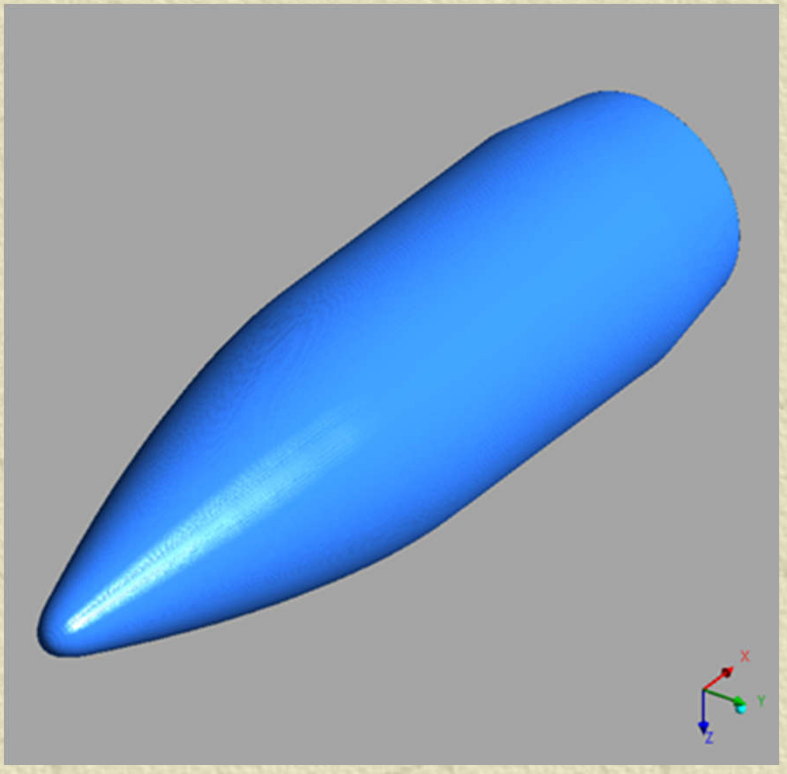
Моделирование сверхзвуковых отрывных течений

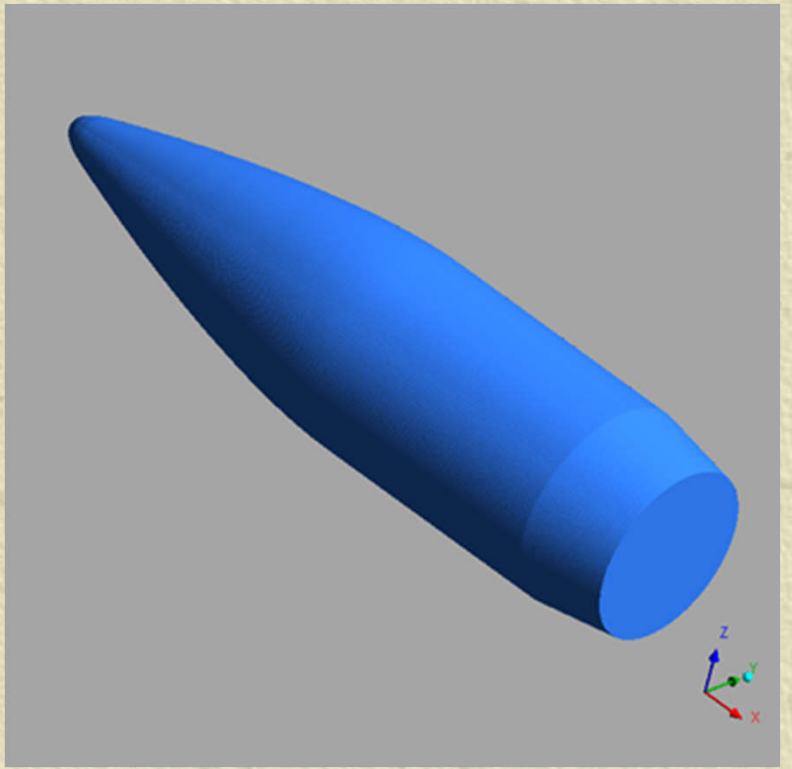
Расчет обтекания пули, летящей со скоростью 800 м/с ($M=2.38$, $Re=1.4 \cdot 10^6$)

Н.Владимирова, М.Стародубцев

- постановка задачи: расчетная область и граничные условия
- топология и размер расчетной сетки
- результаты расчетов, некоторые экспериментальные данные

Рассмотрена задача численного моделирования сверхзвукового вязкого обтекания осесимметричного тела с плоским торцевым срезом – например, пули или снаряда. Общий вид геометрии представлен на этом слайде. Поверхность пули состоит из цилиндрической центральной части, головной части оживальной формы с затупленным носом и скошенной торцевой части с плоским донным срезом. Длина пули 26 мм, калибр 8 мм.



