

УДК 533

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ДАВЛЕНИЯ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬЦЕВЫХ СОПЕЛ ВНЕШНЕГО РАСШИРЕНИЯ

М.А. Карташева, А.Л. Карташев

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 рис. 1 представлена геометрическая конфигурация кольцевого сопла и его основные параметры.

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 определяется 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.

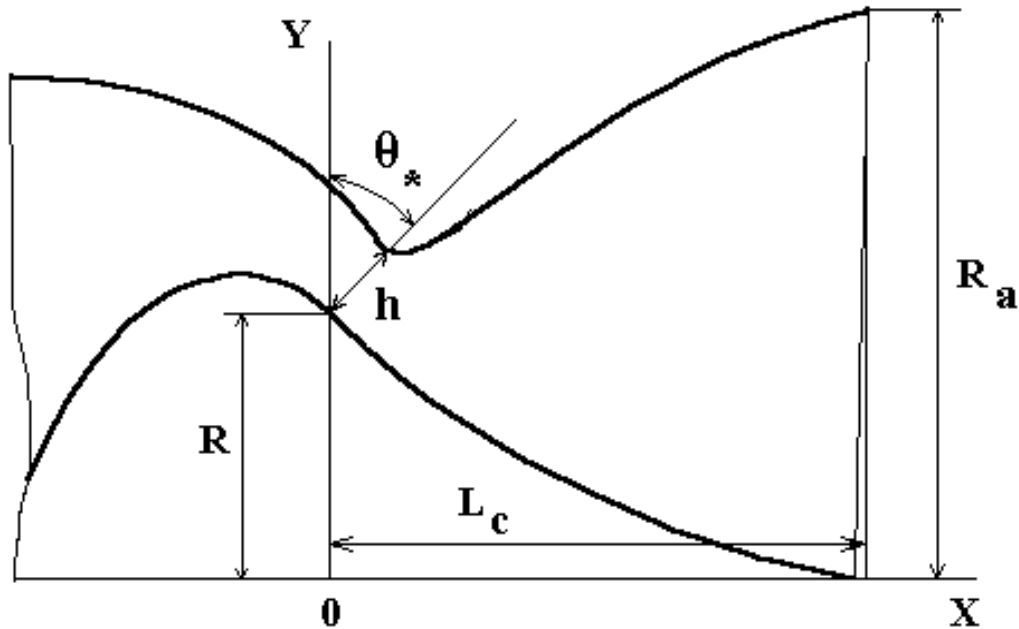


Рис. 1. Геометрические параметры кольцевого сопла

(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; Θ_* – угол наклона плоскости минимального сечения 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 конечном итоге и определяет тяговые характеристики сопла.

Сравнение тяговых характеристик кольцевых сопел (да и, вообще, 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 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 торцем 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.

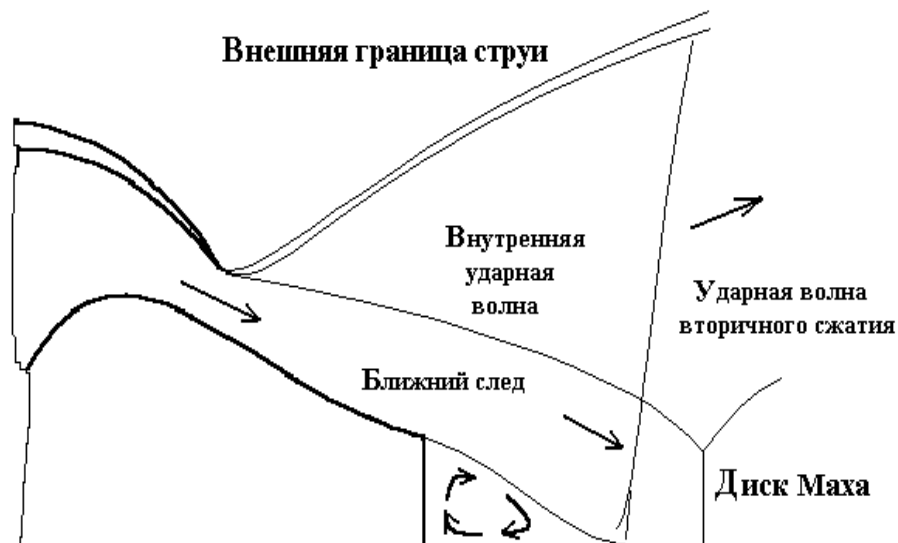
Результаты математического моделирования газодинамических характеристик кольцевого сопла различных геометрических конфигураций показали высокую эффективность применяемых методов С.К. Годунова – В.П. Колгана и М.Я. Иванова – А.Н. Крайко – Н.В. Михайлова для расчета течений в кольцевых соплах.

