

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИПЕРЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА

А.Л. Железнякова¹, С.Т. Суржиков²

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

²Институт проблем механики Российской академии наук, Москва

Аннотация

Проведено исследование процесса обтекания кругового цилиндра сверхзвуковым потоком газа в 3-х мерной постановке. Целью работы является изучение методами вычислительной аэродинамики особенностей структуры поля течения около кругового цилиндра и в следе за обтекаемым телом, а так же поведение его местных аэродинамических и тепловых характеристик. Приведены результаты численных исследований обтекания кругового цилиндра во всей области течения от головной ударной волны до дальнего следа.

NUMERICAL SIMULATION OF HYPERSONIC FLOW AROUND CYLINDER.

Three-dimensional and two-dimensional numerical simulation data on hypersonic flow around cylinder are presented. Gasdynamic structure of flow field obtained by two different Navier–Stokes codes are presented and analyzed. The calculations were performed from the bow shock wave up to far wake. Distributions of pressure and convective heat fluxes cross surface are presented and compared at Mach number 10.

1. ВВЕДЕНИЕ

Производительность современных компьютеров и развитие вычислительных методов решения задач аэрофизики позволяет моделировать поле течения, теплофизические и радиационные процессы во всей возмущенной области вокруг летательных аппаратов, входящих в плотные слои атмосферы: от фронта головной ударной волны до дальнего следа. К наиболее актуальным проблемам компьютерной аэротермодинамики можно отнести тестирование разрабатываемых расчетно-теоретических моделей и программных кодов.

Численные расчеты, результаты которых приведены в данной работе, проводились в рамках научной программы по исследованию аэротермодинамики гиперзвуковых летательных аппаратов.

Исследование проводилось с использованием двух компьютерных кодов: программного комплекса FLUENT 6.1 и программного кода NERAT (Non-Equilibrium Radiation and Aero Thermodynamics), разработанного в ИПМех РАН [1]. Обтекание кругового цилиндра при разных скоростях подробно исследовано и в других работах, следовательно, данная постановка задач является удобной для проведения тестирования различных кодов, имеющая также и практическое применение.

2. ПОСТАНОВКА И МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

2.1. Расчетная схема и постановка задачи

Для численного моделирования процесса обтекания кругового цилиндра использовалась расчетная схема, показанная на рис. 1.

Прямоугольная расчетная область включает в себя поле течения в невозмущенном потоке, за фронтом ударной волны и в следе за обтекаемым телом.

В расчетной области располагается круговой цилиндр, диаметром $D_0 = 2$ см. Ось цилиндра параллельна оси z и лежит в центральной плоскости симметрии расчетной области.

Расчет динамики вязкого теплопроводного газа проводится в трехмерной постановке с использованием

уравнений Навье – Стокса, уравнения неразрывности и уравнения сохранения энергии. Исходная система уравнений формулируется в следующем виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{V}) = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \vec{V}) = & -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}\mu (\operatorname{div} \vec{V}) \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right], \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \vec{V}) = & -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}\mu (\operatorname{div} \vec{V}) \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right], \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho w \vec{V}) = & -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[2\mu \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3}\mu (\operatorname{div} \vec{V}) \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right], \quad (4) \end{aligned}$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \vec{V} \operatorname{grad} T = \frac{\partial p}{\partial t} + \vec{V} \operatorname{grad} p + \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + Q_V. \quad (5)$$

Система уравнений (1)–(5) решается совместно с уравнением состояния идеального совершенного газа.

