заданными в начальный момент давлением и температурой. В расчетном исследовании, как и в экспериментах, выходное сопло представляло собой либо коническое сопло с полууглом 45° , либо цилиндрический патрубок диаметром $d = 0,0664$ м, имеющие одинаковую длину $0,015$ м. Параметры смеси в горловине кольцевого сопла определялись по формулам одномерной газовой динамики в предположении «замороженности» химического состава и равенства скорости смеси скорости звука. Значения суммарной тяги D и удельного импульса I_{sp} определялись по разности рассчитанного давления на поверхности дефлектора p_w и давления в ресивере p_e :

$$D = 2\pi \int_0^{s_n} (p_w - p_e) |x| n_y ds, \quad I_{sp} = D/gG.$$

Здесь n_y — вертикальная проекция нормали к поверхности на ось симметрии, s — расстояние вдоль контура тяговой стенки от оси, s_n — расстояние до кромки кольцевого сопла, G — суммарный расход газа через сопло, g — ускорение свободного падения.

Основные результаты

Получена полная картина течения продуктов сгорания в сопловом устройстве от начала втекания в него звуковой кольцевой струи до формирования результирующего состояния при различных степенях нерасчетности истечения из критического сечения кольцевого сопла $n = p^*/p_e$ в пределах $4,8 < n = p^*/p_e < 1000$, где p^* — давление в критическом сечении кольцевого сопла. Анализ численных результатов позволил во всех рассмотренных случаях выделить две стадии течения, различающиеся качественно и количественно. Начальная стадия характеризуется коротким временем и сильными колебаниями величин газодинамических параметров. Со временем амплитуда колебаний уменьшается и устанавливается стационарный режим со структурой течения, подобной для всех исследованных топливно-воздушных смесей. В расчетах по невязкой модели устанавливается режим течения с периодическими колебаниями всех параметров потока относительно небольшой амплитуды, а по вязкой — реализуется стационарный режим с параметрами, близкими к параметрам, полученным в расчетах по невязкой модели. При этом время установления зависит от параметров задачи и составляет примерно $0,001$ с. Амплитуды колебаний максимальны сразу после запуска и постепенно затухают. Наиболее интенсивные колебания давления p наблюдаются в центре донной области на стенке дефлектора. На рис. 1 представлена типичная картина изменения со временем рассчитанного давления в центре дефлектора в форме сферического сегмента при истечении продуктов сгорания стехиометрической ацетиленовоздушной смеси при давлении торможения $1,983$ МПа и степени нерасчетности истечения $n = 1000$ в случае цилиндрического выхлопного сопла.

Характерные картины линий тока в тяговом модуле с цилиндрическим выхлопным соплом представлены ниже на рисунках для течения продуктов сгорания стехиометрических ацетиленовоздушной (рис. 2) и метановоздушной (рис. 3) смесей при давлениях

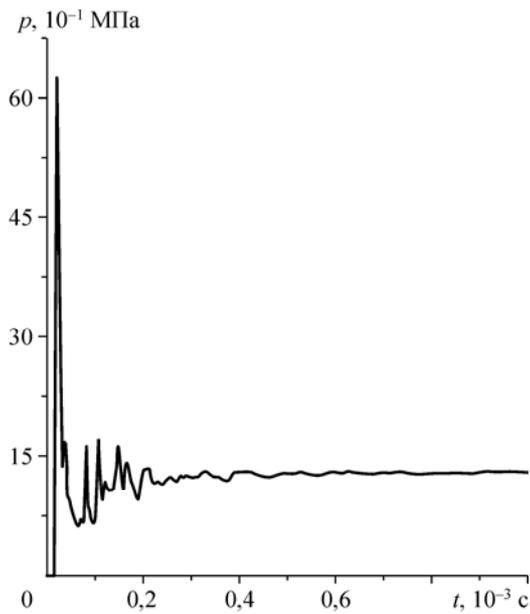


Рис. 1. Изменение со временем давления в центре дефлектора.

