**УДК 533.697**

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ РАБОТУ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕКТОРОМ ТЯГИ**

**Ю.В.Каун**

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова*

*Россия, Санкт-Петербург, 190005,ул. 1-я Красноармейская, д. 1*

*E-mail:* [*y.kaun13@mail.ru*](mailto:y.kaun13@mail.ru)

Одной из основных характеристик ракетных двигателей является возможность управления вектором тяги как по величине, так и по направлению. Для этого применяют различные органы управления, конструктивные схемы и технические решения, которые для ракетных двигателей различного назначения могут принципиально различаться друг от друга. Органы управления – это агрегаты и устройства, создающие управляющие усилия, которые действуют на ЛА и обеспечивают движение по заданной траектории, а также парирование возмущающих сил и моментов, возникающих во время этого движения. Они действуют в соответствии с сигналами, вырабатываемыми системой управления. В большинстве случаев изменение нормальной управляющей силы требует поворота корпуса ЛА относительно его вектора скорости на некоторый угол.

Применение тех или иных органов управления вектором тяги определяется как особенностями ракетных комплексов различных классов, так и спецификой требований, предъявляемых к двигателям различных ступеней ракеты. Регулирование вектора тяги как по величине, таки по направлению позволяет создавать для управления полетом ракеты управляющие моменты относительно её центра масс в трех плоскостях: тангажа, рыскания и крена.

Примером, получившим в ракетных двигателях на твердом топливе наибольшее распространение, является выдвижной управляющий щиток, который представляет собой механический орган управления, имеющий вводимые в поток плоскости в качестве элемента управления. Помещаемые на срезе сопла отражатели-щитки механически воздействуя на поток дают возможность получения боковой тяги.

Существуют различные конфигурации управляющих щитков. Устройства в форме пластинок, которые устанавливают перпендикулярно потоку, называют интерцепторами или триммерами. Принято выделять внешние интерцепторы, которые находятся на срезе сопла, и внутренние интерцепторы, которые расположены в одном из сечений сверхзвуковой части сопла.

Вычисление силовых характеристик выдвижных щитков базируется на расчете параметров возмущенного течения в области действия самого щитка. Боковую тягу можно образовать посредством механического воздействия на поток отражателями-щитками, помещаемыми в потоке на срезе сопла. При введении щитка поперек потока возникает λ – образный отошедший скачок уплотнения большой мощности, создающий зону повышенного давления на части раструба перед щитком.

В данной работе средствами современных CAE-систем моделируется процесс взаимодействия сверхзвукового потока с одним из органов управления вектором тяги. Выдвижной щиток со сферическими затупленными боковыми кромками, располагаемый в кормовой части корпуса, обтекается потоком с числом Маха больше критического под разными углами атаки. Геометрия самого щитка была взята наиболее упрощенная, для простоты расчета..

Для отклонения щитков при больших скоростных напорах воздуха, обтекающего летательный аппарат, необходимо преодолевать большие аэродинамические нагрузки. Для решения задач газовой динамики традиционно используются уравнения Навье – Стокса, осредненные по Рейнольдсу, для сжимаемого совершенного газа (знаки осреднения опущены), которые включают в себя уравнения сохранения массы, импульса и энергии. Данная система должна быть дополнена уравнением состояния среды:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

Для замыкания системы уравнений (1) необходимо определить шесть различных компонент симметричного тензора турбулентных напряжений. Однако определение этого тензора становится моделированием турбулентности только в том случае, когда этот тензор выражается через параметры осредненного течения.

Для решения данной задачи была подключена модель турбулентности Модель турбулентности является двухпараметрической и предполагает решение уравнений для энергии турбулентности k и удельной скорости диссипации ω.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |
|  | (4) |

Модели с двумя уравнениями являются единственными реальными конкурентами одноуравнительных моделей при расчете турбулентных течений. Их использование приводит к несколько большим затратам времени счета, однако наличие двух независимых переменных позволяет выбрать в качестве линейного масштаба не только расстояние до стенки.

Для решения динамической задачи отклонения щитка используется метод перекрывающихся сеток (Overset Mesh). Ниже на рисунке представлен пример расчетной сетки ( рис. 1).

