

## ТЕЧЕНИЯ В ДОННОЙ ОБЛАСТИ КОЛЬЦЕВЫХ СОПЕЛ ВНЕШНЕГО РАСШИРЕНИЯ

Рассмотрена схема течения в кольцевом сопле внешнего расширения с укороченным центральным телом. Выделены режимы открытой донной области и замкнутой донной области в кольцевых соплах рассматриваемого типа в зависимости от величины давления внешней среды. Определена ударно-волновая картина течения в кольцевом сопле на режиме замкнутой донной области.

**Ключевые слова:** кольцевое сопло внешнего расширения, давление внешней среды, режим донной области, ударно-волновая картина течения.

Кольцевое сопло, как и любое другое сопло, представляет собой газодинамическое устройство, предназначенное для создания осевой тяги и управляющих усилий либо для создания на выходе из сопла газового потока с заданными свойствами. Тяговые характеристики сопла при заданных параметрах рабочего тела на входе и параметрах внешней среды полностью определяются его геометрической конфигурацией.

Решение поставленной выше задачи находится с помощью математического моделирования течения газа [1]. Выбор надежного и эффективного метода математического моделирования необходимо провести с учетом характера газодинамических процессов, протекающих в кольцевых соплах, и анализа ударно-волновой структуры течения в кольцевом сопле заданной геометрической конфигурации при заданных параметрах рабочего тела. На рисунке 1 представлена геометрическая конфигурация кольцевого сопла и его основные параметры.

На рисунке 1 использованы следующие обозначения:  $R$  – радиус, на котором расположена внутренняя граница кольцевого минимального сечения;  $R_a$  – радиус выходной части сопла;  $h$  – ширина кольцевого минимального сечения сопла;  $L_c$  – длина сверхзвуковой части сопла;  $\theta_*$  – угол наклона плоскости минимального сечения сопла.

В соответствии с целью настоящего исследования проведено математическое моделирование влияния внешнего давления на ударно-волновую картину течения в кольцевых соплах внешнего расширения. Течения в кольцевых соплах всех описанных типов имеют одну общую черту, а именно: наличие в поле течения интенсивных ударных волн и волн разрежения, положение которых внутри сопла определяет-

ся его геометрическими параметрами, параметрами рабочего тела и давлением внешней среды. Следовательно, многообразие конфигураций кольцевых сопел и условий их работы предполагает и многообразие ударно-волновых конфигураций в рассматриваемых соплах.

Характерной особенностью течения в таком сопле является наличие развитой отрывной области за торцом укороченного центрального тела, параметры которой определяются ударно-волновым взаимодействием газовых потоков, истекающих из минимального сечения сопла, представляющего кольцевую щель, плоскость которой имеет существенный наклон к продольной оси сопла.

Данная особенность приводит к возникновению в потоке значительных градиентов газодинамических параметров, определяющих волновую структуру течения. В ходе проведенного численного моделирования исследована детальная структура течения в кольцевых соплах с укороченным центральным телом с целью определения распределения давления по поверхности кольцевого сопла, которое в ко-

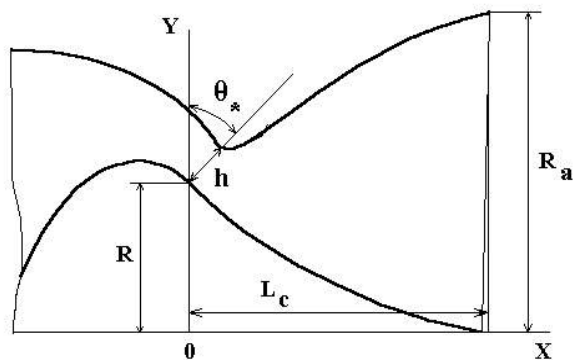


Рисунок 1. Геометрические параметры кольцевого сопла

нечном итоге и определяет тяговые характеристики сопла.

Сравнение тяговых характеристик кольцевых сопел (да и сопел любого типа) удобно проводить, используя такую характеристику, которая бы не зависела от габаритных размеров сопла и величины расхода рабочего тела через сопло, а характеризовала бы эффективность организации процесса истечения газа из сопла, которое определяется геометрической конфигурацией сопла.

