электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

УДК 621.454.3.023.054.8

Исследование силовых факторов, обусловленных несимметричностью течения газа по сопловому раструбу

Федотенко В.М., *студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Ракетные двигатели»

Научный руководитель: Федотова К.В., ассистент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Ракетные двигатели»
daj@bmstu.ru

В работе проводится исследование силовых факторов, обусловленных несимметричностью течения газа по раструбу соплового управляющего блока (СУБ) с использованием методов вычислительной гидродинамики, реализованных в программном комплексе ANSYS CFX, а именно, определяется величина угла отклонения вектора тяги и величина боковой силы для СУБ с кососрезанным раструбом и для СУБ с переменной степенью открытия минимального сечения.

Сопловые управляющие блоки предназначены для обеспечения управляемого создания заданных уровней тяг (режимов работы), управляемого перевода работы двигательной установки (ДУ) с режима на режим и обеспечение стабилизации давления в камере сгорания на соответствующих режимах, а также перераспределения газа между СУБ [1].

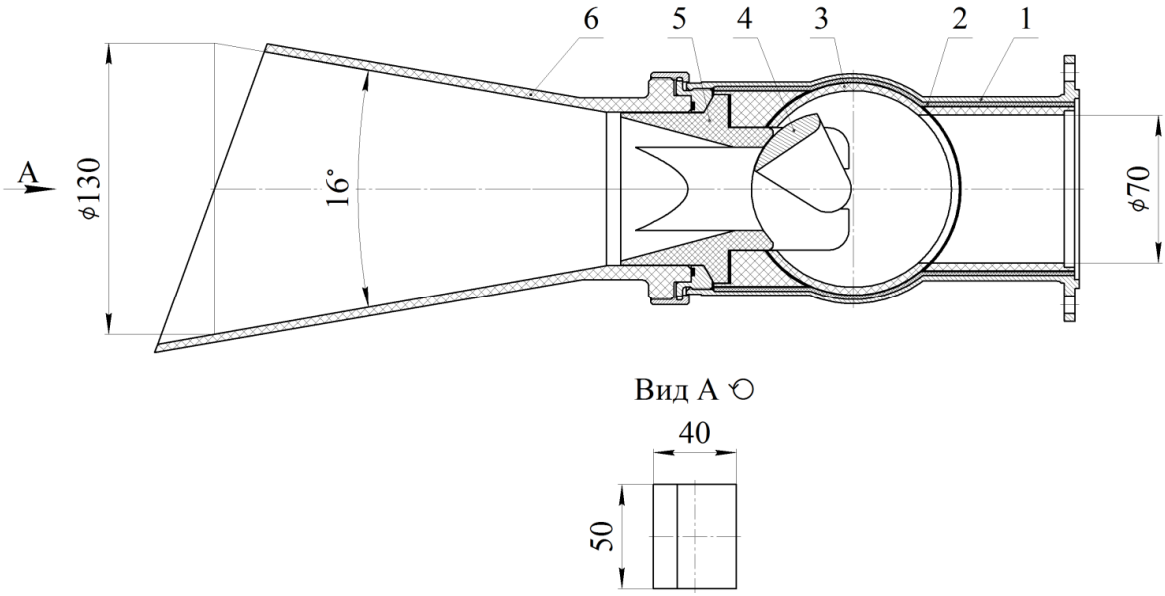


Рис. 1. Конструкция СУБ: 1 - корпус; 2 - ТЗП; 3 - облицовка; 4 – заслонка; 5 - вкладыш критического сечения; 6 - сопловой раструб

Регулирование осуществляется путем изменения расхода продуктов сгорания, истекающих через сопло за счет перекрытия части критического сечения с помощью заслонки. Само критическое сечение имеет форму прямоугольника, что обеспечивает линейную зависимость площади критического сечения от угла поворота заслонка, а следовательно и угла поворота рулевого привода.

Особо широкое применение СУБ находят в регулируемых двигательных установках, активно внедряются в ДУ космического назначения — СУБ будут использоваться в ДУ системы аварийного спасения и посадочной ДУ (ПТДУ) разрабатываемого пилотируемого транспортного корабля (ПТК).

