

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КООРДИНАТ ЦЕНТРА ДАВЛЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ ВЕКТОРОМ ТЯГИ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Гордеев С.Н., к.т.н., доц. Дехтяр Д.А., Янтиков А.А.  
Тульский государственный университет, Тула, Россия

Для управления ракет могут применяться газодинамические органы управления вектором тяги (ОУВТ). Они создают управляющие силы и моменты за счёт воздействия на истекающую газовую струю из сопла. При определении параметров рулевой машинки для такого органа управления необходимо определение центра давления ОУ.

Целью данной работы является определение местоположения центра давления на ОУВТ, исследование характера зависимости управляющего усилия органа управления от его угла отклонения. Для достижения этой цели будем производить расчёт газодинамического потока, действующего на ОУВТ при различных углах его отклонения. Для исследования были выбраны дефлектор и разрезное сопло.

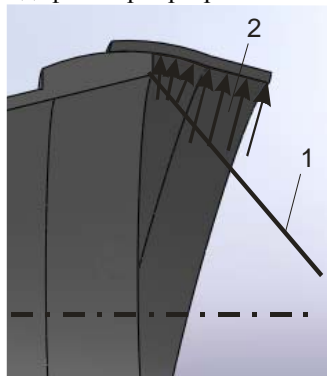


Рис. 1. Схема сопла с дефлектором: 1 – скачок уплотнения, 2 – зона с повышенным давлением

При вводе органа управления в газовый поток возникает косой скачок уплотнения, замкнутый ударной волной. Перед преградой образуется зона отрыва с повышенным давлением, за преградой — зона с пониженным давлением. Отрывное течение приводит к перераспределению давления в сопле и ОУ, создавая управляющее усилие. Таким образом, практически вся боковая сила создаётся вследствие неуравновешенного поля давления на внутренней, вдвинутой в поток поверхности ОУ и примыкающей части раструба сопла.

Математическая модель построена на системе (1), в которую входят следующие уравнения: Навье-Стокса (движения и неразрывности), энергии, состояния. Дифференциальное уравнение движения в форме Навье-Стокса описывает движение вязкой сжимаемой жидкости или газа и справедливо как для ламинарного, так и для турбулентного движения.

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \times \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \left( (\mu + \mu_t) (\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T) \right), \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = Q_1, \\ \frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} H) = \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \left( \left( \frac{1}{c_p} + \mu_t \right) \nabla H \right) + Q_2, \\ P = \rho R T, \end{cases} \quad (1)$$

При выборе программного продукта для достижения вышепоставленных целей были рассмотрены следующие критерии: простота изучения и использования, интерфейс, техническая поддержка, математические модели расчётов, скорость и точность решения, допущения.

По этим критериям был выбран российский продукт [FlowVision](#) компании «ТЕСИС», предоставленный нам для выполнения этой работы.

Данный программный продукт основан на конечно-объёмном методе решения уравнений газодинамики. Моделируемые течения включают в себя стационарные и нестационарные, сжимаемые и несжимаемые потоки жидкости и газа. Использование различных моделей турбулентности и адаптивной расчётной сетки позволяет моделировать сложные движения потока, включая течения с сильной закруткой, горением.

Поскольку программный пакет FlowVision не имеет собственного аппарата геометрического проектирования, расчётная сетка была получена моделированием ОУВТ при помощи программного продукта SolidWorks и импортирование модели с последующим разбиением на элементарные участки непосредственно во FlowVision.

Начальными параметрами газа на входе в ОУВТ являются параметры в выходном сечении сопла (скорость, температура, давление). При этом будем считать, что сопло имеет профиль Лавалья и работает в расчётном режиме.

Используемые в математической модели системы дифференциальных и интегральных уравнений обычно не имеют аналитического решения, поэтому они приводятся к дискретному виду и решаются на некоторой расчётной сетке. Решение задачи зависит от способа дискретизации уравнений и от полученных решений. Дискретизация происходит за счет разбиения расчётной области на ячейки прямоугольной формы. Определение значений переменных может происходить в центрах ячеек (при использовании *метода конечных объемов*) или в узлах ячеек при конечно-разностном методе расчета.

