

На рис. 1 представлена расчетная область. Постановка граничных условий представлена в табл. 1. Стоит заметить, что для моделирования осесимметричной геометрии в пакете OpenFoam используется специальное условие «wedge» (передняя «front» и задняя «back» границы). Для оси «axis» в пакете OpenFoam также вводится специальное граничное условие «empty». Это условие задается в случаях, когда вычисления в заданном направлении не проводятся. Скорость звука 347,25 м/с.

На рис. 2 представлено поле установившегося течения для давления при использовании солвера rhoCentralFoam.

В таблицах 2 и 3 приведены результаты расчетов в форме аналога нормы L2 для давления:

$$\frac{\sqrt{\sum_m |y_m - y_m^{exact}|^2 V_m}}{\sqrt{\sum_m |y_m^{exact}|^2 V_m}},$$

где y_m — давление в ячейке, полученное численным моделированием, y_m^{exact} — давление, полученное интерполированием табличных значений из [1] на ячейки сетки, V_m — объем ячейки для угла полураствора $\beta = 10-35^\circ$ с шагом 5 и чисел Маха $M = 2, 3$.

Представленные в таблицах 2 и 3 результаты показывают, что солвер rhoCentralFoam обладает наименьшей погрешностью в задаче сверхзвукового обтекания конуса. Проведенное сравнение полезно при выборе солвера для моделирования задач обтекания удлиненных тел вращения.

1. Пространственное обтекание гладких тел идеальным газом / К.П. Бабенко, Г.П. Воскресенский, А.Н. Любимов, В.В. Русанов. — М.: Наука, 1964. — 505 с.
2. Kurganov A., Tadmor E. New high-resolution central schemes for nonlinear conservation laws and convection-diffusion equations // J. Comput. Phys. — 2000. — V. 160. — P. 241–282.
3. Issa R. Solution of the implicit discretized fluid flow equations by operator splitting. // J. Comput. Phys. — 1986. — V. 62, Issue 1. — P. 40–65.
4. Patankar S. V., Spalding D. B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 1972. — V. 15, Issue 10. — P. 1787–1806.
5. Kraposhin M., Boutrikova A., Strijhak S. Adaptation of Kurganov–Tadmor numerical scheme for applying in combination with the PISO method in numerical simulation of flows in a wide range of Mach numbers // Procedia Computer Science. — 2015. — V. 66. — P. 43–52.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА НА ПРИМЕРЕ СОЛВЕРА RHOCENTRALFOAM ПАКЕТА OPENFOAM*

Е. Д. Бирюков, М. С. Копылов, А. Е. Кувшинников

ИПМ им. М. В. Келдыша, Москва, Россия

В настоящее время существует потребность в построении вычислительной технологии, которая была бы своего рода эталоном для решения задач обтекания удлиненных тел вращения (УТВ) и помогала настраивать параметры как численных

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-31-00320-мол_а).

методов, так и моделей турбулентности при использовании различных программных пакетов. В этом качестве ведется работа по воссозданию на уровне современных высокопроизводительных вычислительных средств вычислительной технологии, разработанной ранее в ИПМ им. М.В. Келдыша. Данная технология позволяла проводить массовые промышленные расчеты УТВ практического назначения. Суть данной технологии заключалась в том, что коэффициент аэродинамического сопротивления УТВ C_x , необходимый для расчетов баллистики исследуемого объекта, рассматривался как сумма трех составляющих: C_p — сопротивления УТВ при невязком обтекании, C_f — коэффициента сопротивления трения и C_d — донного сопротивления. Подобный подход был широко распространен в задачах массового промышленного анализа аэродинамических свойств УТВ и показывал себя весьма эффективным [1].