Использование СУБ в такого рода ДУ связано со значительными компоновочными требованиями, что обуславливает использование кососрезанных сопл. Так применение СУБ в ПТДУ связано с необходимостью размещения сечений среза СУБ на боковой поверхности летательного аппарата (на днище расположено теплозащитное покрытие, кроме того нежелательно дополнительное воздействие аэродинамического нагрева на раструбы сопла).

Как видно, СУБ применяются в ответственных системах, поэтому важно учитывать и определять влияние рассматриваемых конструктивных особенностей на тяговые, а, следовательно, и траекторные характеристики.

Решение поставленной задачи проводится в следующей последовательности:

1. постановка задачи;

2. построение геометрии расчетной области;

3. построение расчетной сетки;

4. создание расчетной модели (задание граничных условий);

5. проведение численного расчета;

6. анализ и оценка результатов.

При расчете рассматривался модельный СУБ, основные геометрические размеры которого представлены на рис. 1.

Задача решалась в стационарной постановке. При расчете использовалась модель течения Shear Stress Transport (сжимаемая), которая является комбинацией моделей k-ε и k-ω. Использование такой модели позволяет учесть наличие вихревых зон на входе в сопло.

Расчетная сетка выбрана неструктурированной тетраэдрической с призматическим пограничным слоем у всех стенок. Призматический пограничный слой позволяет увеличить точность расчетной сетки в области градиентов параметров газового потока.

Благодаря тому, что задача является симметричной относительно одной из плоскостей, возможно рассмотрение симметричной части модели, что позволяет значительно сократить время, затрачиваемое на вычисления.

При создании расчетной модели использовался опыт работы [2].

Число ячеек расчетной сетки — около 2 млн.

Расчет проводился при следующих граничных условиях:

— давление газового потока на входе в СУБ $p_к$ = 12 МПа;

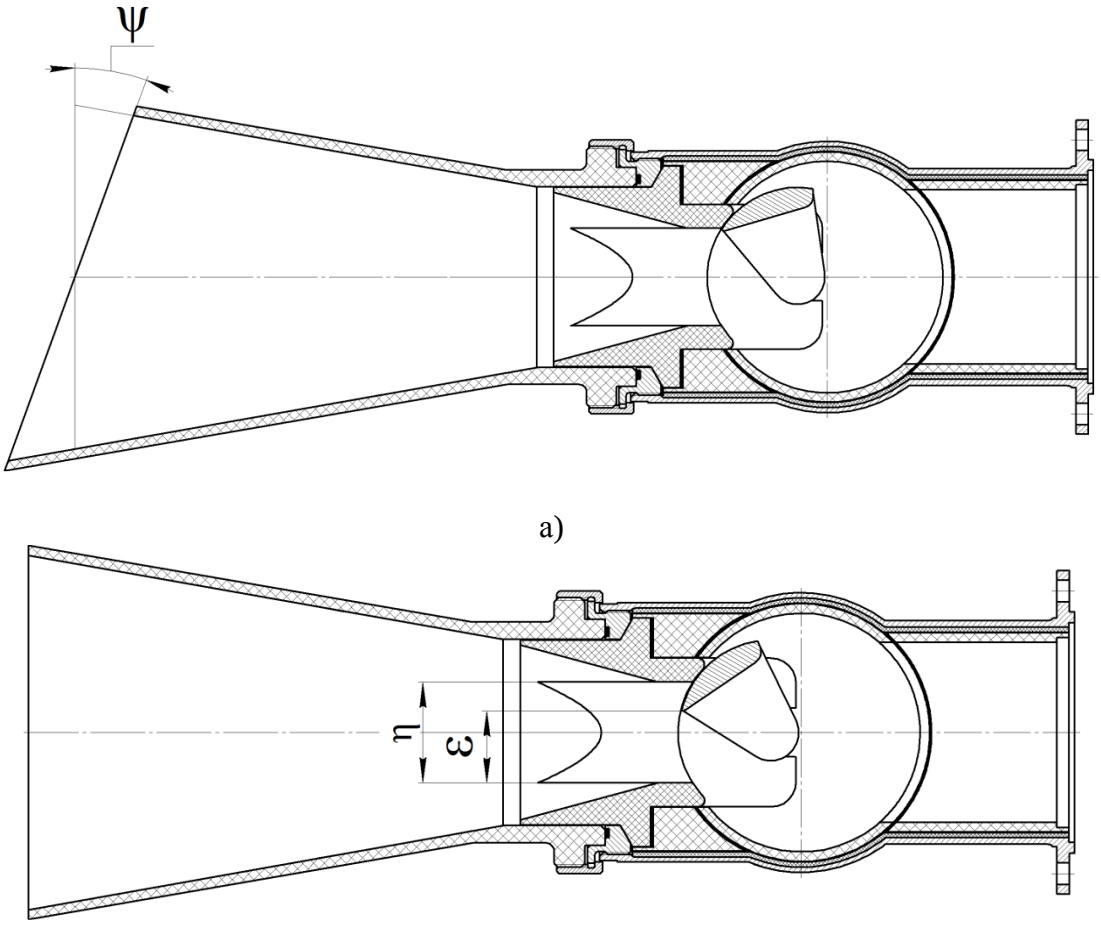
— температура газового потока на входе в СУБ $T_к$ = 2300 К;

