

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ,
СОПРОВОЖДАЮЩИХ РАБОТУ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ВЕКТОРОМ ТЯГИ****Ю. В. Каун***Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова*

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, так и по направлению позволяет создавать для управления полетом ракеты управляющие моменты относительно ее центра масс в трех плоскостях: тангажа, рыскания и крена.

Примером, получившим в ракетных двигателях на твердом топливе наибольшее распространение, является выдвигной 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 устанавливаются 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 выдвигных 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 поток 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 САЕ-систем моделируется процесс взаимодействия сверхзвукового потока с одним из органов управления вектором тяги. Выдвигной 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:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0; \\ \frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau_m + \tau_t); \\ \frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} H) = \nabla \cdot [\vec{u} \cdot (\tau_m + \tau_t) + (\vec{q}_m + \vec{q}_t)]; \\ \rho = \frac{pm}{RT} \end{array} \right. \quad (1)$$

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 $k - \omega$ SST. Модель турбулентности SST является двухпараметрической и предполагает решение уравнений для энергии турбулентности k и удельной скорости диссипации ω .

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \nabla \cdot ((\mu + \sigma_k \mu_T) \nabla k) + P_k - \rho \beta^* \omega k; \quad (3)$$

$$\rho \frac{D\omega}{Dt} = \nabla \cdot ((\mu + \sigma_\omega \mu_T) \nabla \omega) + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \rho \beta \omega^2. \quad (4)$$

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).

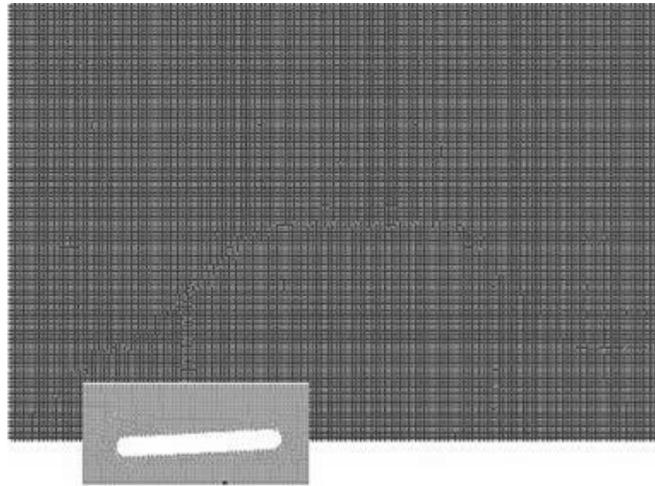


Рис. 1. Компоненты расчетной сетки

Особенности данного метода заключаются в том, что перемещающиеся сеточные зоны объединяются при помощи перекрывающегося 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 кон-

фигурации 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 $M=2$, давление $p=2$ атм, температура $T=2000$ К. Варьируемой величиной был угол, на который выдвигается щиток при его активации.

На рис. 2 и рис. 3 представлены картины течения в виде градиента давления и скорости при натекании сверхзвукового потока на выдвинутой 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.

На стенке сопла перед щитком при постепенном увеличении угла до 30° 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 characterized углом косога скачка уплотнения, возникающего в точке отрыва пограничного слоя. В зависимости от изменения угла, на который отклоняется выдвинутой щиток, меняется подъемная сила и сила лобового сопротивления. Характер изменений данных усилий представлены на рис. 4 и 5.

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 размещении 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 выдвинутого 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.