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 1 − Компоненты расчетной сетки |

Особенности данного метода заключаются в том, что перемещающиеся сеточные зоны объединяются при помощи перекрывающего интерфейса. Части расчетной сетки по отдельности разбиваются сеткой, которая накладывается на фоновую сеточную модель. Соединение осуществляется за счет интерполяции данных в перекрывающихся областях. Зоны ячеек должны полностью перекрываться. Использование перекрывающихся сеток имеет ряд преимуществ: возможность организовать движение сетки с малыми зазорами, для сложных геометрических моделей процедура построения сетки значительно упрощается, изменение конфигурации и расположения частей осуществляется проще. Определяющим достоинством перед динамическими сетками является отсутствие ошибок при перестроении сетки и настройки задачи. При использовании перекрывающегося интерфейса качество сеточной модели сохраняется на протяжении всего расчета. Кроме того, к достоинствам следует отнести наличие полностью структурированной сетки в отдельных зонах расчетной области при использовании неструктурированной сетки в основной части, что реализовать в динамических сетках было бы невозможно.

Не смотря на все сильные стороны метода перекрывающихся сеток, в нем также существуют некоторые особенности, которые достаточно сложны в реализации. Метод перекрывающихся сеток не является консервативным. При интерполяции будет теряться точность при передаче значений переменных. Кроме того трудности возникают при появлении изолированных ячеек.

Рассматриваемая задача решается в двумерной нестационарной постановке. Параметры потока: число Маха *М*=2, давление *p*=2 атм, температура *T*=2000 К. Варьируемой величиной был угол, на который выдвигается щиток при его активации.

На рисунке 2 и 3 представлены картины течения в виде градиента давления и скорости при натекании сверхзвукового потока на выдвижной щиток. При увеличении угла отклонения щитка поперек потока возникает λ – образный отошедший скачок уплотнения большой мощности, создающий зону повышенного давления в части расчетной области перед щитком.

|  |  |
| --- | --- |
| imgonline-com-ua-Sharpen-p6r8CIm8wTT.png  imgonline-com-ua-Sharpen-p6r8CIm8wTT.png |  |
| imgonline-com-ua-Sharpen-p6r8CIm8wTT.pngimgonline-com-ua-Sharpen-p6r8CIm8wTT.png |  |
| Рисунок 2 − Распределение давления на выдвижном щитке в диапазоне углов () | |

|  |  |
| --- | --- |
| imgonline-com-ua-Sharpen-6Tczeo1Bor8R5.png  imgonline-com-ua-Sharpen-6Tczeo1Bor8R5.png |  |
| imgonline-com-ua-Sharpen-6Tczeo1Bor8R5.png  imgonline-com-ua-Sharpen-6Tczeo1Bor8R5.png |  |
| Рисунок 3 − Распределение скорости на выдвижном щитке в диапазоне углов () | |

На стенке сопла перед щитком при постепенном увеличении угла до возникает отрыв пограничного слоя, распространяющийся вверх по потоку. Отрыв имеет форму “жидкого” клина. Давление в этой зоне больше, чем давление в невозмущенном потоке. Именно это перераспределение давления внутри сопла и вызывает появление боковой управляющей силы.

Изменяя угол выдвижения отражательного щитка, можно наблюдать, что возникающий при его работе так называемый “жидкий” клин, имеющий вихреобразную структуру, может быть характеризован углом косого скачка уплотнения, возникающего в точке отрыва пограничного слоя. В зависимости от изменения угла, на который отклоняется выдвижной щиток, меняется подъемная сила и сила лобового сопротивления. Характер изменений данных усилий представлены на рисунках 4 и 5.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 4 – Зависимость силы лобового сопротивления от угла отклонения выдвижного щитка |
|  |
| Рисунок 5 – Зависимость подъемной силы от угла отклонения выдвижного щитка |

При увеличении утечки газа через зазор между срезом сопла и щитком уменьшаются размер отрывной зоны, образующейся на стенках сопла при повороте щитка, и поперечная сила, а перепад давления увеличивается. Длина отрывной зоны зависит от угла установки щитка к потоку и относительной величины заглубления щитка.

Таким образом, при размещение щитка в полости сопла при его обтекании возникают зоны повышенного давления, что приводит к появлению дополнительных сил, учет которых необходим для определения характеристик данного органа управления. Использование выдвижного щитка целесообразно при малых углах отклонения вектора тяги. Общим недостатком всех устройств, создающих усилие механическим воздействием на поток, являются высокие требования к материалам, из которых изготавливаются сами отклоняющиеся элементы.