Такой характеристикой является коэффициент тяги, определяемый как отношение тяги сопла к площади минимального сечения сопла и давлению торможения на входе в сопло:

$$K_T = \frac{R_{\text{сопла}}}{F_* \cdot P_o}, \quad (1)$$

где  $R_{\text{сопла}}$  – тяга сопла,  $F_*$  – площадь минимального сечения сопла,  $P_o$  – давление торможения на входе в сопло.

Для проведения математического моделирования характеристик кольцевых сопел выбрано сопло с частично укороченным центральным телом, которое является типичной конфигурацией для кольцевых сопел исследуемого типа.

Расчет поля течения в кольцевом сопле осуществлен с помощью метода установления с использованием расчетной схемы, описанной выше. В поле течения строится расчетная сетка с большим количеством ячеек, что позволяет существенно повысить точность расчета и увеличить скорость сходимости нестационарного решения к стационарному. В качестве критерия установления параметров потока принято постоянство распределения давления по обтекаемым поверхностям сопла и постоянство расхода газа через кольцевое минимальное сечение сопла. При постоянстве этих параметров, как показывает практика вычислений, величина тяги также является установившейся величиной.

В рассматриваемой конфигурации кольцевого сопла заметно существенное повышение давления на поверхности центрального тела в результате наличия системы скачков уплотнения, возникающей непосредственно после прохождения газом через кольцевую щель. Газ движется вдоль центрального тела в тонком сжатом слое, при этом диаметр ближнего следа существенно меньше диаметра, на котором расположено кольцевое минимальное сечение. Такой характер течения определяется низким перепадом

давлений в сопле и является проявлением свойства саморегулируемости течения в кольцевом сопле по давлению внешней среды. За торцом укороченного центрального тела формируется замкнутая отрывная донная область, давление в которой меньше, чем в окружающей эту область струе. В целом, тяговые характеристики сопла определяются интегралом давления по всем поверхностям сопла, с учетом тяги создаваемой кольцевым минимальным сечением.

Результаты математического моделирования газодинамических характеристик кольцевого сопла различных геометрических конфигураций показали высокую эффективность применяемых методов С.К. Годунова – В.П. Колгана [2], [3], [4] и М.Я. Иванова – А.Н. Крайко – Н.В. Михайлова [5] для расчета течений в кольцевых соплах.

По результатам численного моделирования определены картины течения в кольцевых соплах различных конфигураций [1], [6].

Для рассматриваемых кольцевых сопел с укороченным центральным телом характерны два типа донной области за торцом укороченного центрального тела: «открытая донная область» и «замкнутая донная область» (рис. 2).

При работе сопла с открытой донной областью давление на торце укороченного центрального тела полностью определяется давлением внешней среды (практически равно ему). При работе сопла с замкнутой донной областью давление в ней не равно давлению внешней среды, а полностью зависит от параметров газа, вытекающего из рассматриваемого сопла.

Результаты расчета ударно-волновой картины течения для режима замкнутой донной области представлены на рисунке 3. На данном рисунке приведена типичная схема течения в кольцевом сопле с укороченным центральным телом на режиме «закрытой» донной области для различных соотношений давления на срезе сопла  $P_a$  и давления внешней среды  $P_H$ . Сокращениями на нем обозначены: УВ – ударная волна, ВР – волна разрежения, ГС – граница струи, ОО – отрывная область.

Ударно-волновая картина течения, представленная на рисунке 3а), соответствует высокому давлению газового потока в выходном сечении кольцевого сопла, превышающему давление внешней среды, ударно-волновая картина течения, представленная на рисунке 3б), соответствует низкому давлению газового по-