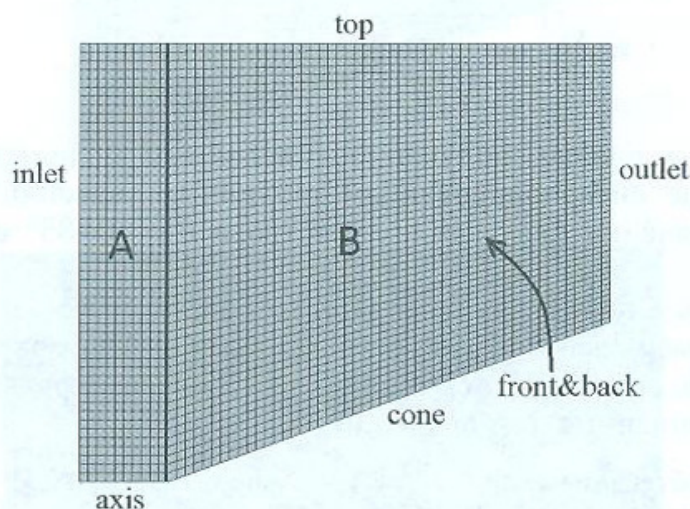


Рис. 1. Расчетная область



Рис. 2. Поле давления

Часть этой вычислительной технологии уже реализована. Так, например, для определения коэффициента трения реализована вычислительная методика [2], основанная на приближенной полуэмпирической модели, объединяющей результаты экспериментальных исследований Л. В. Козлова [3] и метод эффективной длины, предложенный В. С. Авдеевским [4].

Для расчета аэродинамических характеристик УТВ при невязком обтекании было предложено использовать программный пакет OpenFOAM (Open Source Field

Operation And Manipulation CFD Toolbox) [OpenFOAM], который содержит в себе ряд солверов, обладающих различными вычислительными свойствами.

Для примера возьмем солвер rhoCentralFoam. Данный солвер использует центрально-противопотоковой схеме, которая является комбинацией центрально-разностной и противопотоковой схем [5]. Преимущество указанных схем состоит в том, что, применяя соответствующую технику уменьшения численной вязкости, можно добиться хорошей разрешимости и для разрывных решений — ударных волн в газовой динамике — и для решений, где основную роль играют вязкие явления. Для проведения сравнительного анализа использовалась задача сверхзвукового невязкого обтекания конуса при вариациях угла полураствора конуса и числа Маха набегающего потока. В качестве точного решения использовались таблицы [6].

Расчеты проводились с помощью программного пакета OpenFOAM версии 2.3.0.

На рис. 1 представлена расчетная область. На верхней границе, задается условие нулевого градиента для газодинамических функций. Такие же условия задаются на правой границе. На левой границе заданы параметры набегающего потока: давление $p = 101325$ Па, температура $T = 300$ К, скорость U варьируется от 2 до 5 Маха (скорость звука 347,25 м/с). На границе конуса для давления и температуры задается условие нулевого градиента, для скорости задается условие непротекания для уравнений Эйлера. Для моделирования осесимметричной геометрии в пакете OpenFoam для передней и задней границ используется специальное условие «wedge». Для оси «axis» в пакете OpenFoam также вводится специальное граничное условие «empty». Это условие задается в случаях, когда вычисления в заданном направлении не проводятся.

На рис. 2 представлено поле установившегося течения для давления при использовании солвера rhoCentralFoam.

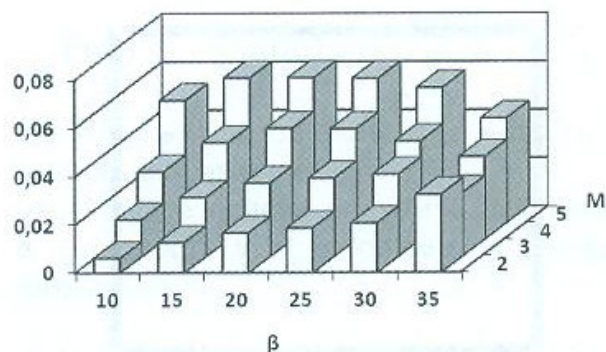


Рис. 3. Отклонение от точного решения для давления в зависимости от угла полураствора конуса и скорости для солвера rhoCentralFoam

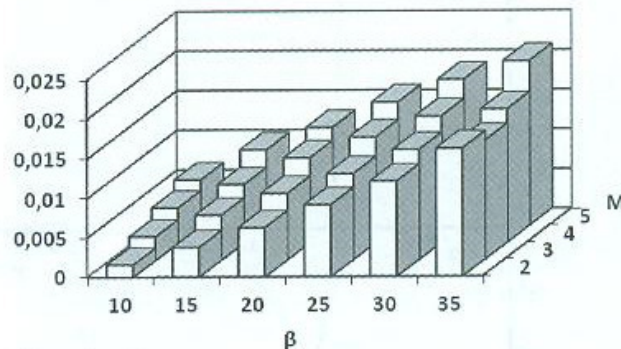


Рис. 4. Отклонение от точного решения для U_x в зависимости от угла полураствора конуса и скорости для солвера rhoCentralFoam