торможения соответственно $p_0 = 1,983$ и $1,8$ МПа и степенях нерасчетности истечения $n = 1000$ и 10 . Следует отметить, что на рис. 3, в отличие от рис. 2, представлены данные для дополнительной части расчетной области вниз по потоку за цилиндрическим выхлопным соплом. Продукты сгорания метановоздушной смеси (рис. 3) моделируют по составу продукты сгорания сжиженного природного газа, являющегося перспективным топливом для авиации [14]. На рисунках хорошо видно, что в полузамкнутой полости, как и в случае конического выхлопного сопла в работах [12–13], формируется циркуляционное течение в форме двух кольцевых вихрей. Один

из них занимает основную площадь поперечного сечения циркуляционной зоны, а другой, меньшего размера и интенсивности, расположен в непосредственной близости к критическому сечению кольцевого сопла. Газ из полости истекает в ресивер в виде осесимметричной струи, угол раскрытия которой вблизи критического сечения кольцевого сопла определяется степенью нерасчетности истечения. Отмеченные области течения разделены поверхностью тока, начинающейся у кромки критического сечения кольцевого сопла. Разделяющую поверхность можно рассматривать как поверхность сформировавшегося центрального газового тела, обтекаемого газом из кольцевого сопла. Согласно расчетам, разворот кольцевой струи, обтекающей центральное тело, происходит в присоединенных и висячих скачках уплотнения отчетливо просматриваемых на изолиниях давления (рис. 3). Струйный поток увлекает газ из окружающей среды, что приводит к образованию во внешнем по отношению к струе пространстве кольцевого вихря малой интенсивности (рис. 3).

Вдоль оси конической струи, истекающей из выхлопного сопла, давление и температура падают, а число Маха возрастает, достигая на выходе из расчетной области, представленной на рис. 3, значения $2,4$. При этом изменение модуля числа Маха в поперечном к вектору тяги направлении на границе расчетной области (кривая 1) и на срезе выхлопного сопла (кривая 2), представленное на рис. 4, показывает, что степень неравномерности потока вдоль оси истекающей струи уменьшается и на границе расчетной области не превышает для рассматриваемого случая 12% .

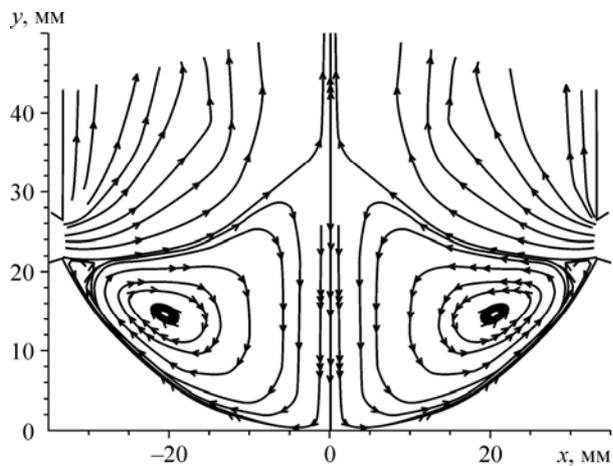
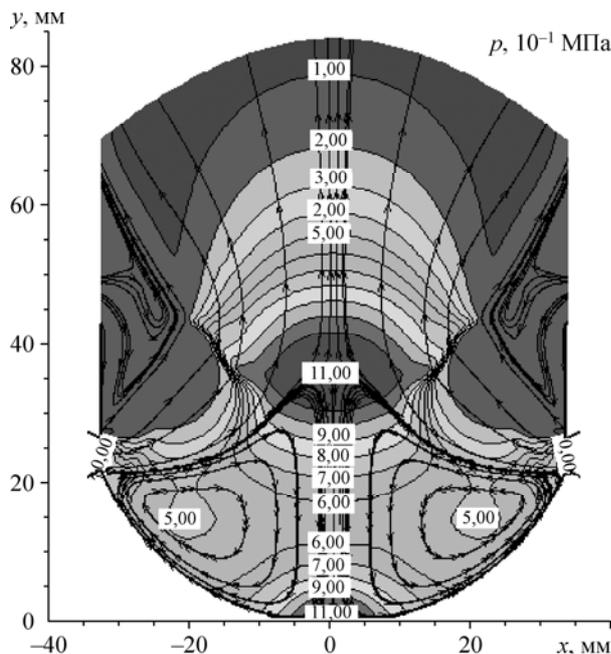


Рис. 2. Линии тока в тяговом реактивном модуле с цилиндрическим выхлопным соплом при условиях, соответствующих рис. 1.