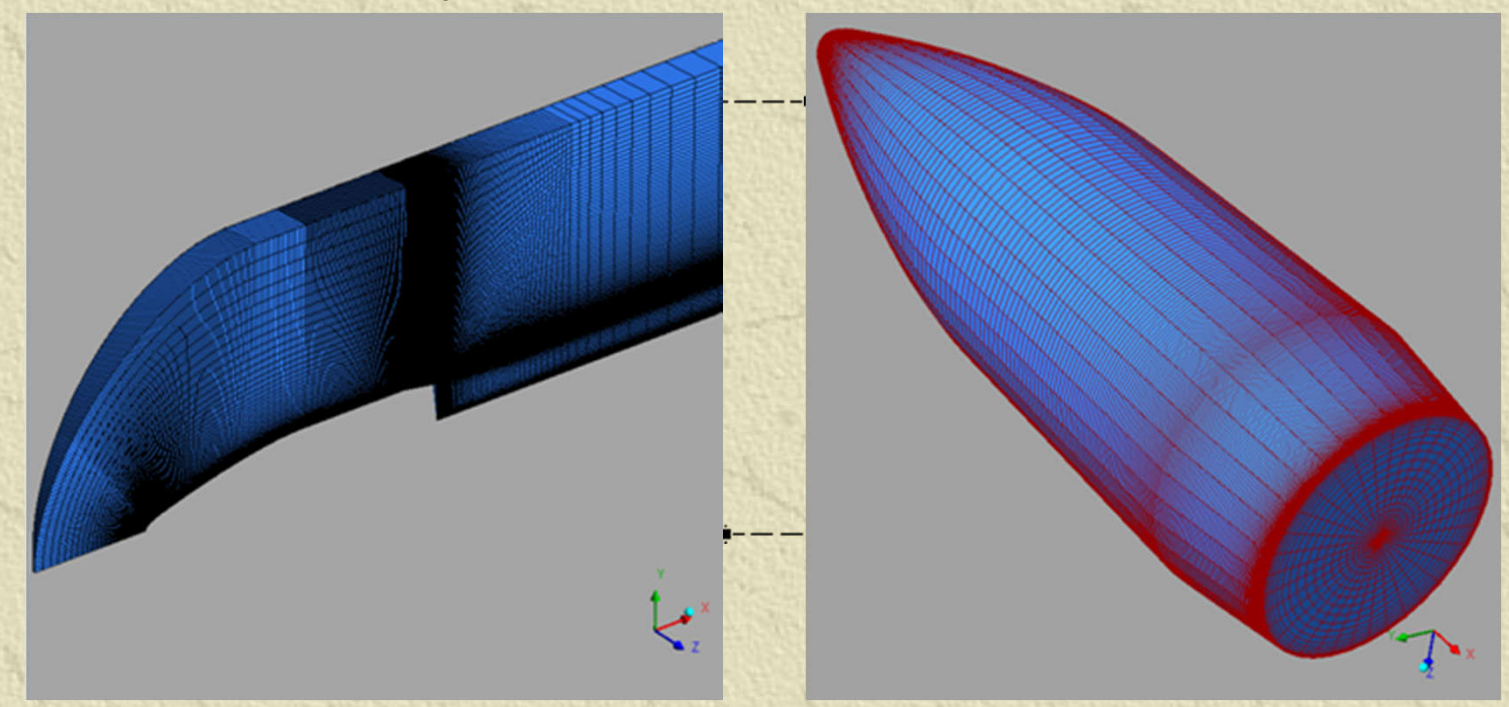


Расчеты проводились на персональном компьютере Intel Pentium 4 CPU 2.00 GHz с объемом оперативной памяти 1 GB.