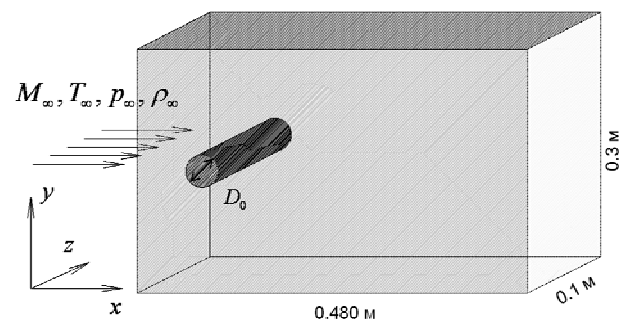


Рис. 1. Схема задачи обтекания кругового цилиндра гиперзвуковым потоком воздуха

2.2. Граничные условия и физическая модель

Граничные условия задают невозмущенный набегающий поток. На входе в расчетную область задаются скорость $u_\infty = 3000$ м/с, что соответствует числу Маха $M_\infty = 10$, температура $T_\infty = 227$ К, давление $p_\infty = 0.120 \times 10^4$ Н/м² и плотность $\rho_\infty = 0.184 \times 10^{-1}$ кг/м³.

В качестве исследуемого газа выбран воздух, который предполагается вязким и теплопроводным. Газ считается совершенным с показателем адиабаты $\gamma = 1.4$.

Стационарное решение задачи ищется с использованием метода установления.

3. РАСЧЕТНЫЕ СЕТКИ

Для расчета с помощью программного кода FLUENT 6.1 в трехмерной расчетной области была построена сетка, включающая около 488329 гексагональных элементов. Сетка имеет сгущение вблизи поверхности цилиндра и в области следа за ним (рис. 2). Линии сетки вблизи цилиндра повторяют контуры обтекаемого тела (рис. 3).

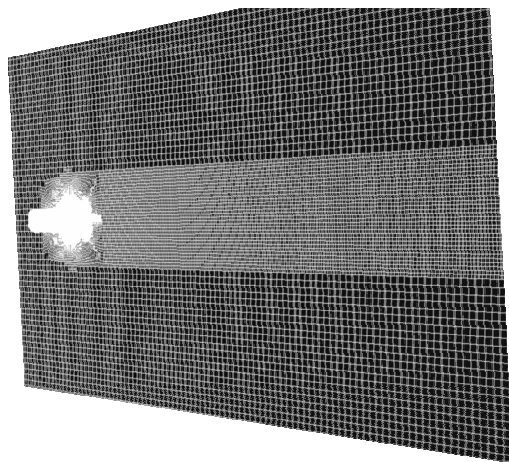


Рис. 2. Расчетная сетка во всей области (FLUENT 6.1)

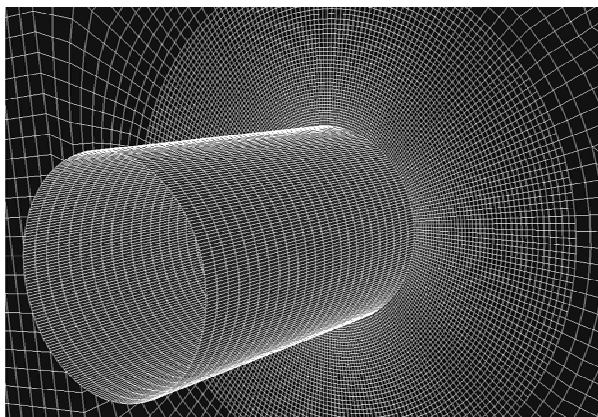


Рис. 3. Расчетная сетка вблизи цилиндра (FLUENT 6.1)

На рис. 4 показана сетка, применявшаяся для расчетов с использованием программного кода NERAT. Из рисунка хорошо видна степень сгущения узлов сетки вблизи обтекаемой поверхности.