— давление окружающей среды p_h = 0,1 МПа;

— температура окружающей среды T_h = 273 К.

В качестве определяемых параметров были выбраны силы, действующие со стороны газового потока на стенки СУБ, вдоль координатных осей.

В первом расчетном случае рассматривался СУБ с кососрезанным сопловым раструбом (рис. 2, а) при различных углах среза ψ при полностью открытом минимальном сечении, во втором — СУБ с прямым сопловым раструбом (рис. 2, б) при различных степенях перекрытия минимального сечения $\delta = \varepsilon/\eta$.



а)

б)

Рис. 2. Варианты исполнения СУБ: а) С кососрезанным сопловым раструбом; б) С прямым сопловым раструбом

В результате расчетов получены значения сил, действующих со стороны газового вдоль оси СУБ $R_{ос}$ и боковых сил $R_{бок}$.

Затем определялось значение относительной боковой силы:

$$\overline{R}_{бок} = \frac{R_{бок}}{R_{ос}}$$

и значение угла отклонения вектора тяги:

$$\psi = \arcsin\left(\frac{R_{бок}}{R_{ос}}\right).$$

Результаты расчетов приведены в табл. 1 и 2.

Также в результате расчетов получены поля распределения основных газодинамических параметров потока (рис. 5 — 8).

Таблица 1

Результаты расчетов для случая кососрезанного раструба

Угол среза сопла ψ,°	15	30	45
Угол отклонения вектора тяги φ,°	−0,298	−0,648	−1,144
Относительная боковая сила $R_{бок}$	0,012	0,025	0,042

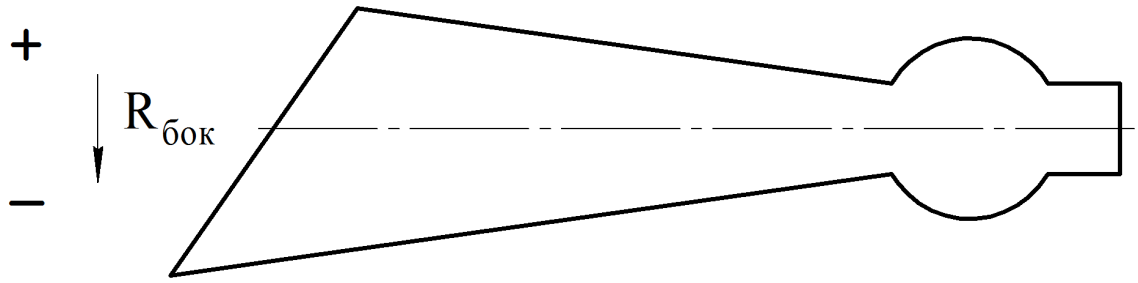


Рис 3. К результатам расчета для случая кососрезанного раструба

Наибольшая величина отклонения вектора тяги и относительной боковой силы соответствуют наибольшему углу среза, что объясняется наибольшей длиной неуравновешенной части сопла [3].