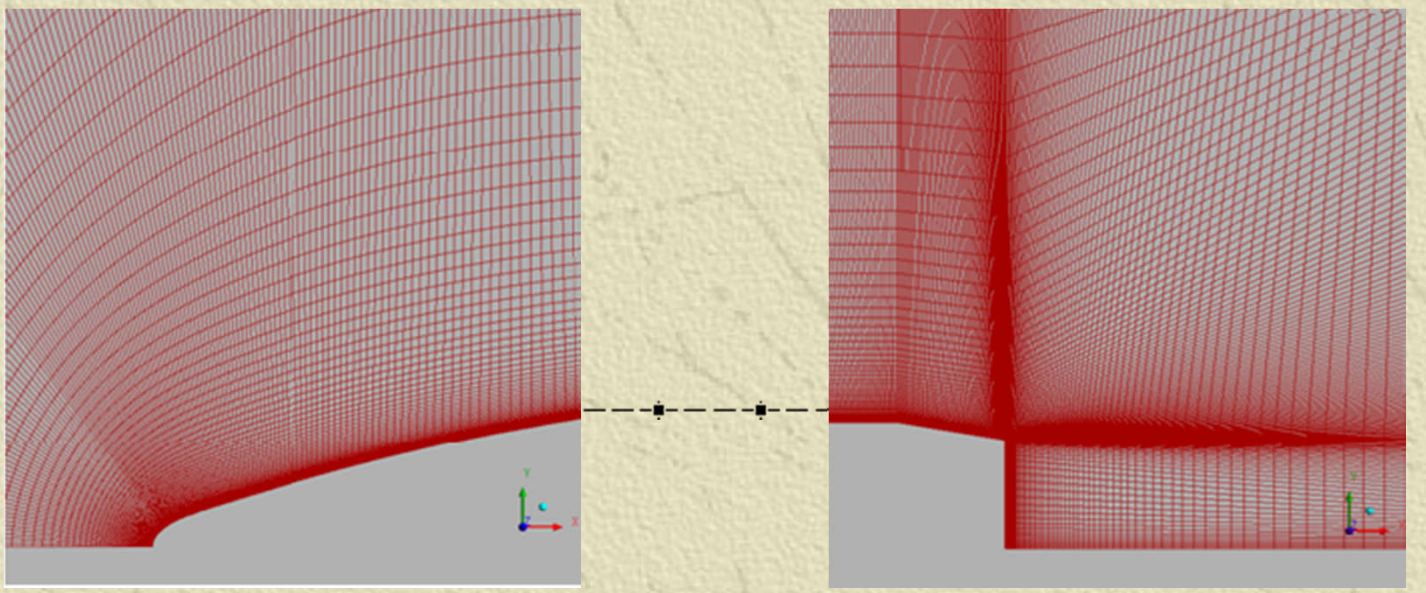
Для решения уравнений Навье-Стокса, описывающих сжимаемые вязкие турбулентные течения, использовался метод конечного объема, численная схема высокого порядка для конвективных и вязких членов и модель турбулентности *SST (Shear-Stress-Transport) k-ω,* позволяющая моделировать течения с развитыми отрывными зонами.

Для получения установившегося стационарного решения обычно требуется осуществить 200-250 итераций, что соответствует 3,5 – 4,5 часам работы персонального компьютера класса Pentium 4 (для расчетных сеток, имеющих около 100 тыс. узлов)

Пуля летит под нулевым углом атаки, поэтому задача является осесимметричной. Расчетная область представляет собой цилиндрический сектор, окружающий пулю и заполненный газом, длиной 14 калибров, с углом раствора 10 градусов. На границах расчетной области использовались сверхзвуковые граничные условия типа “Inlet”, “Outlet”, ”Wall” (на твердой поверхности и на оси симметрии) и “Interface” с периодическими условиями сохранения потоков на боковых гранях расчетного сектора. Ниже представлены общий вид расчетной области и сетки (слева) и сетка на поверхности пули, включая торцевую плоскость (справа)