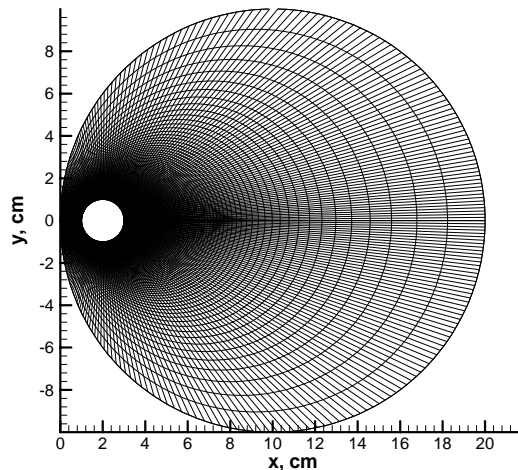


Рис. 4. Расчетная сетка во всей области (NERAT)

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ ГИПЕРЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА

На рис. 5–14 представлены результаты численного моделирования обтекания цилиндра гиперзвуковым потоком при $M_\infty = 10$, с использованием программного комплекса FLUENT6.1 и программного кода NERAT.

Сравнение результатов расчета особенностей структуры поля температур и поля скоростей (рис. 5–12) около кругового цилиндра и в следе за обтекаемым телом позволяет легко идентифицировать основные элементы течения вблизи цилиндра и в следе за ним.

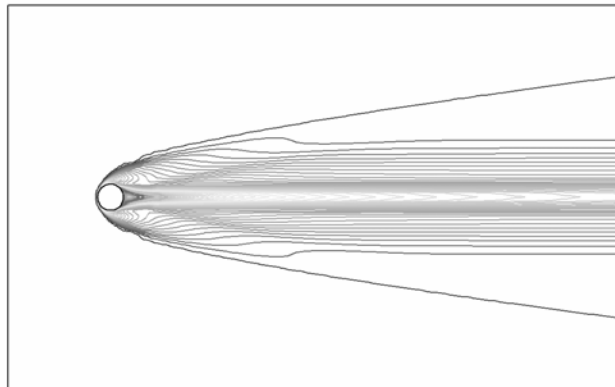


Рис. 5. Изолинии поля скоростей при $M_\infty = 10$ во всей расчетной области. Центральное осевое сечение (FLUENT6.1)

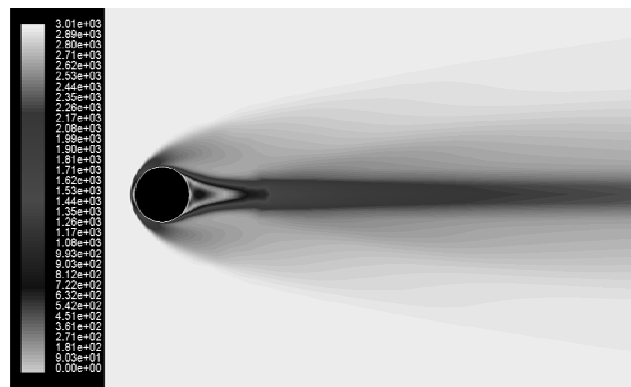


Рис. 6. Распределение скорости при $M_\infty = 10$ во всей расчетной области. Центральное осевое сечение (FLUENT6.1)

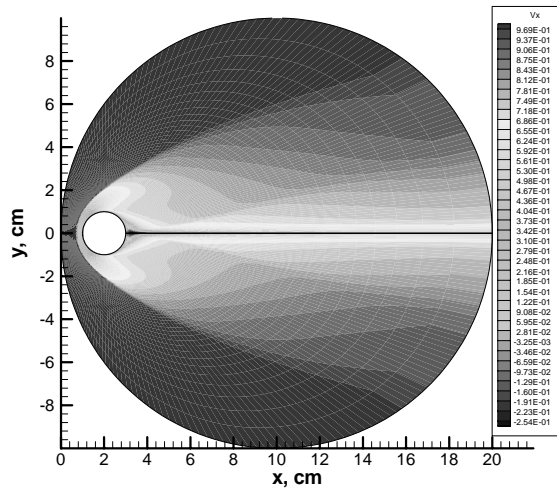


Рис. 7. Распределение скорости при $M_\infty = 10$ во всей расчетной области (NERAT)

