

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ПУЛИ «МАГНИТКА-2» С АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ИГЛОЙ

Н. Владимирова , К. Мякушев

Для расчета аэродинамических характеристик и баллистических коэффициентов пули и снарядов и решения практических задач внешней аэродинамики и баллистики приведены результаты численного моделирования вязкого сверхзвукового (числа Маха $M=1.325$ и $M=1.6$) обтекания осесимметричной калиберной пули стрелочного типа «Магнитка-2» [1] с аэродинамической иглой в виде тонкого цилиндрического стержня в головной части пули.

Аэродинамическая игла предназначена для снижения аэродинамического (волнового) сопротивления пули, что позволяет «Магнитке-2» более продолжительное время сохранять высокую кинетическую энергию, необходимую для поражения. Благодаря своей удачной аэродинамической конструкции пуля «Магнитка-2» устойчива в полете, практически не дает рикошетов, обладает высокой дальностью и экспансивностью, имеет хорошую кучность и применима для стрельбы на расстояниях до 150 м (в то время как предельная дистанция для стрельбы пулями Блондо, Рубейкина и другими известными калиберными пулями для гладкоствольных ружей составляет 80-90 м).

Постановка задачи, геометрия и расчетная сетка

Построение геометрии и генерация расчетной сетки проводились на персональном компьютере.

В расчет закладывались следующие геометрические параметры пули и расчетной области, кинематические параметры потока и физические характеристики воздушной среды:

- диаметр пули «Магнитка-2» 16.8 мм (калибр 12)
- длина пули (без иглы) 40 мм
- длина аэродинамической иглы: исходная конфигурация – 17 мм, «короткая» игла – 8.5 мм, «длинная» игла – 25.5 мм
- расчетная область – цилиндрический сектор 5° , радиус 400 мм, длина 620 мм
- скорость пули 455 м/с, 550 м/с
- среда – воздух (идеальный газ)
- температура покоящегося воздуха 20°C
- атмосферное давление 1 атм
- зависимость вязкости воздуха от температуры – формула Сазерленда

На рис. 1 показана сгенерированная расчетная сетка на поверхности пули (на полной поверхности пули располагается 60 тыс. узлов).

Построенная пространственная гексаэдральная сетка в расчетной области в форме цилиндрического сектора 5° имеет 215 тыс. узлов. Вблизи поверхности пули выполнено необходимое прижатие ячеек сетки, расположенных в пристеночном пограничном слое ($y^+ < 3.5$).