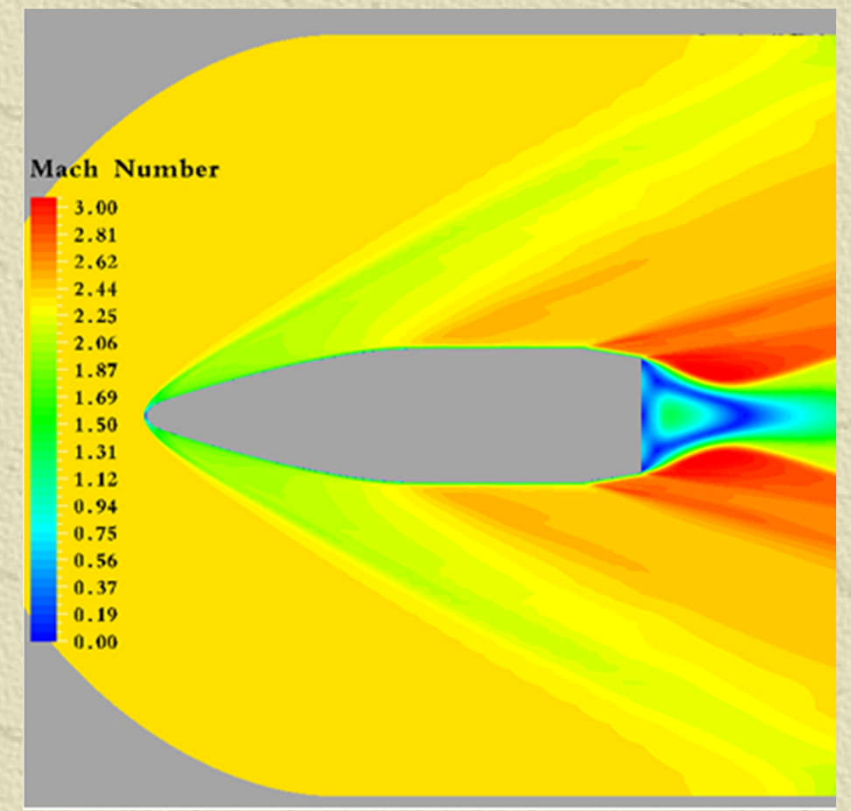


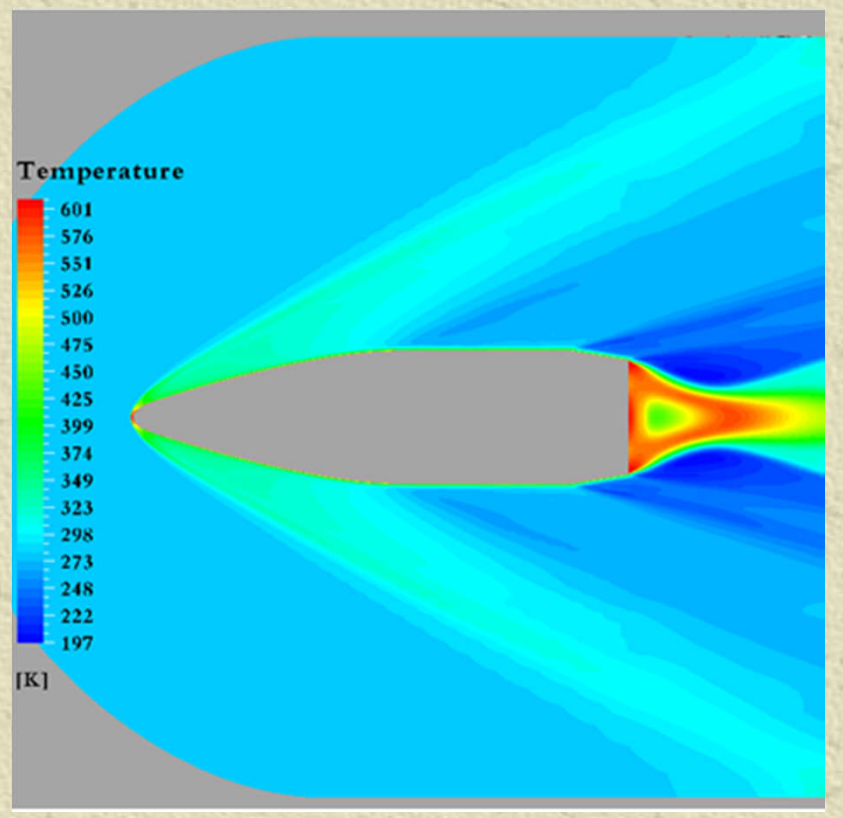
В вертикальной плоскости расчетной области построена структурированная сетка, состоящая из 41471 узла и 40953 четырехугольных ячеек. Затем эта двумерная сетка была «продавлена» на угол 10 градусов для получения «однослойной» пространственной сетки в цилиндрических координатах с числом узлов 82942, ограниченной двумя плоскими периодическими интерфейсами. В области пограничного слоя вблизи тела и в окрестности изломов поверхности, которые могут провоцировать отрыв пограничного слоя, делалось специальное «прижатие» и сгущение ячеек сетки (параметр $y^+ \leq 1$).
Ниже показаны фрагменты «прижатой» сетки в головной части пули (слева) и в донной области за торцевым срезом (справа)