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

Для рассматриваемых кольцевых сопел с укороченным центральным телом характерны два типа донной области за торцем 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.



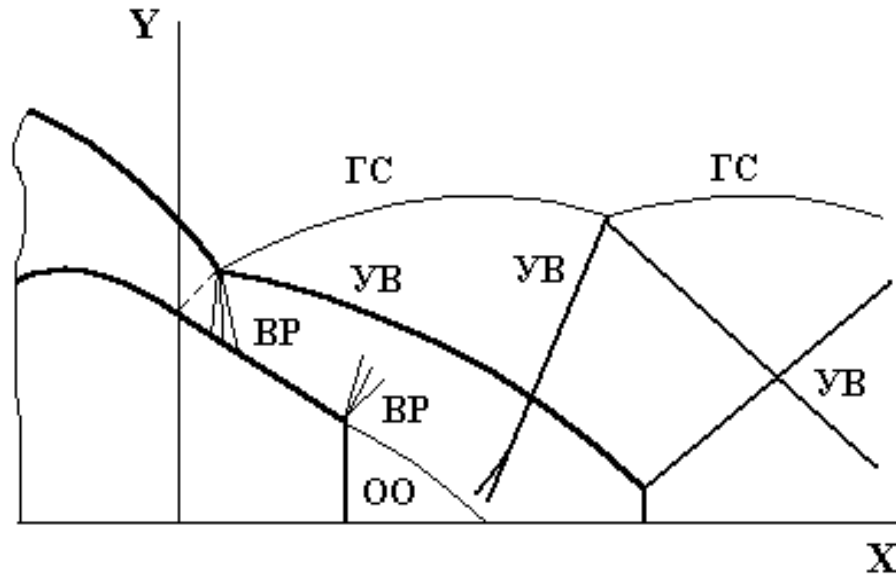
а)



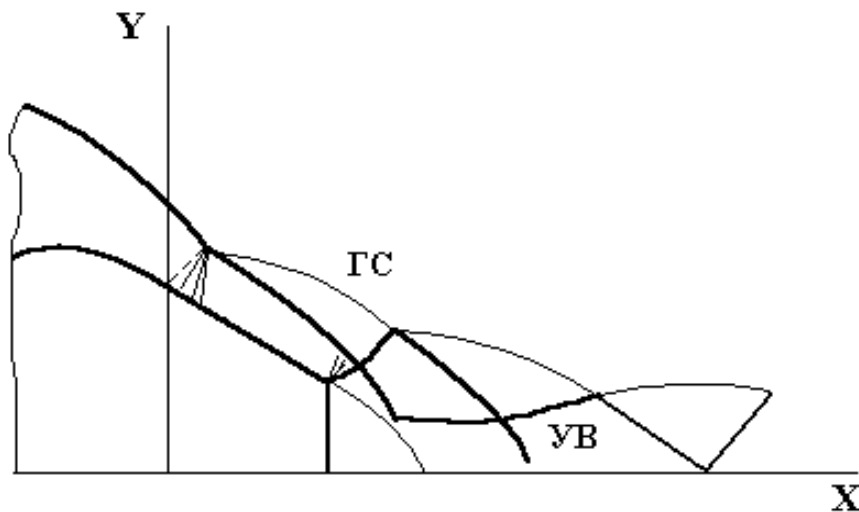
б)

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

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.



а) $P_a > P_H$



б) $P_a < P_H$

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

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 потока 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.

Библиографический список

1. Карташев, А.Л. Математическое моделирование течений в кольцевых соплах / А.Л. Карташев, М.А. Карташева. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 158 с.

[К содержанию](#)