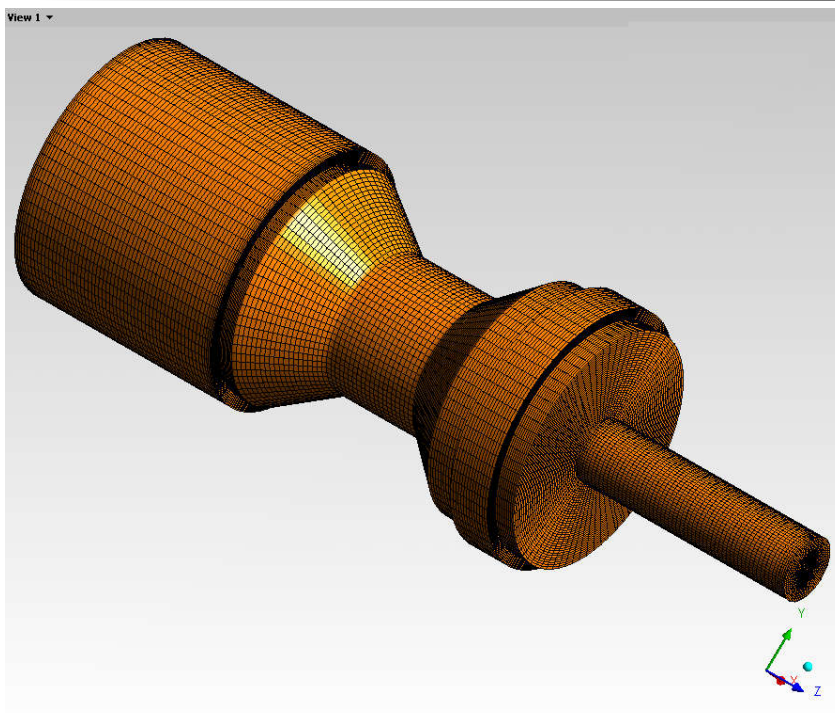


Рис. 1 Расчетная сетка на поверхности пули

Результаты расчетов

Расчеты проводились на персональном компьютере для двух сверхзвуковых вязких режимов обтекания – числа Маха $M=1.325$ и $M=1.6$, и для 4-х вариантов конфигурации геометрии пули: исходная конфигурация с аэродинамической иглой длиной 17 мм, 2 дополнительных конфигурации с «короткой» (8.5 мм) и «длинной» (25.5 мм) иглой и конфигурация пули без аэродинамической иглы, служащей для уменьшения волнового сопротивления пули на сверхзвуковых режимах полета.

Для каждой из 4-х конфигураций была сгенерирована соответствующая геометрии сетка. Для решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS), описывающих вязкие турбулентные сжимаемые течения, использовался метод конечного объема, численная схема высокого порядка по времени и по пространству для конвективных и вязких членов, модель турбулентности SST (Shear-Stress-Transport) $k-\omega$, позволяющая моделировать турбулентное течение в пристеночном пограничном слое, в том числе с развитыми турбулентными отрывами, например, в донной области при обтекании пуль и снарядов.

Целью расчетов являлось численное моделирование и определение аэродинамических характеристик пули «Магнитка-2» при полете со сверхзвуковой скоростью и исследование влияния наличия и длины передней аэродинамической иглы на аэродинамическое сопротивление пули. В результате расчетов получены распределенные и интегральные характеристики сверхзвукового обтекания пули для двух режимов – для скорости 455 м/с, соответствующей скорости вылета пули из ствола при снаряжении в стандартный патрон с порохом «Сокол» (2.5 г), и для скорости вылета 550 м/с, обеспечиваемой более современным патроном с более мощным зарядом пороха.

Распределенные характеристики

На рис. 2 представлены полученные в расчете исходной геометрии пули с аэродинамической иглой длиной 17 мм поля давления и температуры на поверхности пули при скорости 455 м/с.

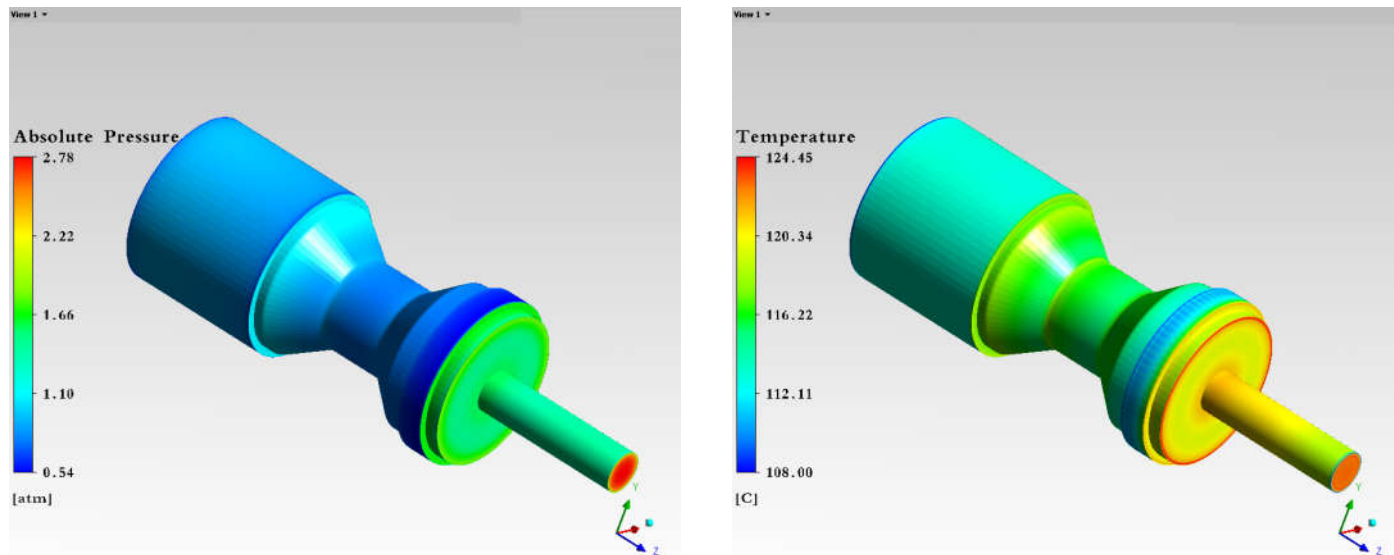


Рис. 2. Давление (слева) и температура (справа) на поверхности пули (скорость 455 м/с)