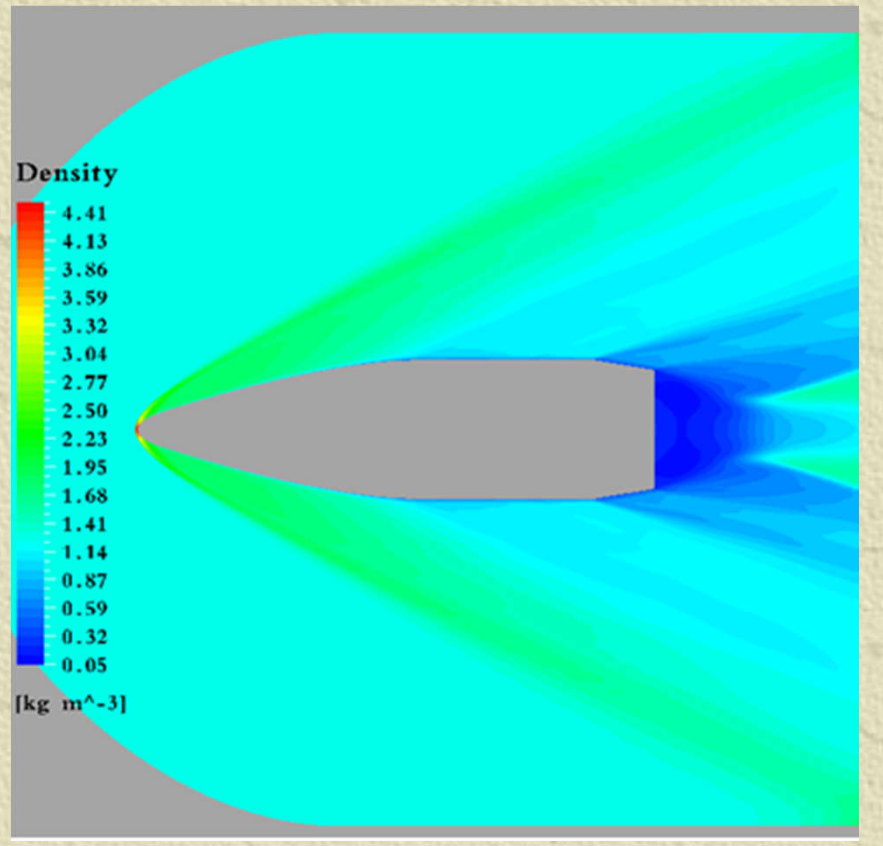
Численные расчеты особенностей течения около пули и различных аэродинамических характеристик проводились при нулевом угле атаки для числа Маха M=2.38 и числа Рейнольдса $Re=1.4\cdot10^6$. Результаты расчетов, а также некоторые экспериментальные данные представлены на этом и следующих слайдах.