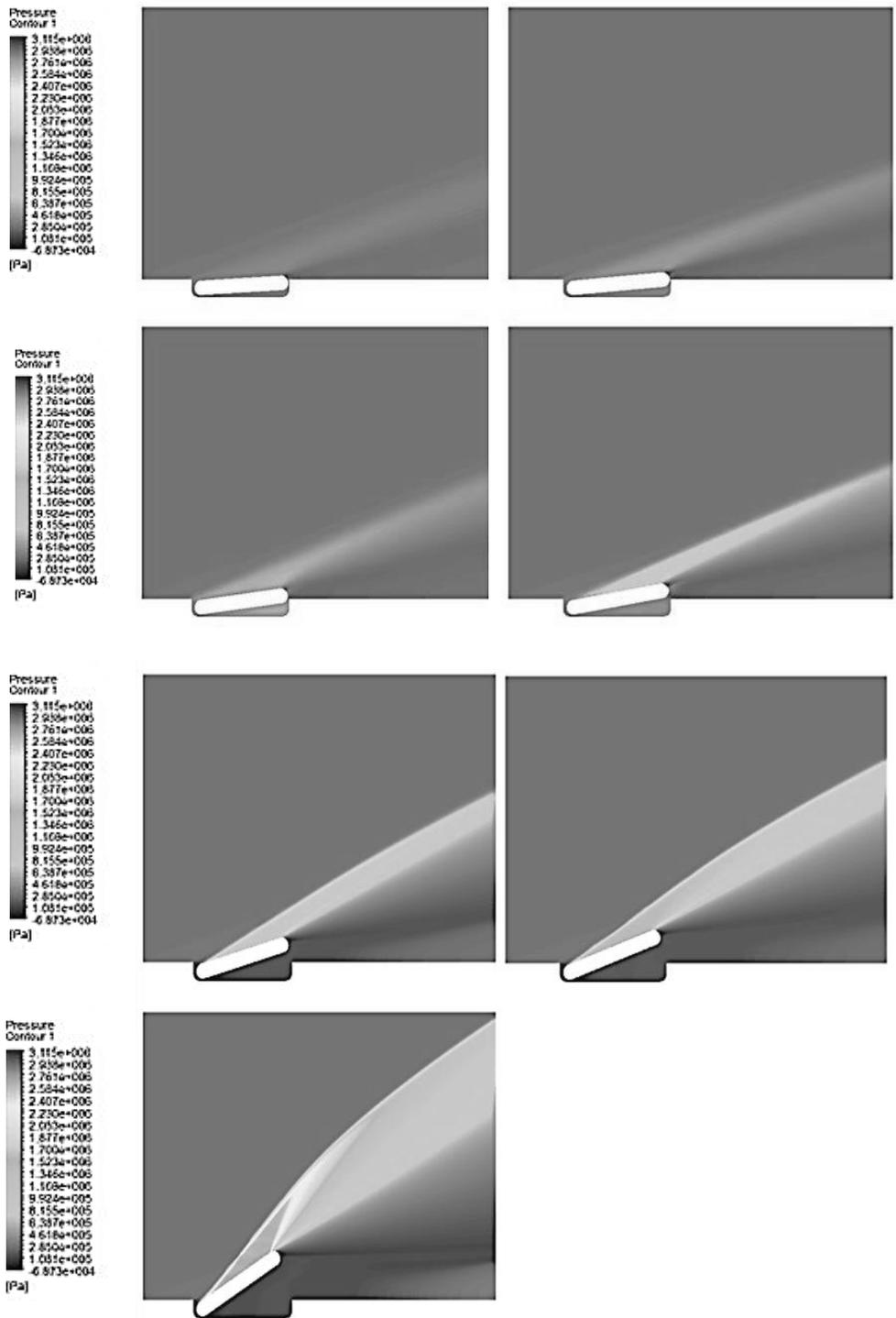


Рис. 2. Распределение давления на выдвжном щитке в диапазоне углов ($3^\circ - 30^\circ$)