Рис. 3. Изобары и линии тока в расчетной области для давления торможения 1,8 МПа и степени нерасчетности истечения $n = 10$.



Представленная общая картина структуры потока наблюдается при степенях нерасчетности истечения в пределах от 10 до 1000. При уменьшении степени нерасчетности истечения до значений, не превышающих 4,8 и меньших, макроструктура потока усложняется: сначала изменяется форма центрального газового тела, затем разворот кольцевой струи в направлении вектора тяги выхлопного сопла происходит в волновых образованиях типа “бочек”, а на участке конической струи в области слияния за центральным телом вблизи оси может формироваться классический диск Маха.

Для верификации математических моделей по результатам сравнения экспериментальных данных с расчетными использовались продукты сгорания стехиометрической ацетиленовоздушной смеси при давлении торможения от 0,48 до 2,05 МПа и сопловое устройство реактивного модуля с дефлектором в форме сферического сегмента с коническим или цилиндрическим выхлопным соплом, через которое рабочий газ вытекает в ресивер. На рис. 5 приведены расчетные (верхняя сплошная линия) и экспериментальные величины силы тяги: светлые кружки — коническое выхлопное сопло, темные — цилиндрическое. В масштабе этого рисунка расчетные данные для конического и

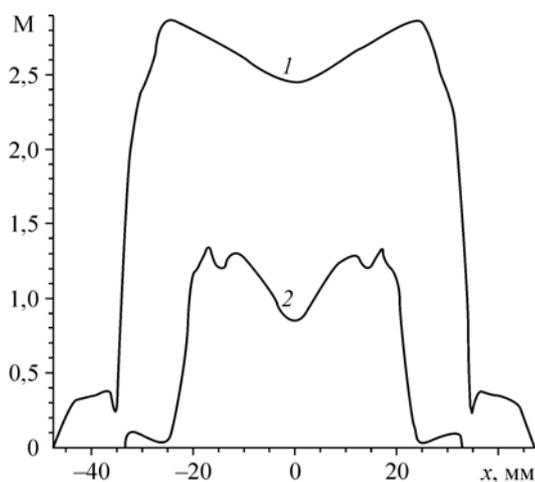


Рис. 4. Изменение модуля числа Маха в поперечном к вектору тяги направлении для случая, представленного на рис. 3.

1 — на границе расчетной области, 2 — на срезе выхлопного сопла.