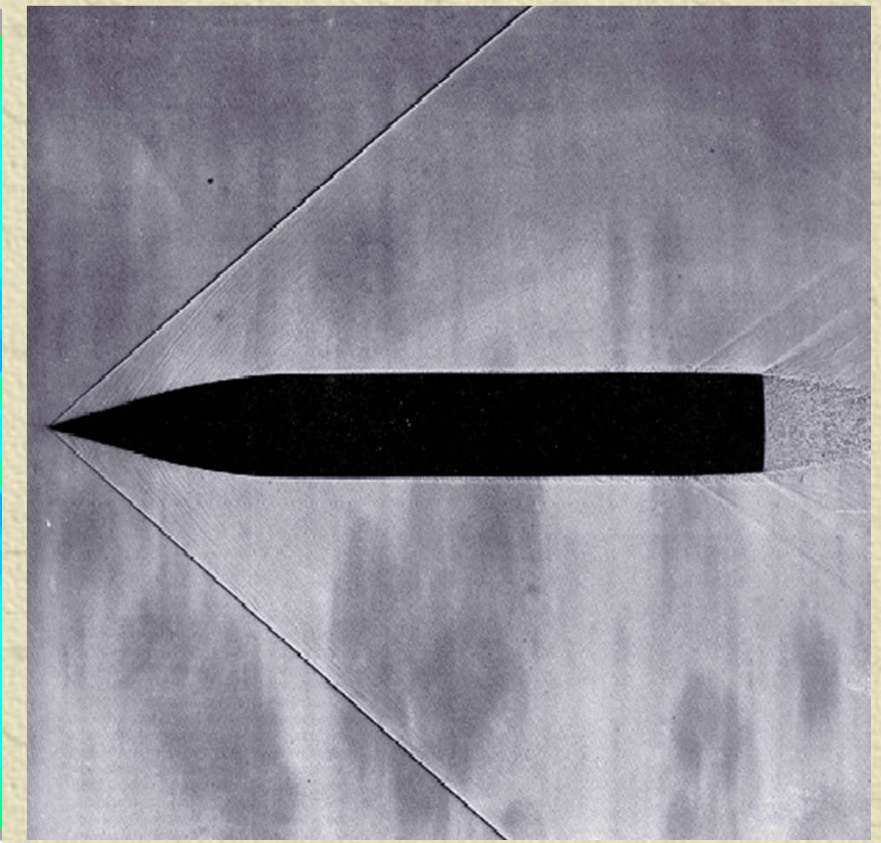
Распределение местных чисел Маха и температуры в вертикальной плоскости симметрии