Таблица 2

Результаты расчетов для случай перекрытия минимального сечения

Степень открытия критического сечения δ	0,25	0,50	0,75
Угол отклонения вектора тяги φ,°	−5,763	−3,640	−0,997
Относительная боковая сила $R_{бок}$	0,1	0,063	0,017

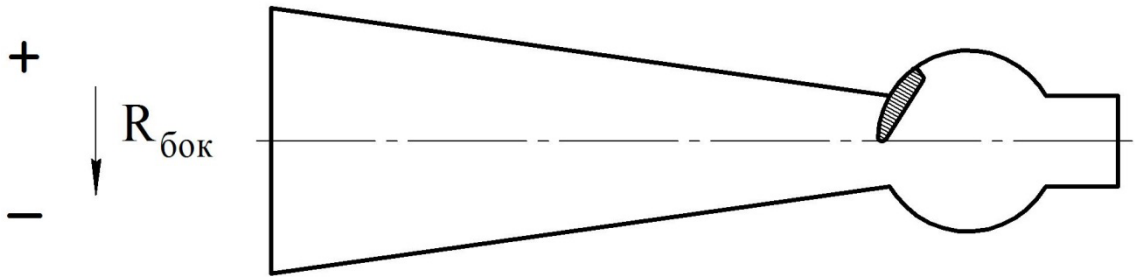
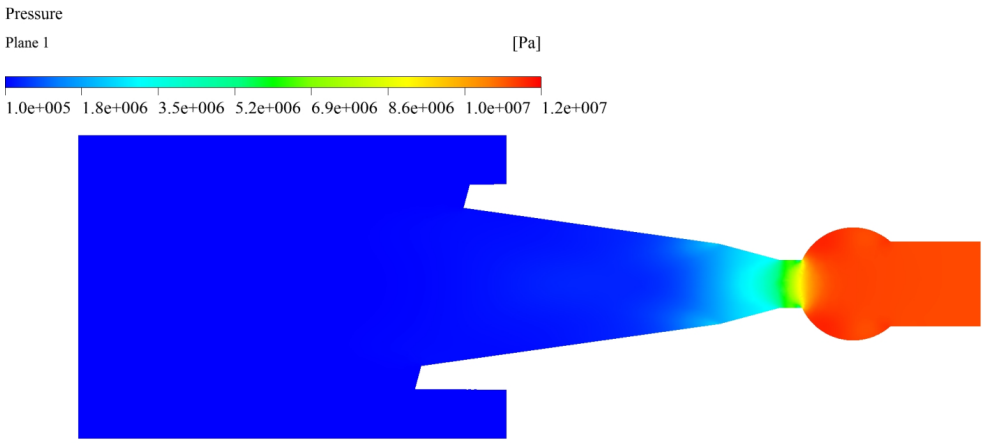
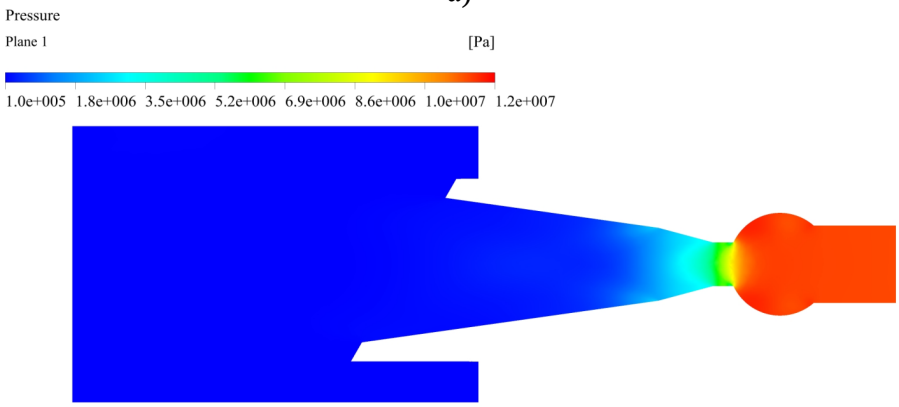