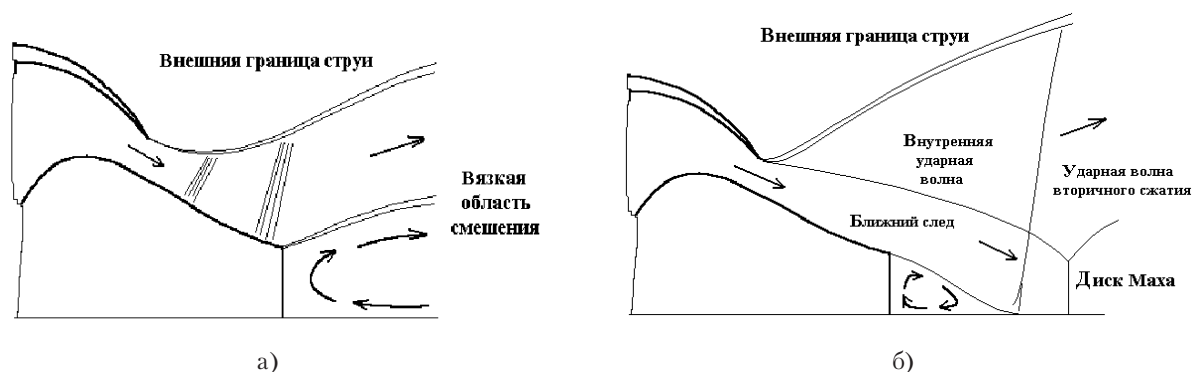


Рисунок 2. Течение в донной области кольцевого сопла с укороченным центральным телом на различных режимах: а – открытая донная область; б – замкнутая донная область

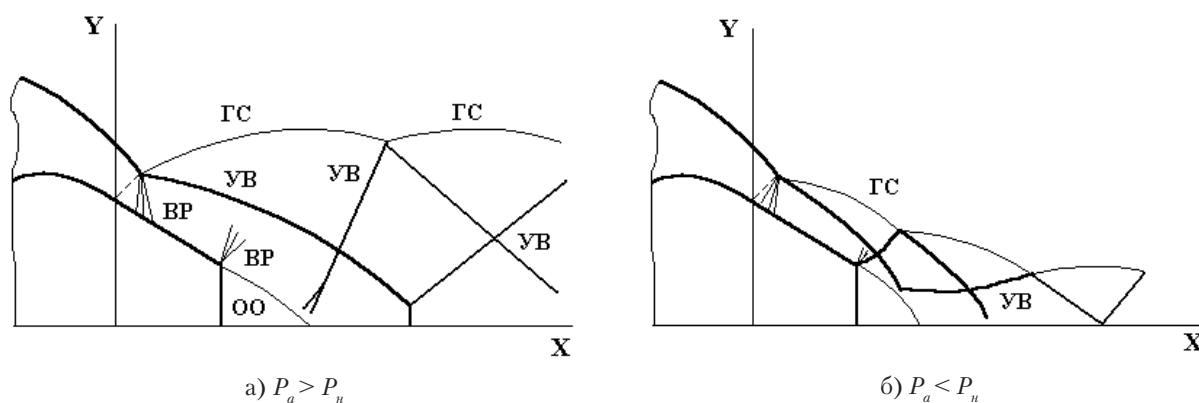


Рисунок 3. Схемы течения в кольцевом сопле с укороченным центральным телом при различных отношениях давлений

тока в выходном сечении кольцевого сопла, имеющему значение ниже давления внешней среды.

### Заключение

Полученные результаты исследования зависимости режима донной области кольцевого

сопла внешнего расширения с укороченным центральным телом и ударно-волновой картины течения от давления внешней среды могут быть использованы при определении газодинамической структуры потока в кольцевых соплах летательных аппаратов различного назначения и их тяговой эффективности.

20.08.2014

### Список литературы:

1. Карташев, А.Л. Математическое моделирование течений в кольцевых соплах / А.Л. Карташев, М.А. Карташева. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. 2011. – 158 с.
2. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов и др. – М.: Наука, 1976. – 400 с.
3. Колган, В.П. Конечно-разностная схема для расчета двумерных разрывных решений нестационарной газовой динамики / В.П. Колган // Уч. зап. ЦАГИ. – 1975. – Т.6. – №1. – С. 9–14.
4. Карташева, М.А. Моделирование динамики совершенного газа в кольцевых соплах летательных аппаратов / М.А. Карташева. – Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2012. – Выпуск 20. – №33 (292). – С. 40–46.
5. Иванов, М.Я. Метод сквозного счета двумерных и пространственных сверхзвуковых течений / М.Я. Иванов, А.Н. Крайко, Н.В. Михайлов // ЖВМ и МФ. – 1972. – Т.12. – №2. – С. 441–463.
6. Карташева, М.А. Математическое моделирование течений в областях отрыва потока / М.А. Карташева. – Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2008. – Выпуск 11. – №10 (110). – С. 36–44.

Сведения об авторе:

**Карташева Марина Анатольевна**, доцент кафедры летательные аппараты и автоматические установки аэрокосмического факультета Южно-Уральского государственного университета, кандидат технических наук  
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76, тел. (351) 267-94-61, e-mail: ma\_kartasheva@mail.ru