На рисунках 3 и 4 представлена зависимость отклонения от точного решения в аналоге нормы L2 для давления p и скорости U_x для солвера rhoCentralFoam при вариации угла полураствора и начальной скорости. Рисунки показывают, что для давления p наибольшее влияние на увеличение отклонения численного результата от точного решения оказывает увеличение числа Маха набегающего потока. Аналогично в случае скорости наибольшее влияние на увеличение погрешности оказывает увеличение угла атаки.

2. Андреев С. В., Бондарев А. Е., Михайлова Т. Н., Нестеренко Е. А., Рыжова И. Г. Приближенный подход к оценке сопротивления трения на телах вращения в вязком потоке // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. — 2014. — №102. — 12 с.
3. Козлов Л. В. Экспериментальное исследование поверхностного трения на плоской пластине в сверхзвуковом потоке при наличии теплообмена // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. — 1963. — №2. — С. 11–20.
4. Авдучевский В. С. и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетной технике / Под ред. проф. В. К. Кошкина. — М.: Оборонгиз, 1960. — 390 с.
5. Kurganov A., Tadmor E. New high-resolution central schemes for nonlinear conservation laws and convection-diffusion equations // J. Comput. Phys. — 2000. — V. 160. — P. 241–282.
6. Пространственное обтекание гладких тел идеальным газом / К. П. Бабенко, Г. П. Воскресенский, А. Н. Любимов, В. В. Русанов. — М.: Наука, 1964. — 505 с.

РАЗРАБОТКА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В ГРУППЕ БПЛА НА БАЗЕ МЕТОДА МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Д. С. Бондаренко, З. Е. Потапова

МАИ, Москва, Россия

В работе приводятся результаты компьютерного моделирования движения групп беспилотных летательных аппаратов. Моделируется система самоуправления БПЛА, основанная на применении правил взаимодействия метода молекулярной динамики. Продемонстрировано решение проблем безопасности, исключены столкновения дронов между собой и с преградами.

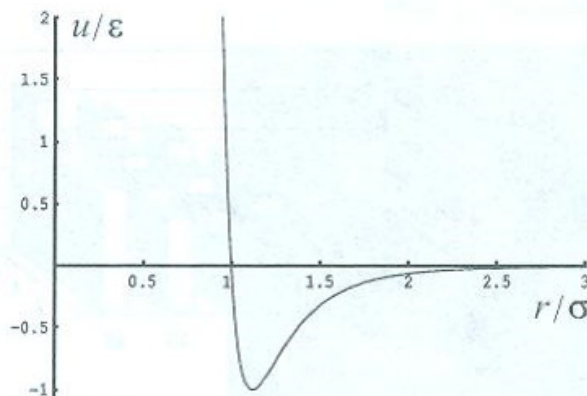


Рис. 1. Потенциал Леонард-Джонса. Здесь r приведено в единицах σ , а $u(r)$ в ϵ

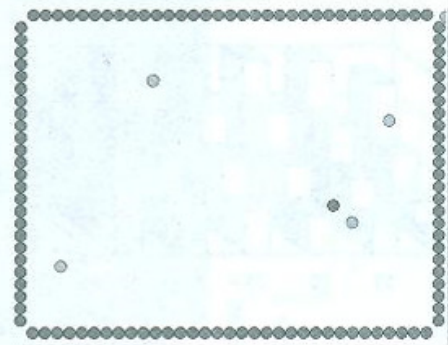


Рис. 2. Модель дрона-охотника

За основу построения алгоритма управлением движением БПЛА в пространстве был взят метод молекулярной динамики [1]. Каждый БПЛА представляется макромолекулой с заданной массой, на которую действует сила, рассчитываемая по формуле потенциала Леннарда-Джонса:

$$u(r) = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right],$$

где $u(r)$ — энергия взаимодействия двух частиц, $r = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$ — расстояние между частицами i и j , σ — расстояние до границы, где начинается отталкивание, ϵ — параметр усиления. Слагаемое $(\sigma/r)^{12}$ описывает отталкивание молекул, а $(\sigma/r)^6$ — притяжение. График этого потенциала показан на рис. 1.