

УДК 534.222.2

ТЯГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬЦЕВЫХ И ПЛОСКИХ ЩЕЛЕВЫХ СОПЕЛ С ВНУТРЕННЕЙ ПОЛОСТЬЮ

© 2011 г. В.В. Марков¹, В.Г. Громов², Н.Е. Афонина², Г.Д. Смехов², А.Н. Хмелевский²

¹Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Москва

²НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

markov@mi.ras.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Представлены результаты расчетно-экспериментального исследования тяговых характеристик моделей оригинального выходного устройства реактивного двигателя, оснащенного кольцевым или плоским щелевым соплом. Установлены особенности течений и определены развиваемые тяги. Данные эксперимента и численного расчета хорошо согласуются.

Ключевые слова: тяга, сопло, эксперимент, численный расчет.

Щелевые плоские и кольцевые сопла с центральным телом сами по себе и в составе кластерных сопел в настоящее время активно исследуются и используются при проектировании и испытании перспективных образцов современной авиационной и ракетной техники. Выходные устройства реактивного двигателя на базе кольцевых и плоских щелевых сопел с внутренней полостью, в которых роль центрального тела выполняет автоматически формирующаяся в полости рециркуляционная зона, обладают рядом полезных характеристик. По сравнению с традиционными соплами Лавалья они имеют заметно меньшую длину вдоль вектора тяги при одинаковом расходе, обладают свойством авторегулируемости режима истечения при изменении высоты полета и поэтому рассматриваются как перспективные для реализации бесклапанного пульсирующего режима сжигания топлив [1].

Представлены результаты комплексного расчетно-экспериментального исследования тяговых характеристик модели выходного устройства реактивного двигателя, оснащенного кольцевым соплом с внутренней полостью в виде сферического сегмента. Для плоского щелевого сопла, соответствующего по геометрическим параметрам сечению кольцевого сопла вдоль его оси, дополнительно выполнена численная визуализация течения внутри полости сегмента. Течение в невязком приближении исследовалось с помощью оригинального вычислительного комплекса, позволяющего моделировать двумерные нестационарные течения многокомпонентной инертной и реагирующей

среды в открытом пространстве, в замкнутых объемах и каналах сложной геометрии. Расчеты течения с учетом вязкости выполнены с использованием нестационарных уравнений Навье – Стокса для многокомпонентной химической неравновесной модели газовой среды.

Экспериментальные исследования проведены в импульсной аэродинамической установке [2]. Проточный канал установки, в котором контролировались параметры потока, состоял из камеры сгорания, осесимметричного подводящего канала, кольцевого или плоского щелевого сопла и ресивера. Типичное рабочее время в исследуемых условиях составляло около 50 мс. В экспериментах для измерения давлений в проточной части использовались высокочастотные пьезоэлектрические и тензометрические датчики. Одновременно регистрировалось тяговое усилие тензометрическим датчиком силы. Сигналы с датчиков записывались цифровыми осциллографами HP-54624A и цифровым усилителем MGCplus. Набор одновременно измеряемых параметров потока в до- и сверхзвуковой областях течения позволял однозначным образом проводить их сопоставление с расчетными значениями соответствующих величин.

На базе уравнений Эйлера проведена серия параметрических расчетов, позволившая оптимизировать длину цилиндрического канала выхлопа выходного устройства с кольцевым соплом для обеспечения максимальной величины тяги. Длины цилиндров варьировались в пределах от 0.25 до 1.5 выходных калибров с шагом 0.25. Максимальная тяга при истечении в пространство с противодавлением 0.01 атм

реализовывалась с коротким выхлопным цилиндрическим соплом. Для устройства с коротким цилиндрическим и коническим выхлопными соплами были выполнены расчеты на базе уравнений Навье–Стокса, учитывающие вязкие свойства газов, и проведены экспериментальные исследования тяговых характеристик.

Исследована структура стационарного течения и установлено, что в полости сегмента формируется течение, подобное течению в соплах с центральным телом. Роль центрального тела при этом играет область рециркуляционного течения, образующаяся в полости сегмента. Из устройства газ вытекает в виде расширяющейся сверхзвуковой струи, сначала кольцевой, а затем конической. Угол расширения струи определяется отношением значений давления на входе в устройство к давлению в окружающем пространстве. Структура струи включает в себя области разрежения, и сжатия в скачках уплотнения, которые обеспечивают разворот потока от радиального к осевому направлению. Величина давления в областях торможения потока примерно в два раза ниже давления торможения, а максимальные значения температуры близки к значениям температуры торможения во входном потоке.