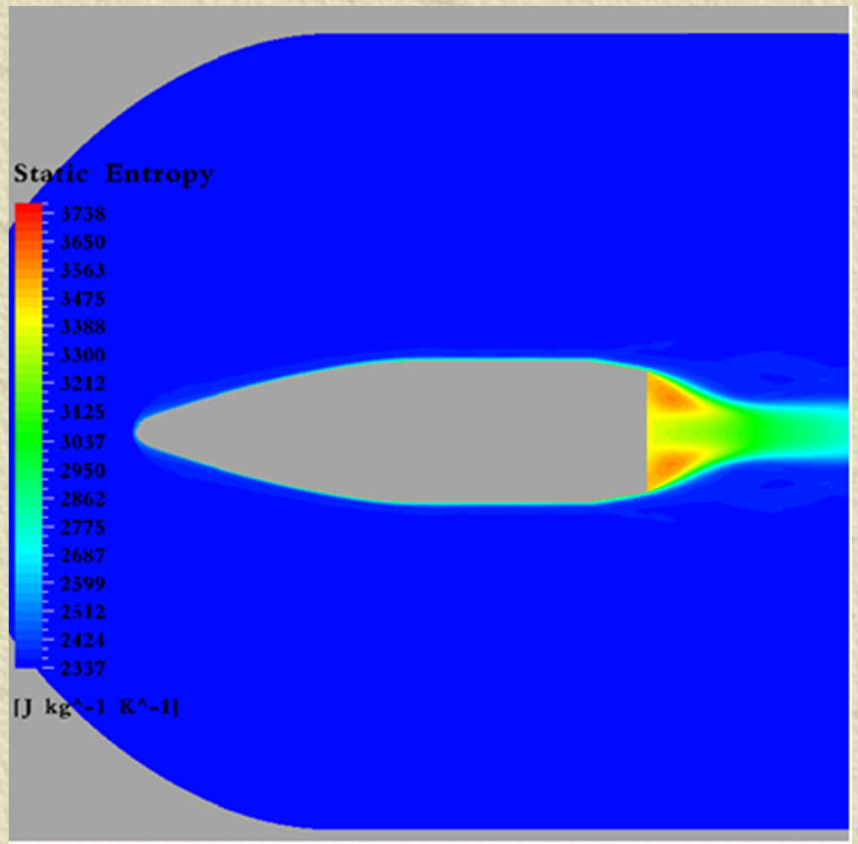


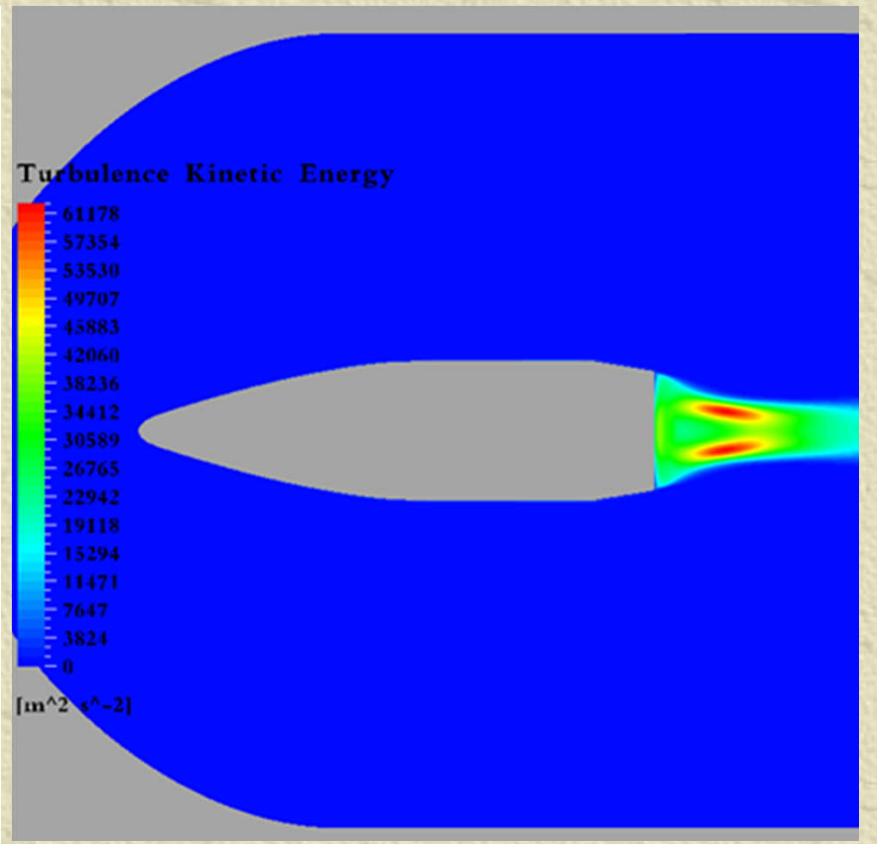
Расчетное распределение плотности в плоскости симметрии (слева) и теневая фотография сверхзвукового (M=2.58) обтекания снаряда (комбинация цилиндра с оживалом), фото из Transonic Range, U.S. Army Ballistic Research Laboratory.