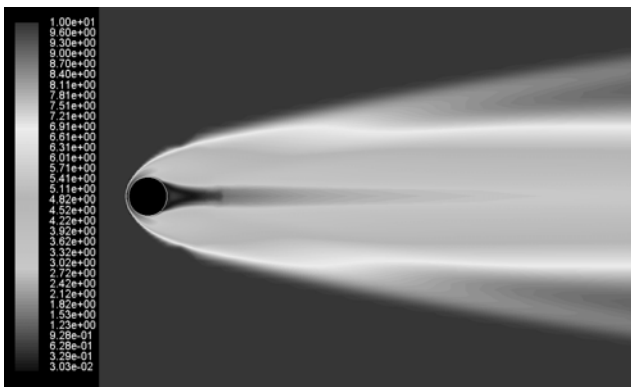


Рис. 8. Распределение числа Маха в расчетной области при $M_\infty = 10$. Центральное осевое сечение (FLUENT6.1)

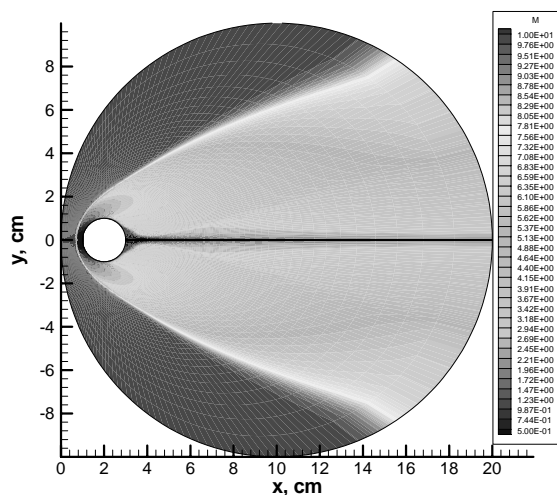


Рис. 9. Распределение числа Маха при $M_\infty = 10$ во всей расчетной области (NERAT)

Поведение местных тепловых характеристик обтекаемого тела (распределение температуры и плотности теплового потока вдоль цилиндрической поверхности от передней критической точки до задней), полученных с использованием рассматриваемых методов, показано на рис. 13 и 14.

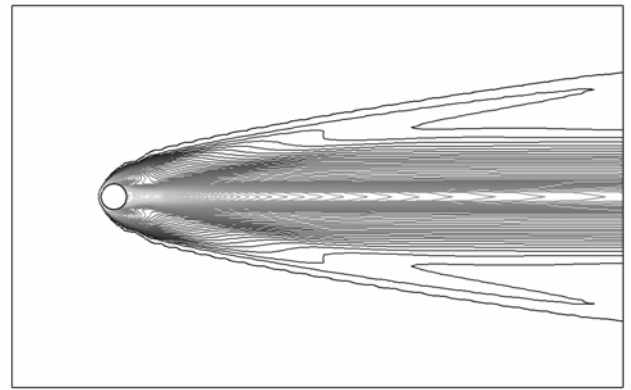


Рис. 10. Изолинии поля температуры при $M_\infty = 10$ во всей расчетной области. Центральное осевое сечение (FLUENT6.1)

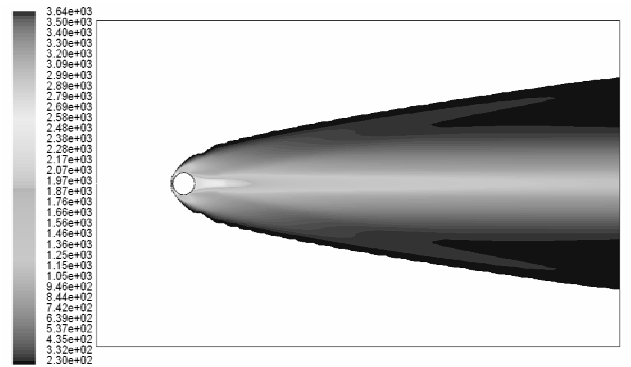


Рис. 11. Распределение температуры при $M_\infty = 10$ во всей расчетной области. Центральное осевое сечение (FLUENT6.1)