Рис. 4. К результатам расчета для случай перекрытия минимального сечения

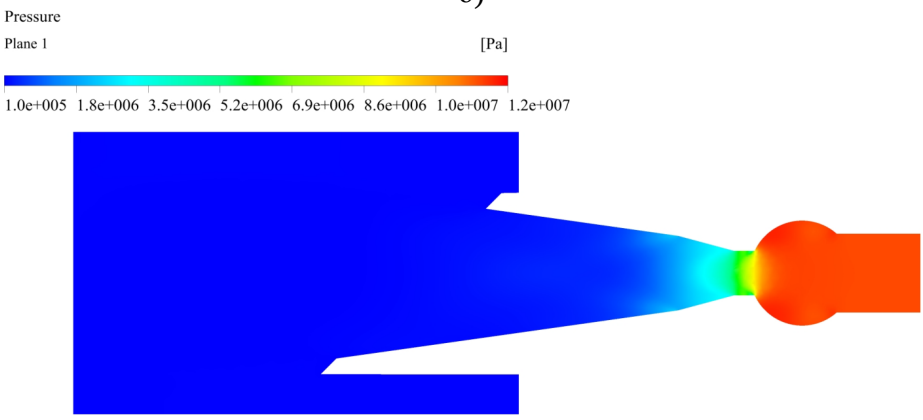
Наибольшая величина отклонения вектора тяги и относительной боковой силы соответствуют наименьшей степени открытия минимальная сечения, что объясняется наибольшим размером отрывной зоны, образующейся за заслонкой [4].



а)

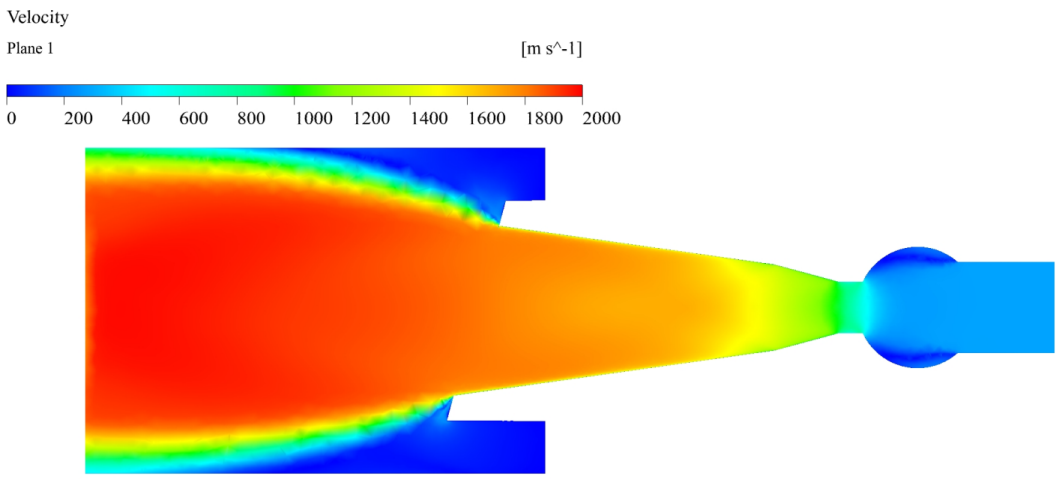


б)

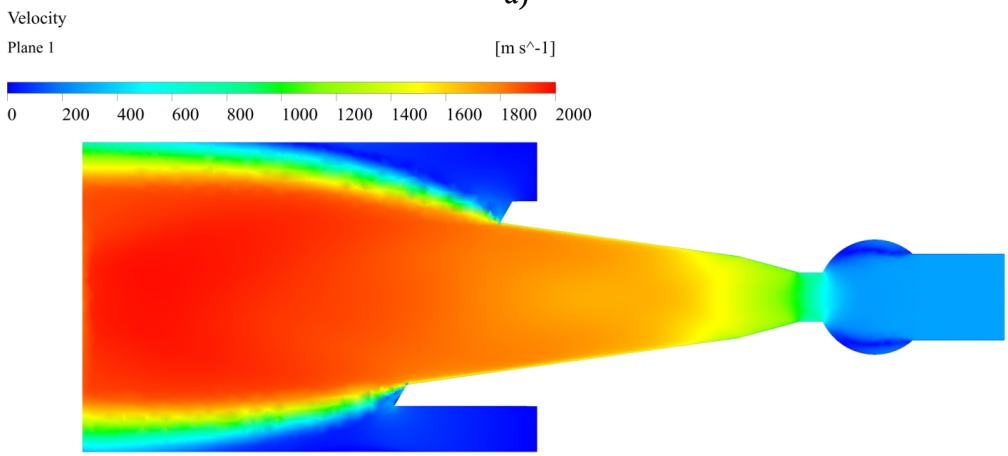


в)