Сила тяги, измеренная в опытах, составляла около 2600 Н, а удельный импульс – около 205 с, при давлении торможения продуктов сгорания стехиометрических ацетиленовоздушных смесей на входе соплового устройства в 20 атм, что удовлетворительно соответствовало результатам расчетов и позволило верифицировать используемые расчетные модели в широком диапазоне изменения параметров торможения.

Показано, что рассмотренное сопловое устройство с коротким цилиндрическим или коническим выхлопным соплом развивает тягу и удельный импульс, значительно (примерно вдвое) превышающие соответствующие величины для звукового сопла. Определены условия реализации пульсирующего режима изменения давления в центре тяговой стенки сферической полости выходного устройства с коротким цилиндрическим выхлопным соплом. В расчетах, учитывающих вязкость газов, установлено, что при давлении торможения продуктов сгорания стехиометрических ацетиленовоздушных смесей в 4.8 атм и истечении в пространство с противодавлением 0.01 атм начальные возмущения давления в центре тяговой стенки, связанные с запуском устройства, выходят на периодический режим с амплитудой пульсаций, составляющей примерно 30%, около средних значений.

Представлены результаты численного моделирования и сравнения с экспериментом нестационарных волновых процессов, сопровождающих запуск и выход на стационарный режим течения в импульсной аэродинамической установке, оснащенной моделями сопловых устройств, имеющих во входной части осесимметричные кольцевые каналы разной формы.

Расчетно-экспериментальное моделирование было выполнено для продувок моделей воздухом, стехиометрическими ацетилено- и пропано-воздушными смесями комнатной температуры, а также их высокотемпературными продуктами сгорания. Геометрические характеристики проточных каналов моделей, для которых выполнялось численное моделирование, в точности соответствовали характеристикам моделей, продуваемых в экспериментах. В расчетах исследована полная картина динамики течения во всем проточном тракте аэродинамической установки с исследуемой моделью от момента разрыва диафрагмы, отделяющей входную полость модели от камеры высокого давления, до формирования результирующего квазистационарного истечения из кольцевого сопла в ресивер.

Определено время запуска соплового устройства и формирования квазистационарного истечения в ресивер, которое в исследованных режимах составляло около 5–7 мс и хорошо совпадало с измеренными в экспериментах значениями. При этом установлено, что на стадии запуска соплового устройства звуковая линия меняет свое положение и форму и в определенные моменты времени положение критического звукового сечения в потоке может не соответствовать минимальному геометрическому сечению кольцевого сопла. Изменение параметров торможения и рост противодействия в ресивере в пределах исследованных в расчетах времен истечения, составлявших около 20 мс, не оказывали существенного влияния на газодинамическую картину течения в сверхзвуковом потоке, характеризующуюся наличием скачков уплотнения и зон разрежения.

С помощью численного эксперимента были установлены геометрия дозвукового канала модели выходного устройства реактивного двигателя, оснащенного кольцевым соплом, и параметры торможения пропановоздушной горючей смеси, обеспечивающие условия ее самовоспламенения при сверхзвуковом затекании в полость сегмента и формирования детонационного режима сжигания смеси.

В исследовании принимали участие акаде-

мик В.А. Левин и к.ф.-м.н. И.С. Мануйлович.
Авторы выражают им искреннюю благодар-
ность.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
РФФИ (гранты № 11-01-00068, 11-08-00288, 10-08-90039-
Бел), Федерального агентства по науке и инновациям
(НИИ 8424.2010.1).*

Список литературы

1. Levin V.A., Nechaev J.N., Tarasov A.I. In: High-Speed Deflagration and Detonation: Fundamentals and Control / Eds. G.D. Roy, S.M. Frolov, R.W. Netzer, A.A. Borisov. Moscow, 2001, ELEX-KM Publisher. P. 223–238.
2. Levin V.A. et al. // Combustion Science and Technology. 2010. V. 182, No 11-12. P.1564–1579.

THRUST CHARACTERISTICS OF RING AND FLAT SLOT NOZZELS WITH AN INTERNAL CAVITY

V.V. Markov, V.G. Gromov, N.E. Afonina, G.D. Smekhov, A.N. Khmelevsky

The results of experimental and theoretical study of the thrust characteristics of the original output device of the jet engine with a ring and flat slot nozzles are presented. Specific features and trends are identified by developing thrust. The calculated and experimental data are in good agreement.

Keywords: thrust, nozzle, experiment, numerical calculation.