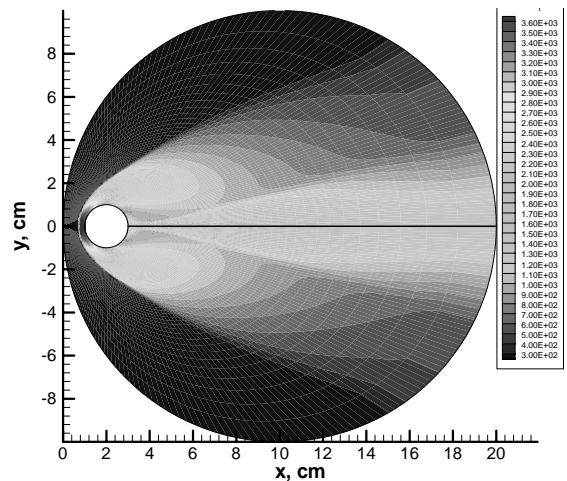


Рис. 12. Распределение температуры при $M_\infty = 10$ во всей расчетной области (NERAT)

Из приведенных данных можно сделать заключение о хорошем соответствии полученных результатов. Однако имеются некоторые различия, связанные с реализацией расчетных сеток в коде NERAT, также с использованием различных расчетных методов и разных расчетных сеток в исследованных кодах. Для построения сеток в коде NERAT использовалась простейшая аналитическая методика, изложенная в [2]. Следствием этого является появление локального максимума в распределении конвективного теплового потока (и температуры поверхности) вблизи передней

критической точки, а также некоторое искажение поля течения на выходе из расчетной области. Численными экспериментами было показано, что оптимизация расчетных сеток, используемых в коде NERAT позволяет исключить указанные недостатки.

Что касается различий, связанных с использованием различных расчетных методик, то вопрос о некотором различии получаемых численных данных является более сложным и требует дальнейшего исследования.

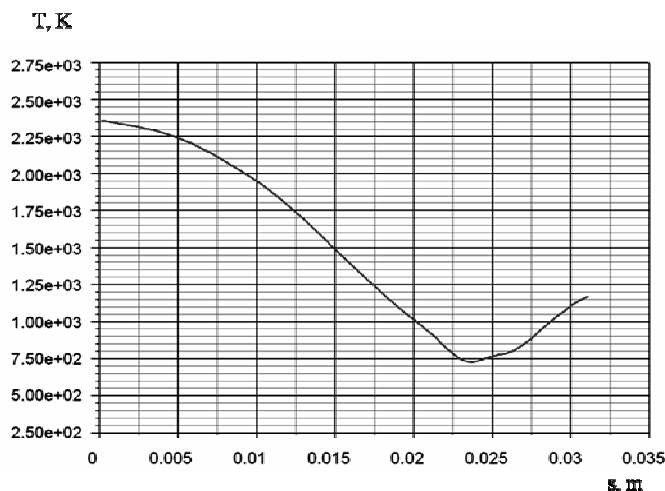
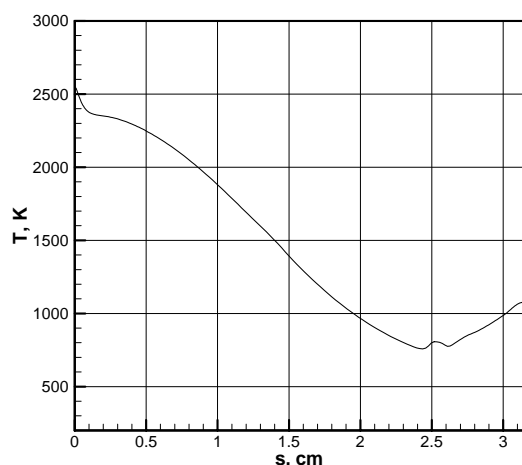