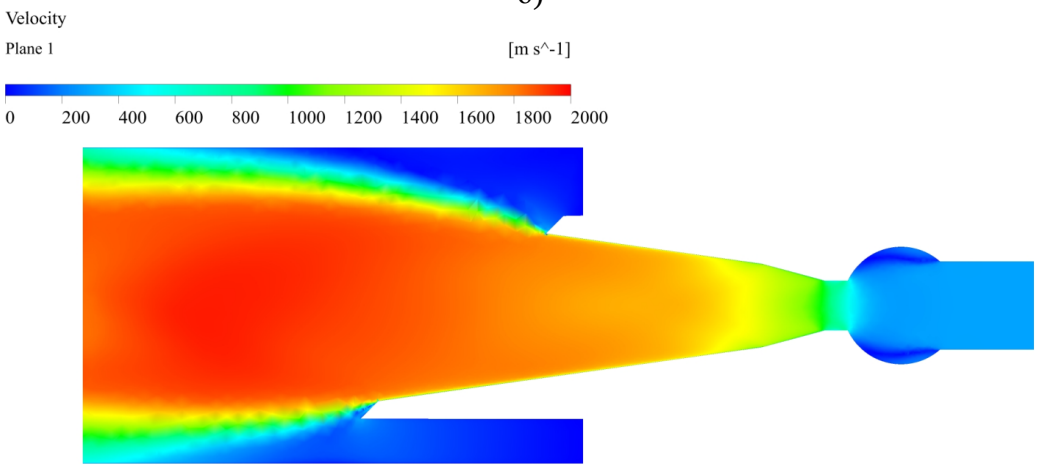
Рис. 5. Поля распределения давлений для различных значений угла среза раструба: а) ψ = 15°; б) ψ = 30°; в) ψ = 45°



а)

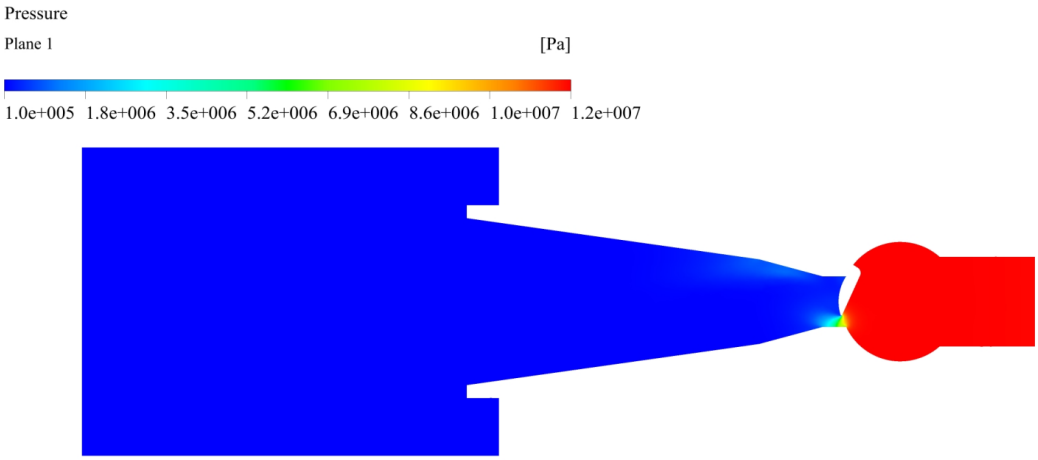


б)

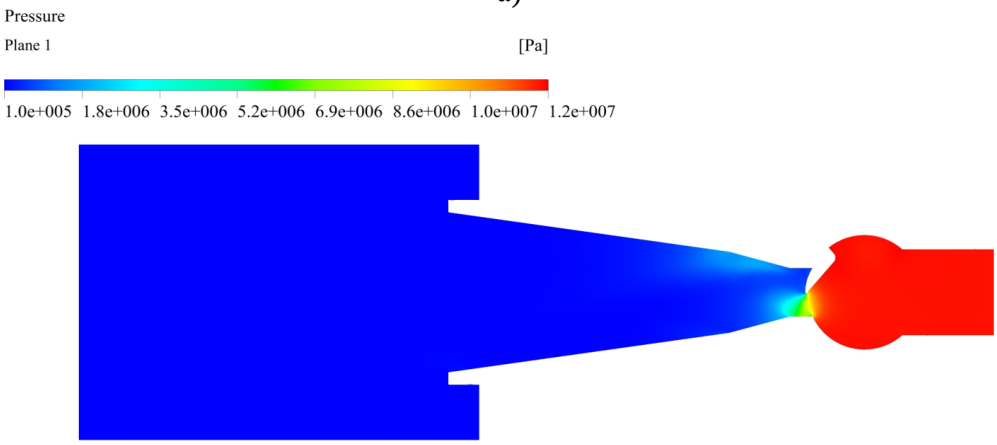


в)