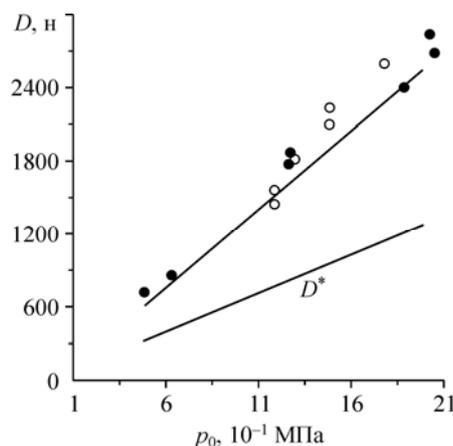


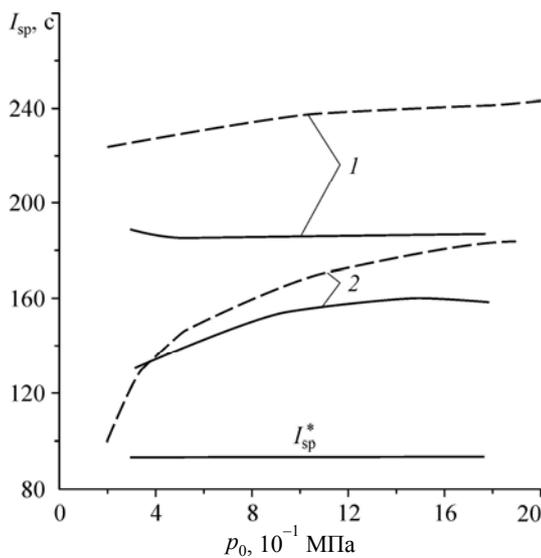
Рис. 5. Зависимости тяги реактивного модуля (D) и звукового сопла (D^*) от давления торможения p_0 при давлении в ресивере 1 КПа.

Сплошные линии — расчет, светлые символы — эксперимент для конического выхлопного сопла, темные — для цилиндрического.

цилиндрического выхлопных сопел практически совпадают и представлены одной сплошной линией. При сравнении экспериментальных и теоретических результатов использовались максимальные значения давления и силы тяги, полученные во время каждой продувки, которые достигаются спустя время 0,004–0,006 с после начала истечения продуктов сгорания из реактора, что соответствует характерному времени установления течения в сопловом устройстве реактивного модуля. Предполагалось, что величина температуры и химический состав газа на выходе из реактора в этот момент наиболее близки к значениям этих параметров, используемым в расчетах [13]. Как видно на рис. 5, в рассмотренных условиях расчетные значения силы тяги линейно зависят от давления торможения (удельный импульс при этом, как показали расчеты, практически постоянен) и по величине тяги имеется удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных. Ясно также, что в исследованных условиях изменение формы выхлопного сопла с конической на цилиндрическую не оказывает заметного влияния на величину тяги, развиваемой реактивным модулем.

Полученные в расчетно-экспериментальном исследовании данные по тяговым характеристикам реактивного модуля с кольцевым соплом и дефлектором в форме сферического сегмента сравнивались с соответствующими величинами силы тяги D^* (нижняя кривая на рис. 5) для эквивалентного по расходу газа звукового сопла. Видно, что тяга, развиваемая реактивным модулем с кольцевым соплом (и, как установлено, удельный импульс), значительно больше (примерно вдвое) соответствующих величин для звукового сопла.

Было проведено специальное теоретическое исследование с целью сравнения тяговых характеристик реактивного модуля с кольцевым соплом и эквивалентных по расходу газа сопел Лавала при истечении продуктов сгорания стехиометрических керосино-воздушных смесей в пространство с нормальным противодавлением $p_e = 0,1$ МПа (в наземных условиях) и низким противодавлением $p_e = 1$ КПа (на большой высоте). Предполагалось, что течение в сопле Лавала является расчетным. Рассматривался реактивный модуль с дефлектором в форме параболоида и с цилиндрическим выхлопным соплом. Результаты расчетов удельного импульса в зависимости от давления торможения p_0 для реактивного модуля I_{sp} (сплошные линии 1 и 2), звукового сопла I_{sp}^* (нижняя сплошная линия) и расчетного сопла Лавала (пунктирные линии 1 и 2) представлены на рис. 6. Здесь цифры 1 и 2 соответствуют давлению в пространстве истечения величиной в 1 КПа и 0,1 МПа. Видно, что в высотных условиях (при низком противодавлении) соответствующие расчетные сопла Лавала превосходят (до 25 %) по удельным характеристикам рассматриваемое сопловое устройство и указанная разница заметно снижается с уменьшением давления торможения и высоты полета. Так, в наземных условиях при давлении торможения в 1,5 МПа разница в величинах удельного импульса не превышает 13 %, а при давлении торможения в 0,35 МПа удельные импульсы расчетного сопла Лавала и соплового



устройству и указанная разница заметно снижается с уменьшением давления торможения и высоты полета. Так, в наземных условиях при давлении торможения в 1,5 МПа разница в величинах удельного импульса не превышает 13 %, а при давлении торможения в 0,35 МПа удельные импульсы расчетного сопла Лавала и соплового

Рис. 6. Изменения во времени удельного импульса от давления торможения p_0 для тягового реактивного модуля I_{sp} (сплошные линии 1 и 2), звукового сопла I_{sp}^* (нижняя сплошная линия) и расчетного сопла Лавала (пунктирные линии 1 и 2, соответствующие давлениям в ресивере 1 КПа и 0,1 МПа).