На рис. 3-4 для рассмотренных 4-х вариантов геометрии пули представлены расчетные поля давления, плотности, скорости, чисел Маха, температуры и кинетической энергии турбулентных пульсаций в диаметральной плоскости области течения при полете пули под нулевым углом атаки со сверхзвуковой скоростью 455 м/с ($M=1.325$) и 550 м/с ($M=1.6$). Характерное число Рейнольдса задачи, рассчитанное по диаметру пули, составляет в среднем значение $Re=5 \cdot 10^5$, обтекание является турбулентным.

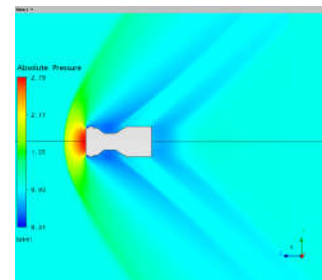
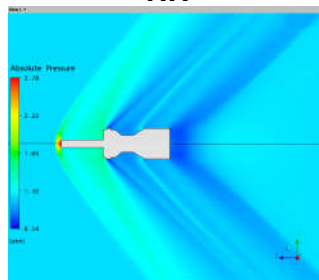
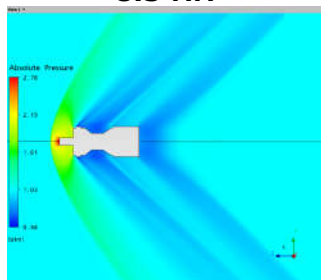
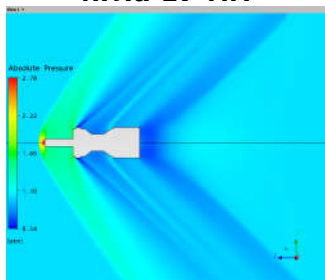
$M=1.325$ (скорость пули 455 м/с)

Исходная геометрия, игла 17 мм

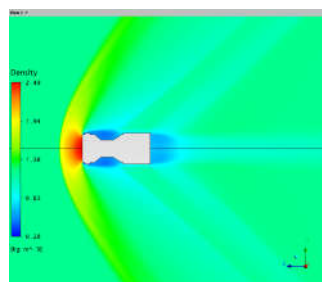
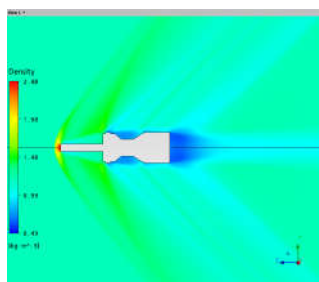
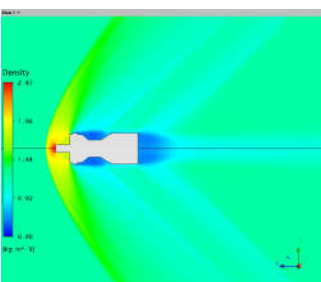
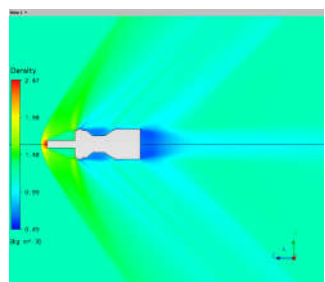
«Короткая» игла, 8.5 мм