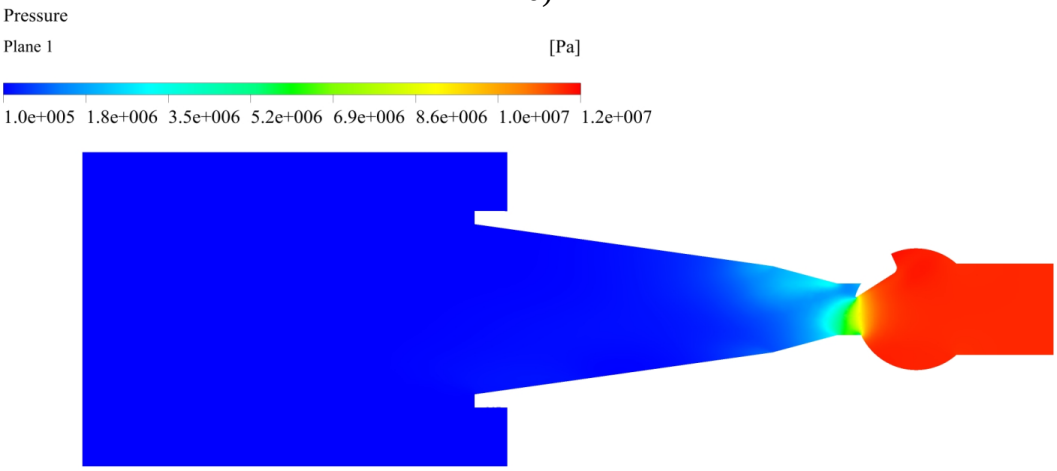
Рис. 6. Поля распределения скоростей потока для различных значений угла среза раструба: а) ψ = 15°; б) ψ = 30°; в) ψ = 45°



а)



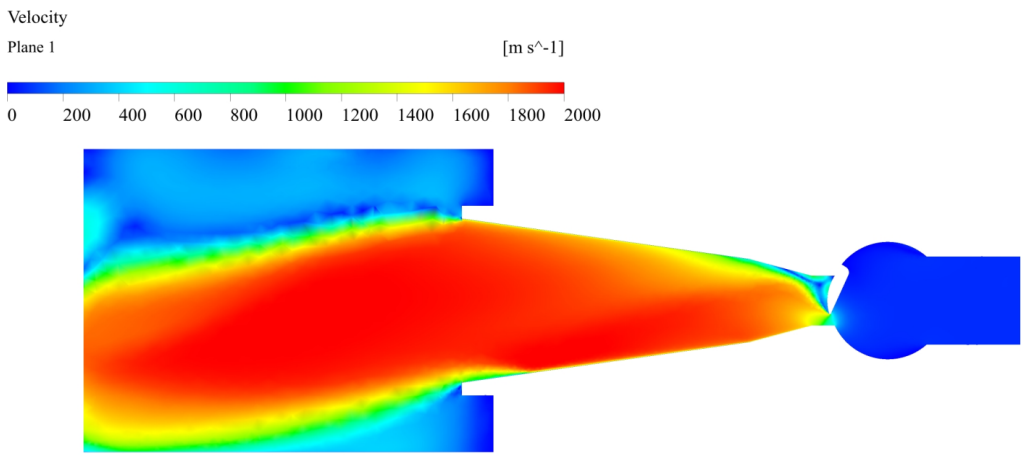
б)