устройства практически совпадают и составляют примерно 130 с. Следует заметить, что соответствующее значение удельного импульса для эквивалентного звукового сопла составляет 97 с (нижняя кривая I_{sp}^* на рис. 6). Таким образом, в наземных условиях при истечении продуктов сгорания керосина из реактивного модуля с кольцевым соплом развиваемая удельная тяга примерно на 30 % превышает тягу эквивалентного звукового сопла. Именно указанная 30-ти % разница в величинах удельной тяги была зарегистрирована в опытах работы [11]. В ней использовались равновесные продукты сгорания распылов авиационного керосина при давлениях торможения в пределах от 0,19 до 0,29 МПа. Выхлоп продуктов сгорания происходил в атмосферу в земных условиях ($p_e = 0,1$ МПа). Эксперименты проводились с сопловым устройством реактивного модуля, имевшего кольцевое сопло, размеры которого были близки к размерам кольцевого сопла, исследованного в настоящей работе.

Заключение

Получены новые экспериментальные и теоретические данные по параметрам течения продуктов сгорания стехиометрических ацетилено-, метано- и керосиновоздушных смесей в модели тягового реактивного модуля с кольцевым соплом. Установлено формирование характерной для всех изученных составов структуры стационарного течения при изменении степени нерасчетности истечения из критического сечения кольцевого сопла в пределах $4,8 < n < 1000$. Показано, что при степенях нерасчетности истечения более 10 реализуется течение с рециркуляционной зоной, подобное потоку в кольцевом сопле с центральным телом. При этом газ вытекает из соплового устройства сначала в виде кольцевой, а затем конической сверхзвуковой расширяющейся струи. Структура струи включает области разряжения, сжатия, присоединенные и висячие скачки уплотнения, обеспечивающие разворот потока от радиального направления к направлению вектора тяги. При уменьшении степени нерасчетности истечения до значений 4,8 происходит изменение формы газового центрального тела, разворот кольцевой струи осуществляется в волновых образованиях типа “бочек”, а на основном участке конической струи в области слияния за центральным телом формируется диск Маха.

Экспериментальные исследования проведены при величинах давления торможения в диапазоне от 0,48 до 2,05 МПа. Для ацетиленовоздушных смесей получено удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных по величинам силы тяги и удельного импульса. Установлено, что расчетные значения тяги линейно зависят от давления торможения, а удельный импульс остается практически постоянным. Изменение формы выхлопного сопла с конической на цилиндрическую в исследованных условиях не оказывает заметного влияния на величину тяги реактивного модуля. Рассмотренное устройство реактивного модуля с кольцевым соплом в высотных условиях значительно (примерно вдвое) превосходит звуковое сопло по тяговым параметрам, но при этом уступает экстремальному расчетному соплу Лаваля примерно на 25 %. Разница заметно снижается с уменьшением высоты и давления торможения. Так, в земных условиях при истечении продуктов сгорания стехиометрической смеси авиационного керосина с воздухом при давлении торможения в 0,35 МПа удельные импульсы практически совпадают и равны примерно 130 с. При этом соответствующее значение удельного импульса для эквивалентного звукового сопла составляет 97 с.