Рис. 13. Распределение температур вдоль цилиндрической поверхности от передней критической точки до задней (слева – NERAT, справа – FLUENT 6.1)

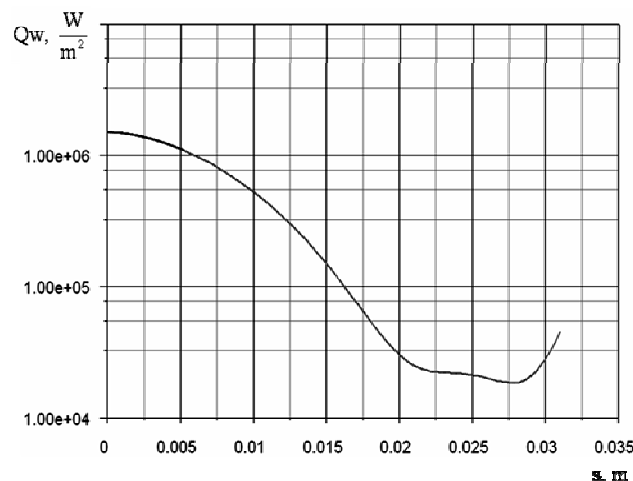
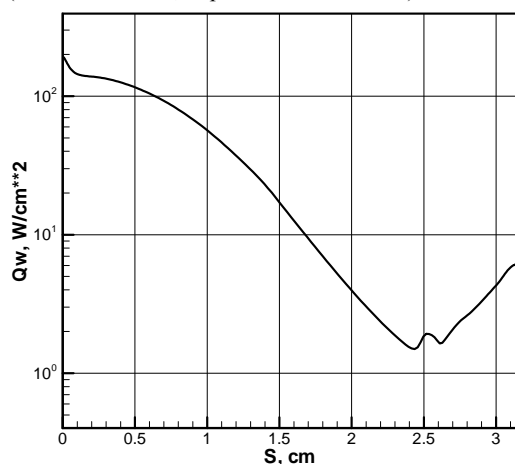


Рис. 14. Плотность теплового потока вдоль цилиндрической поверхности от передней критической точки до задней (слева – NERAT, справа – FLUENT 6.1)

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Путем численного моделирования, с помощью программного комплекса FLUENT 6.1 и программного кода NERAT исследовано обтекание кругового цилиндра однородным потоком вязкого совершенного газа при гиперзвуковых скоростях.

Результаты, полученные с использованием двух рассматриваемых методов хорошо согласуются между собой и с результатами моделирования гиперзвукового обтекания тел простой формы, полученных в других работах.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ 07-01-00133 и программы фундаментальных исследований Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления Российской академии наук.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К);
- p — давление, Па;
- p_∞ — давление во внешнем потоке, Па;
- M — число Маха
- M_∞ — значение числа Маха набегающего потока.
- Q_V — мощность тепловыделения, обусловленного диссипативными процессами и нагревом от внешних источников энергии, Вт/м³;
- T — температура, К;
- T_∞ — температура набегающего потока, К;
- t — время, с.
- u_∞ — скорость набегающего потока, м/с;
- u, v, w — составляющие скорости по осям x, y, z соответственно, м/с
- \vec{V} — вектор скорости, м/с;
- x, y, z — текущие координаты, м;
- λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
- μ — коэффициент динамической вязкости, Па·с;
- ρ — плотность, кг/м³;
- ρ_∞ — плотность набегающего потока, кг/м³;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суржиков С.Т. Метод расчета сверхзвукового обтекания сферы на основе AUSM конечно-разностных схем // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Машиностроение" 2005, № 3. С. 7 – 33.
2. Суржиков С.Т. Аналитические методы построения конечно-разностных сеток для расчета аэротермодинамики спускаемых космических аппаратов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Машиностроение". 2004, № 2. С. 24 – 50.