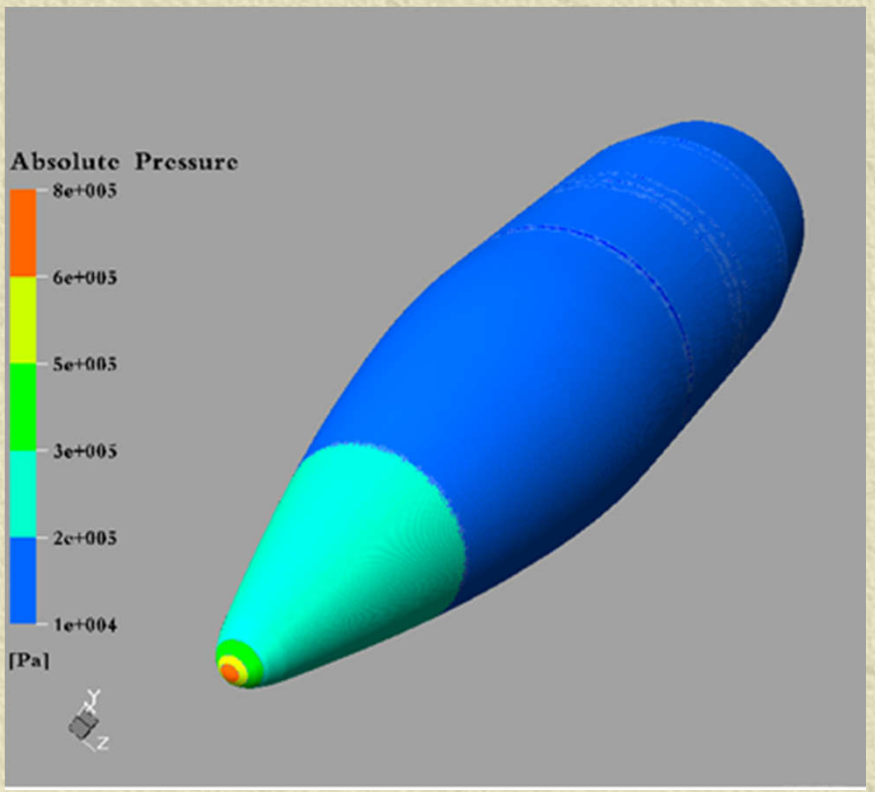


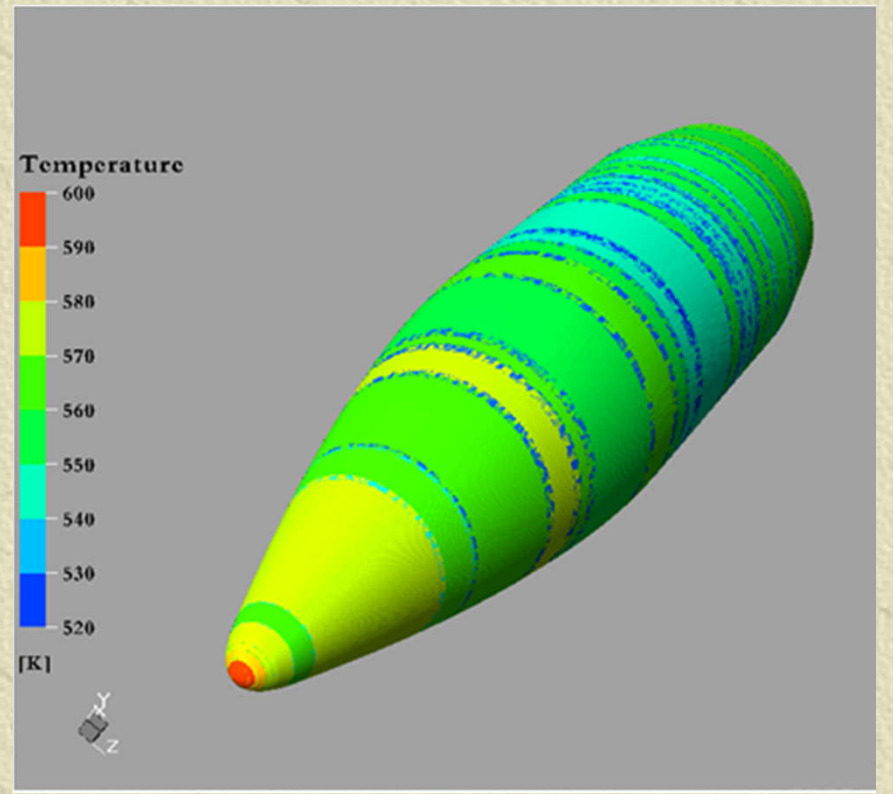
Распределение статической энтропии и турбулентной кинетической энергии в плоскости симметрии





Распределение давления (слева) и температуры (справа) на поверхности пули





Краткий анализ результатов и выводы

Расчеты сверхзвукового обтекания пули, проведенные на персональном компьютере, показали широкие возможности и высокую точность газодинамического пакета программ. Рассмотренная задача сверхзвукового вязкого отрывного обтекания затупленного осесимметричного тела с плоским донным срезом, с образующейся отсоединенной головной ударной волной и протяженной отрывной зоной за торцом пули является достаточно сложной проблемой механики жидкости и газа, решенной в рамках методов CFD. Полученные численные решения позволяют достоверно определять и выявлять качественные и количественные особенности таких течений. Например, следует отметить высокий уровень температуры (до 600°К) на поверхности носовой части пули и в турбулентной отрывной зоне в донной области. В результате расчетов получены значения коэффициентов вязкого ($Cx_{тр}$=0.0173) и донного ($Cx_{дон}$=0.0112) сопротивления пули.