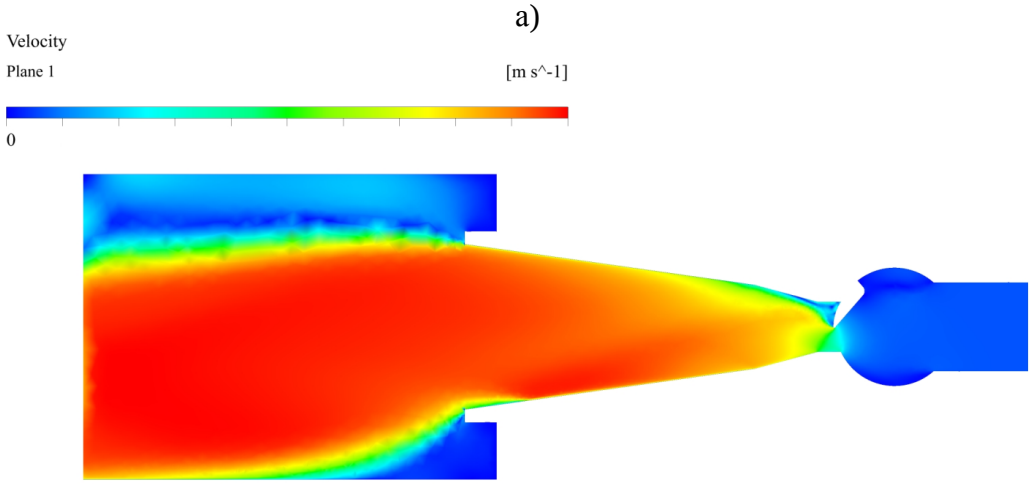
в)

Рис. 7. Поля распределения давления для различных степеней открытия минимального сечения:

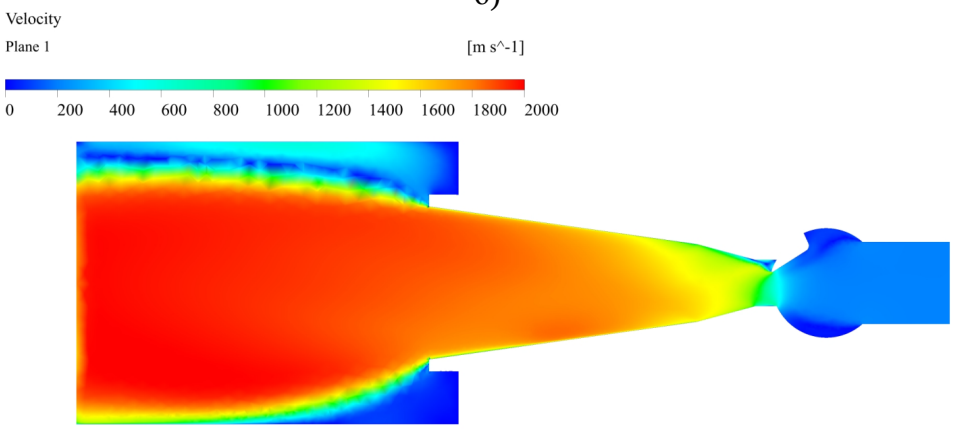
а) δ = 0,25; б) δ = 0,5; в) δ = 0,75



а)



б)



в)

Рис. 8. Поля распределения скоростей потока для различных степеней открытия минимального сечения: а) δ = 0,25; б) δ = 0,5; в) δ = 0,75

Из расчетов видно, что отклонение вектора тяги и относительная боковая сила имеют существенную величину, особенно при перекрытии минимального сечения (до 6° и 10%, соответственно).

Следует отметить, что результаты расчета имеют тот же характер, что и результаты аналитических инженерных расчетов, приведенных в литературе [3].

Результаты расчетов численными методами могут использоваться на этапах эскизного проектирования, а при их подтверждении точными аналитическими расчетами и результатами экспериментальной отработки, и на дальнейших этапах проектирования.

Список литературы

1. Соломонов Ю.С., Липанов А.М., Алиев А.В., Дорофеев А.А., Черепов В.И. Твердотопливные регулируемые двигательные установки / под ред. А.М. Липанова, Ю.С. Соломонова. М.: Машиностроение, 2011. 416 с.
2. Сухов А.В., Федотова К.В, Шмаркова Л.И. Численное исследование характеристик сверхзвукового воздухозаборного устройства прямоточных воздушно-реактивных двигателей // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 11. DOI: 10.7463/1114.0740091.
3. Гребенкин В.И., Кузнецов Н.П., Черепов В.И. Силовые характеристики маршевых твердотопливных двигательных установок и двигателей специального назначения. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2003. 356 с.
4. Орлов Б.В., Мазинг Г.Ю. Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе. М.: Машиностроение, 1979. 329 с.