«Длинная» игла, 25.5 мм

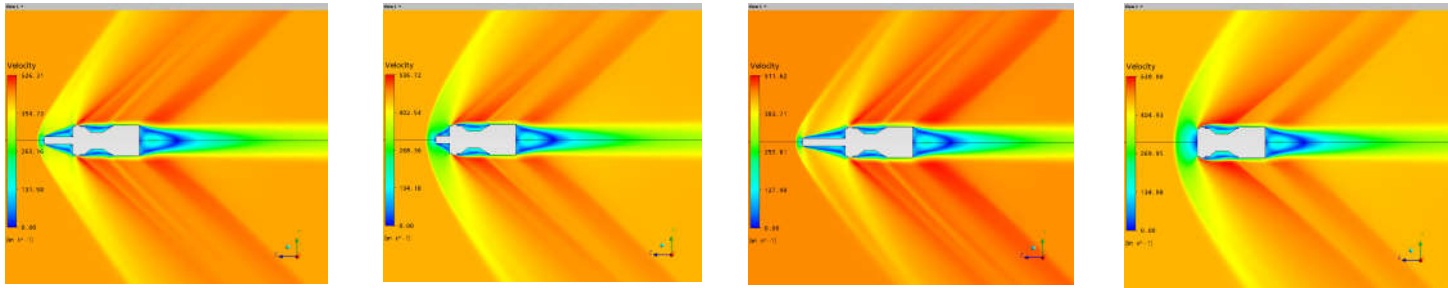
Без иглы



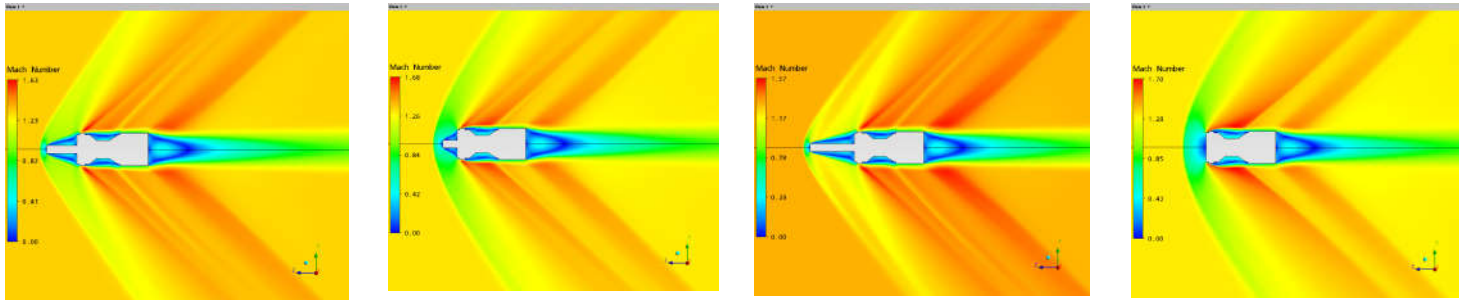
Поле давления



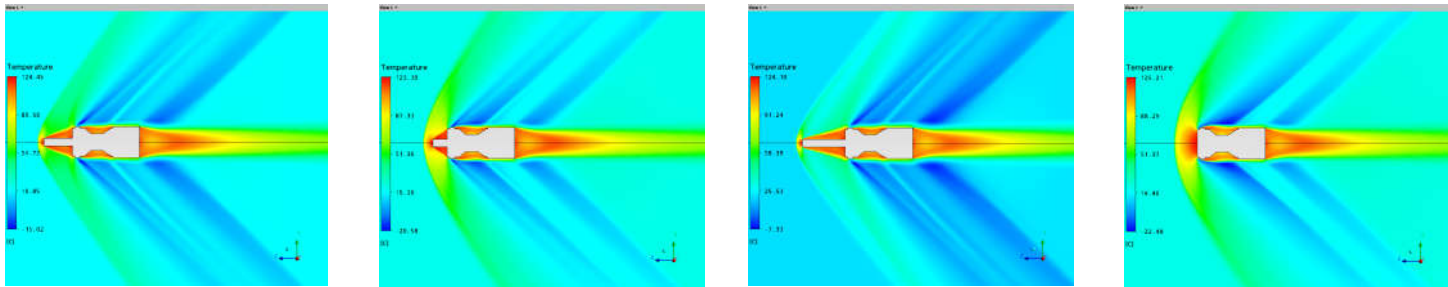
Поле плотности



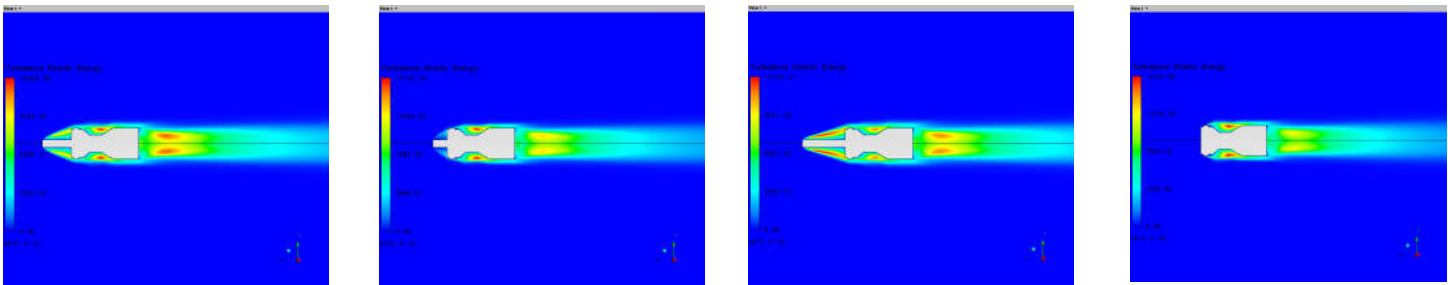
Поле скорости



Поле чисел Маха