Если задача нестационарная и имеет нестационарное и непериодическое решение, то расчет обычно проводится до заданного момента физического времени задачи. Если, начиная с некоторого момента времени, решение нестационарной задачи устанавливается, т.е. становится стационарным или периодическим, и именно это решение интересует пользователя, то расчет проводится до достижения этого момента времени, точнее, до определения этого стационарного или периодического решения на основании выполнения некоторого критерия, что позволяет утверждать, что такое решение достигнуто. Поскольку задача решается численно, то осуществляется дискретизация решения задачи не только по пространству, но и по времени, т.е. задача решается сначала на некотором временном слое, затем выполняется очередной шаг по времени, который одинаков для всей расчетной области. Эти шаги называются итерациями.

Если задача стационарная, то она решается как нестационарная, но для ускорения установления решения шаги в физическом времени задачи осуществляются не с одинаковым для всей расчетной области шагом, а с локальным, т.е. разными для различных областей, шагами по времени, так что физическое время задачи в разных областях расчетной области после выполнения очередного шага по времени разное.

Окончание расчета может проводиться:

1. автоматически:

- по заданному значению невязки выбранного параметра
- по заданному конечному времени процесса

2. вручную пользователем:

- пользователь может сам визуализировать в окне постпроцессора интересующую его величину и следить за её изменением или настроить опцию автоматического сохранения значений исследуемой переменной.

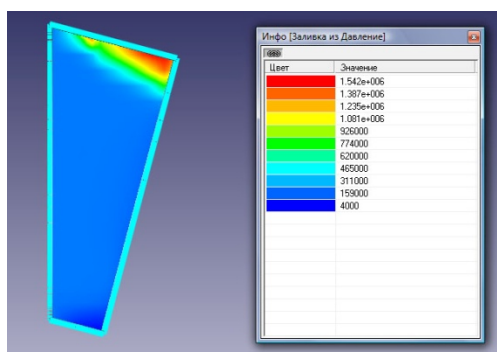


Рис. 2. Картина распределения давления в сечении дефлектора;  $V=2500$  м/с,  $\alpha=15$

Результатами расчётов являются: картина распределения давлений и скоростей потока, значения интегральной силы по поверхности ОУВТ и её проекции на оси связанной системы координат (СК), а также величина момента демпфирования газовой струи при различных углах отклонения ОУВТ и скоростях потока. Эти результаты входят в зависимости для определения координат центра давления. Они справедливы для неподвижной декартовой СК, связанной с ракетой относительно центра вращения. Для того чтобы перейти к подвижной СК органа управления, использовались зависимости для преобразования декартовых координат в полярные.

По результатам расчётов построены графики зависимости координат центра давления для дефлектора и разрезного сопла при различных скоростях потока и углах поворота, которые приведены на рисунках. Из них видно, что относительно СК органа управления центра давления перемещается в значительной степени по оси  $Y$ . Причём как видно из расчётов, большую зависимость координата имеет от изменения угла поворота, чем от изменения скорости потока. Для обоих органов управления в диапазоне исследованных скоростей и углов поворота координата  $x$  центра давления находится на  $1/2$  длины  $OY$ , а координата  $y$ :

- |                       |  |
|-----------------------|--|
| для дефлектора:       | при $\alpha=5^\circ$ находится на $1/8D$ ; |
|                       | при $\alpha=10^\circ$ — $1/7D$ ;           |
|                       | при $\alpha=15^\circ$ — $1/6D$ ;           |
| для разрезного сопла: | при $\alpha=5^\circ$ — $1/7D$ ;            |
|                       | при $\alpha=10^\circ$ — $1/5D$ ;           |
|                       | при $\alpha=15^\circ$ — $1/4D$ ,           |

где  $D$  — диаметр органа управления в плоскости, проходящей через точку с координатой  $x$ .