Обозначения

d — диаметр основания сегмента,

T — температура,

X_i — мольная концентрацией i -го компонента смеси,

p — давление газа,

p_w — давление на поверхности тяговой стенки,

S_n — расстояние до кромки кольцевого сопла от оси симметрии,

G — суммарный массовый расход газа через сопло,

g — ускорение свободного падения,

t — время,

p_e — давление в ресивере,	M — число Маха,
(x, y) — система координат в плоскости симметрии,	$*$ — параметры потока газа в критическом сечении
n — степень нерасчетности истечения,	кольцевого сопла или значения тяговых характеристик для звукового сопла,
D — суммарная тяга,	e — параметры газа в пространстве истечения,
I_{sp} — удельный импульс,	in — начальные значения параметров горючей смеси,
n_y — вертикальная компонента вектора нормали к тяговой поверхности,	sp — удельные значения,
s — расстояние, измеряемое вдоль контура тяговой поверхности от оси симметрии,	0 — параметры торможения потока.

Список литературы

1. Крайко А.Н., Тилляева Н.И. Профилирование сопел с центральным телом и определение оптимального направления их первичных потоков // Изв. РАН. МЖГ. 2007. № 2. С. 194–203.
2. Васильев А.П., Кудрявцев В.М., Кузнецов В.А. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. М.: Высшая школа, 1993. 383 с.
3. Huang D.H. Aerospoke engine technology demonstration for space propulsion: AIAA Paper № 74-1080. (AIAA/SAE 10th Propulsion Conf. 21-23 October 1974, San Diego, California).
4. Wang T.-S. Analysis of linear aerospoke plume-induced X-33 base-heating environment // J. Spacecraft Rockets. 1999. Vol. 36, No. 6. P. 777–783.
5. Левин В.А., Пережогин В.Н., Хмелевский А.Н. Особенности структуры течения продуктов сгорания в сферической полужамкнутой полости // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 5. С. 67–72.
6. Левин В.А., Смехов Г.Д., Тарасов А.И., Хмелевский А.Н. Расчетно-экспериментальное исследование модели пульсирующего детонационного двигателя. Москва, 1998. 34 с. (Препр. / НИИМ МГУ; № 42-98).
7. Leyva I.A., Tangirala V.E., Dean A.J. Investigation of unsteady flow field in a 2-stage PDE resonator: AIAA Paper № 2003-0715 (41st Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 6-9 January, 2003, Reno, Nevada, 10 p).
8. Taki S., Fujiwara T. A numerical study of detonation resonator. In: Application of detonation to propulsion / Eds. G. Roy, S. Frolov, J. Shepherd. Moscow: TORUS PRESS. 2004. P. 257–261.
9. Левин В.А., Марков В.В., Хмелевский А.Н. Теоретическое и экспериментальное исследование работы пульсирующего детонационного двигателя // Химическая физика. 2005. Т. 24, № 7. С. 37–43.
10. Taki S., Fujiwara T. A numerical study of detonation resonator. In: Pulse and Continuous Detonation Propulsion / Eds. G. Roy, S. Frolov. Moscow: TORUS PRESS, 2006. P. 309–320.
11. Marchukov E.Yu., Tarasov A.I., Wagner A.V. Testing results of valveless pulse engine demonstrator and numerical simulation. In: Pulse and Continuous Detonation Propulsion / Eds. G. Roy, S. Frolov. Moscow: TORUS PRESS, 2006. P. 294–298.
12. Levin V.A., Afonina N.E., Gromov V.G., Smekhov G.D., Khmelevsky A.N., Markov V.V. Dynamic of combustion products flow in ring nozzle with a half-closed cavity // Combustion Science and Technology. 2010. Vol. 182, No. 11–12. P. 1–16.
13. Левин В.А., Афонина Н.Е., Громов В.Г., Смехов Г.Д., Хмелевский А.Н., Марков В.В. Газодинамика и тяга выходного устройства реактивного двигателя с кольцевым соплом // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48, № 4. С. 1–13.
14. Афонина Н.Е., Смехов Г.Д., Хмелевский А.Н. Концентрационные пределы воспламенения и равновесные составы продуктов сгорания природного газа в воздухе // Отчет НИИМ МГУ. 2008. № 4960, 42 с.

Статья поступила в редакцию 28 июня 2011 г.,
после переработки — 8 июня 2012 г.