

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОФИЛЯ СВЕРХЗВУКОВОГО СОПЛА ПЛАЗМОТРОНА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТЕКАЮЩЕЙ ПЛАЗМЫ

Ю.А. Станкевич, В.В. Чупрасов, М.С. Третьяк

Институт тепло- и массообмена НАН Беларуси, ул. Бровки 15, 220072 Минск, Беларусь,
usa@hmti.ac.by

Abstract. For different configurations of Laval nozzle results of numerical simulation of air plasma flows are presented.

Исследования разрушения теплозащитных материалов для ракетно-космической техники обычно проводятся с помощью высокотемпературных струй плазмотронов /1/. Скорость разрушения образцов при проведении таких испытаний зависит не только от величины суммарного теплового потока, но и от распределения газодинамических параметров по радиусу струи. Для получения сверхзвукового режима истечения плазмы плазмотрона обычно используется осесимметричная насадка переменного сечения (сопло Лаваля). Основным требованием при проведении экспериментальных исследований воздействия высокотемпературных сверхзвуковых струй плазмы на образцы является равномерность распределения газодинамических параметров по выходному сечению сопла. В настоящей работе приведены результаты численного моделирования течения воздушной плазмы в сверхзвуковом сопле различной конфигурации, которые проводились с помощью комплекса FLUENT по модели течения вязкого теплопроводного газа. Расчеты зависимостей параметров воздушной плазмы, необходимых для численного моделирования проведены в приближении термодинамического равновесия с использованием программы CEAgui /2/. Полученные данные сопоставлялись с известным литературным источником /3/ и в численных расчетах использовалась аппроксимация полученных табличных зависимостей требуемых параметров в диапазоне температур 300 – 9000 К.

Расчеты проводились для сопел различного сечения. Радиус входного сечения сопла 13 мм, радиус критического сечения 7.5 мм. Геометрия сечения сопел различной конфигурации приведена на рисунке 1. Варьировалась расширяющаяся выходная область сопла: профилированное с изломами и цилиндрической критической частью (1); сглаженное без цилиндрической части в критической области (2) и конические сопла с различным углом раствора и различными радиусами на выходе от 9 до 15 мм (3-6).

Параметры плазмы на входе в сопло задавались в соответствии с экспериментами /4/. Среднемассовая температура плазмы на входе в сопло

6000 К, давление 9 атм, что при расходе воздуха равном 90 г/с и мощности плазмотрона 1.5 МВт соответствует 67% КПД плазмотрона. На выходе из сопла задавалось давление 1 атм. Стенки сопла из меди толщиной 5 мм и внешней температурой стенки 300 К, что в экспериментах обеспечивалось системой водяного охлаждения плазмотрона и насадки.

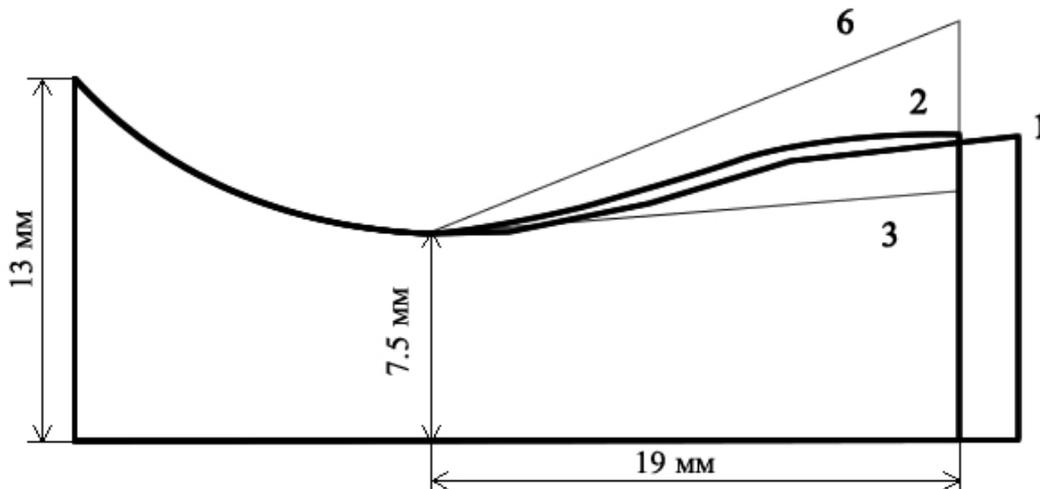


Рисунок 1. Поперечные сечения сопел

На рисунке 2 показано распределение числа Маха по сечению сопла для конфигурации (1) и (2). Приведены изолинии в диапазоне чисел Маха 1- 2.2 с шагом $\Delta M = 0.02$. Распределения приведены для полуплоскости с учетом осевой симметрии задачи. Отметим существенную роль косых скачков, возникающих на изломах профиля в случае (1) и наличием прямого скачка на оси сопла. Из приведенного распределения видно, что нет необходимости в цилиндрической критической части сопла, для которой характерно звуковое течение с постоянным числом Маха ~ 1 . Сглаженный профиль выходной части сопла обеспечивает достаточно однородное распределение скорости потока по сечению.