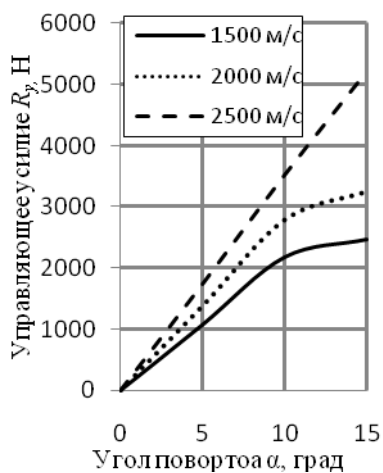


Рис. 3. Зависимость управляющего усилия  $R_y$  дефлектора от угла отклонения  $\alpha$

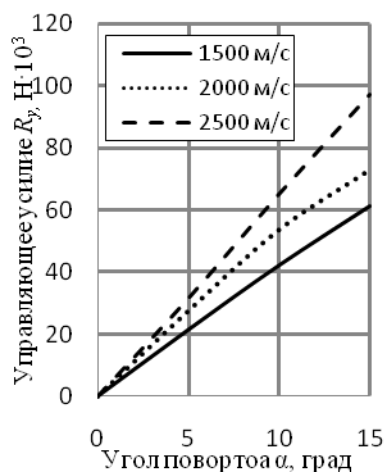


Рис. 4. Зависимость управляющего усилия  $R_y$  разрезного сопла от угла отклонения  $\alpha$

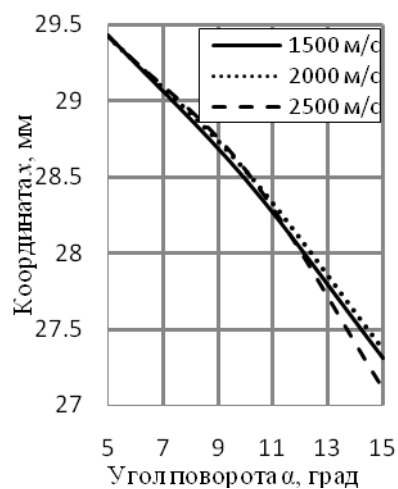


Рис. 5. Зависимость координаты  $x$  ЦД от угла поворота  $\alpha$  для дефлектора

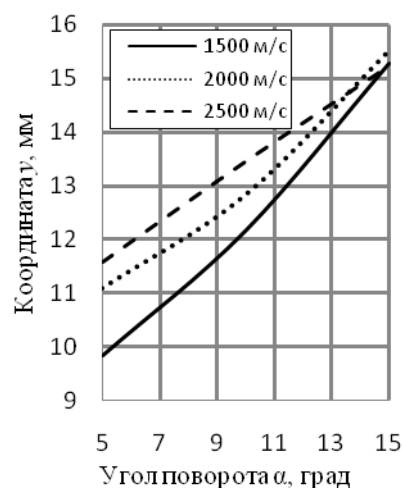


Рис. 6. Зависимость координаты  $y$  ЦД от угла поворота  $\alpha$  для дефлектора

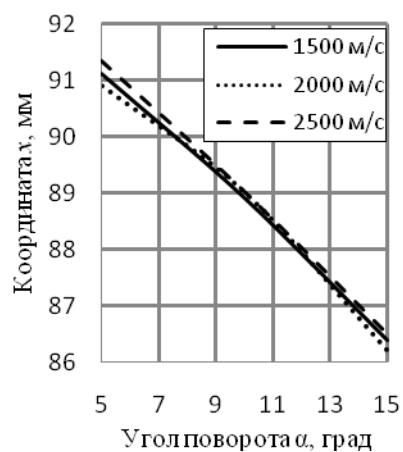


Рис. 7. Зависимость координаты  $x$  ЦД от угла поворота  $\alpha$  для разрезного сопла

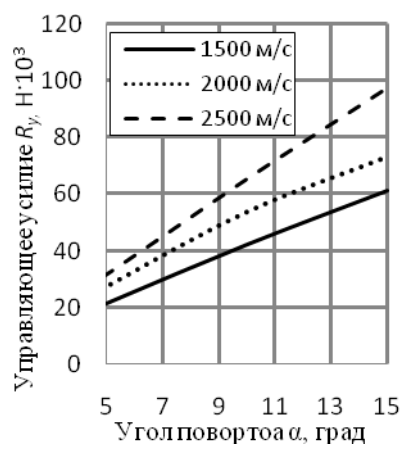


Рис. 8. Зависимость координаты  $y$  ЦД от угла поворота  $\alpha$  для разрезного сопла

Т.к. управляющее усилие для дефлектора имеет нелинейный характер изменения при углах 10-15°, то можно сделать вывод о том, что такой орган управления работает с понижающейся эффективностью. В свою очередь, очевидно, что для разрезного сопла управляющее усилие меняется линейно на всем диапазоне изменения углов отклонения. Орган работает с постоянной эффективностью.