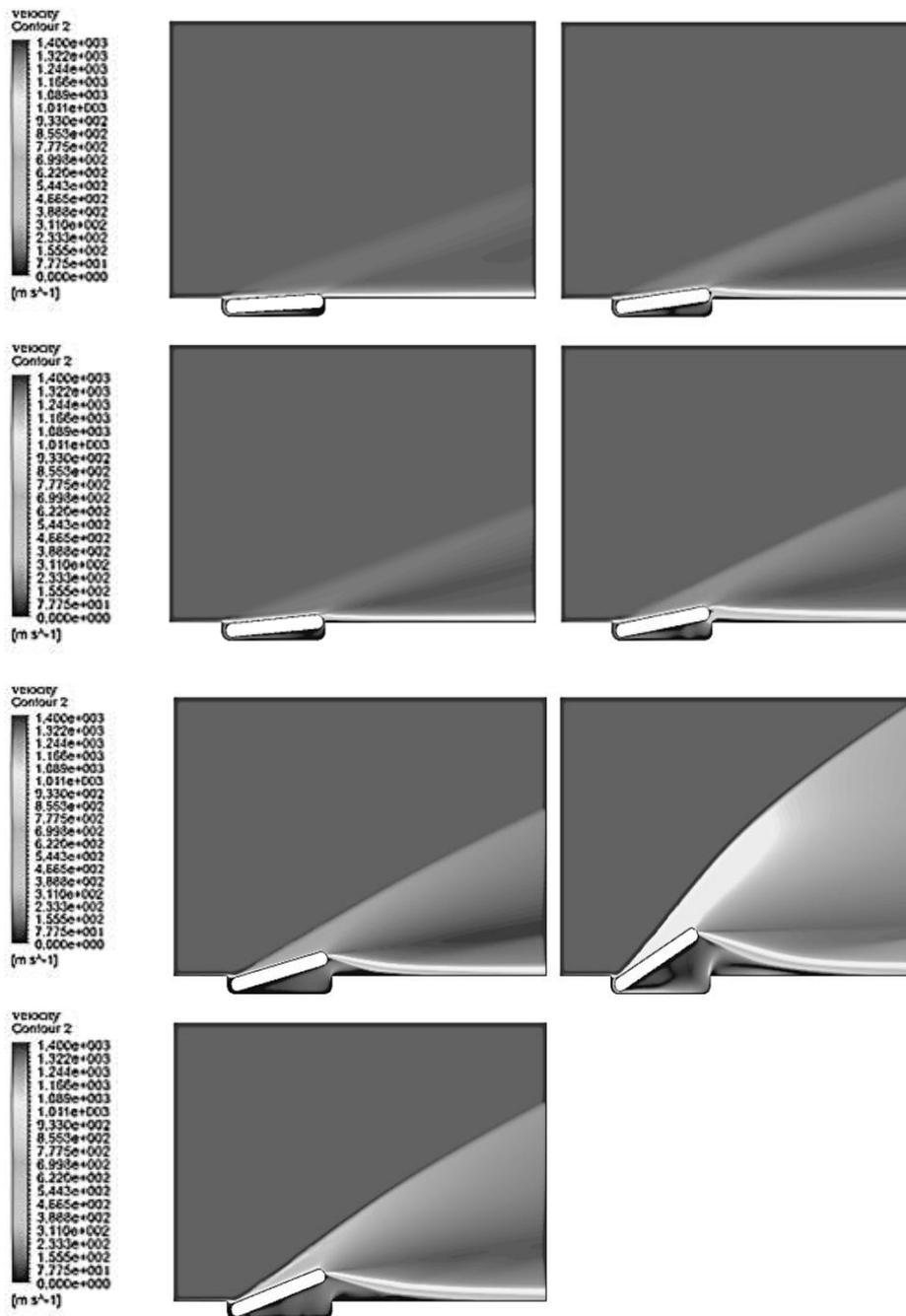


Рис. 3. Распределение скорости на выдвижном щитке в диапазоне углов ($3^\circ - 30^\circ$)

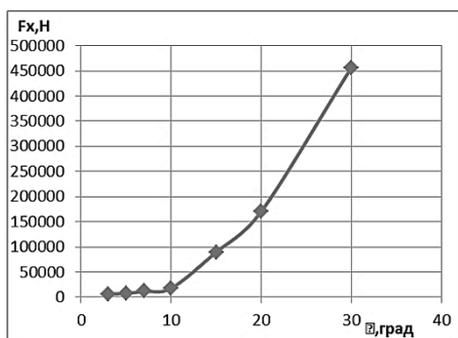


Рис. 4. Зависимость силы лобового сопротивления от угла отклонения выдвигного щитка

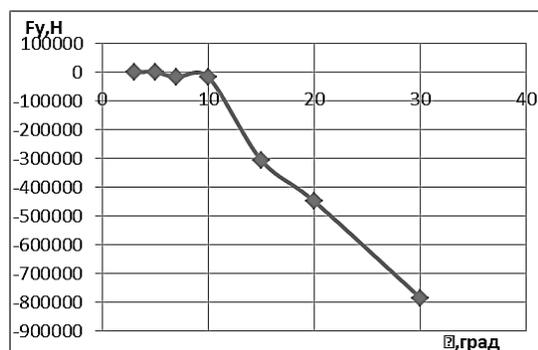


Рис. 5. Зависимость подъемной силы от угла отклонения выдвигного щитка

УДК 381.1

ГЕНЕРАТОР СИГНАЛОВ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ

С. И. Исляев, С. И. Кайгородова, А. А. Козлов, А. Г. Отцовский

ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»

Рассмотрены возможности практической реализации устройства – генератора сигналов специальной формы в учебном процессе и лабораторных исследованиях. Решение практической задачи состоит в том, что данное устройство может быть использовано в радиотехнических тренажерах при проведении лабораторных работ в качестве источника сигналов специальной формы.

В современных условиях санкционной политики некоторых государств, задачи экономии материально – технических ресурсов и опоры на собственные разработки являются приоритетными и достаточно актуальными. В этом аспекте достаточно привлекательным очевидно является рассмотрение использования в учебном процессе уже имеющихся изобретений, в частности – генератора сигналов специальной формы [1].

Данное устройство относится к генераторам сигналов специальной формы и может быть использовано в радиотехнических тренажерах, в частности как учебный прибор при проведении лабораторных работ с обучаемыми по курсам «Импульсная техника», «Распространение сигналов сложной формы в среде» и т. д.

Известны генераторы сигналов специальной формы с использованием как аналоговых, так и цифровых сигналов. Использование аналоговых сигналов в устройствах приводит к сложным техническим решениям со значительным увеличением габаритов, что затрудняет их применение в учебном процессе. Они имеют сложные, громоздкие функциональные узлы, например фазовращатели, блоки задания временных диаграмм, а электромеханические коммутирующие устройства не позволяют имитировать изменение сигналов во времени при распространении в среде. Кроме того в известных устройствах отсутствует возможность имитации одиночных видео и радиоимпульсов сложной формы одновременно, что снижает наглядность демонстрации импульсов данного типа для слушателей, а также отсутствует возможность наглядно продемонстрировать слушателям деформацию формы импульсов при распространении в среде. Поэтому наиболее близким техническим решением является генератор сигналов специальной формы, содержащий задающий генератор, соединенный с формирователем временных диаграмм и генератором несущей частоты, подключенным через преобразо-