Поскольку изготовление сопел сложной формы достаточно затруднено, были проведены расчеты сопел с конической выходной частью. Варьировалось выходное сечение сопла от 9 до 15 мм. При длине выходной части сопла 19 мм углы раствора сверхкритической части сопла изменялись от 4.5 (вариант 3) до 21.5 градуса (вариант 6). На рисунке 3 приведены распределения температуры (а) и динамического давления (б) для сглаженного сопла и сопел с конической выходной частью (3-6). Видно, что простая коническая форма выходной части сопла (с углом раствора до 13 градусов) обеспечивает равномерное распределение температуры и динамического давления на выходе из сопла. Отметим, что сглаженная форма выходной части сопла (вариант 2) характеризуется неравномерным распределением динамического давления с максимумом в периферийной области по радиусу.

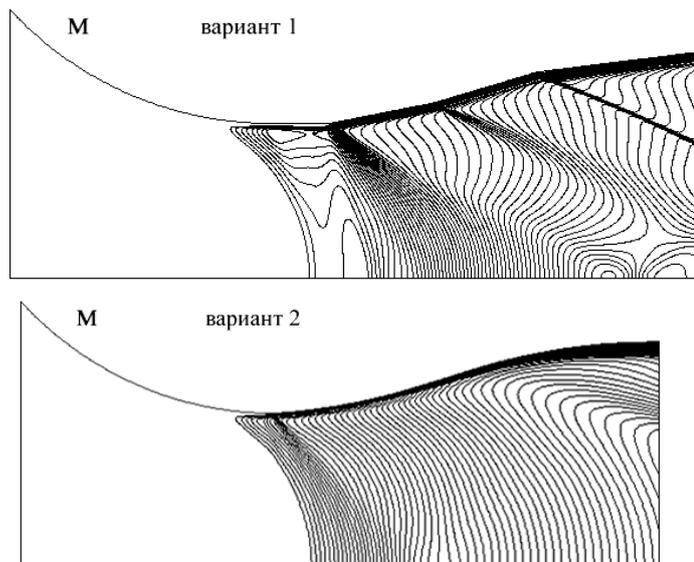


Рисунок 2. Распределение изолиний числа Маха в сопле с изломами (1) и сглаженного профиля (2).

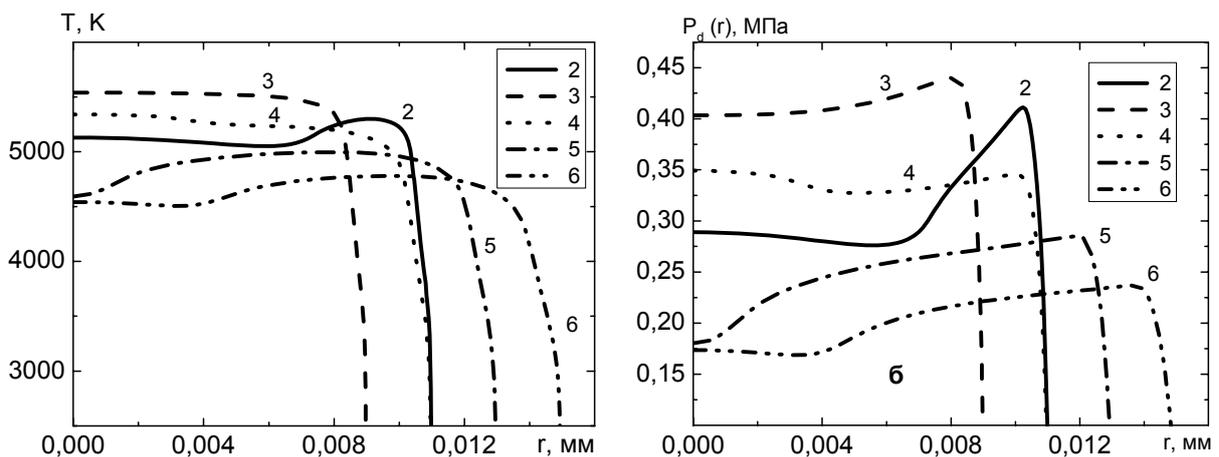


Рисунок 3. Радиальное распределение температуры и динамического давления на выходе из сопел различной конфигурации.

Литература

1. **Фролов Г.А., Дверняков В.С., Пасичный В.В., Захаров Ф.И.** Инженерно-физический журнал, т. XL, №6 (1981) 965 – 969.
2. <http://www.grc.nasa.gov/www/CEAWeb/>.
3. **Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М. Наука, главная редакция физико-математической литературы (1972), 720 с.
4. **Чупрасов В.В., Третьяк М.С., Адериха В.Н., Клишин А.Ф.** Пятый белорусский космический конгресс: материалы конгресса. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, (2011), 81-84.