Поле температуры



Поле кинетической энергии турбулентных пульсаций

Рис. 3

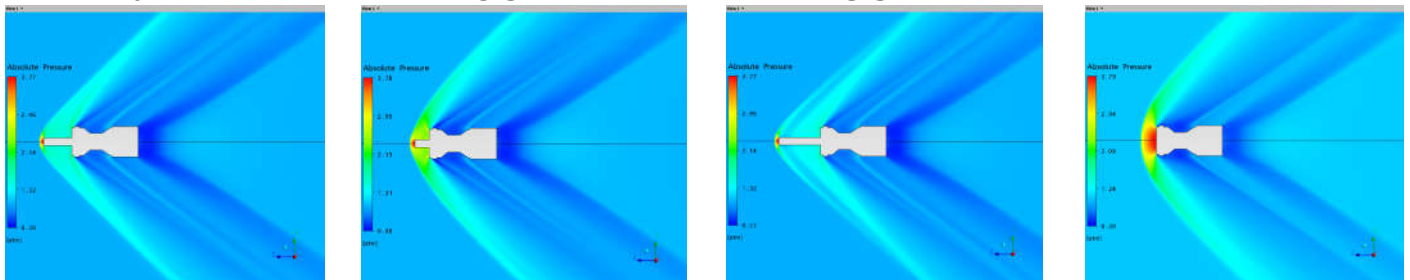
M=1.6 (скорость пули 550 м/с)

**Исходная геометрия,
игла 17 мм**

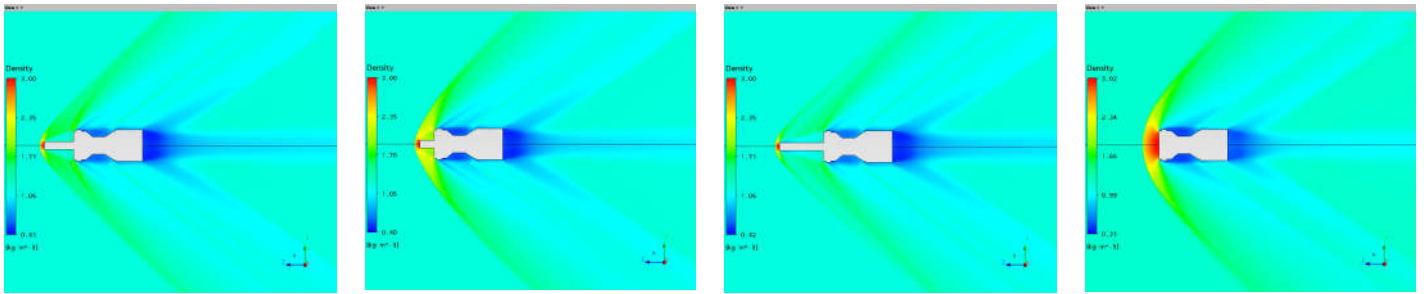
**«Короткая» игла,
8.5 мм**

**«Длинная» игла,
25.5 мм**

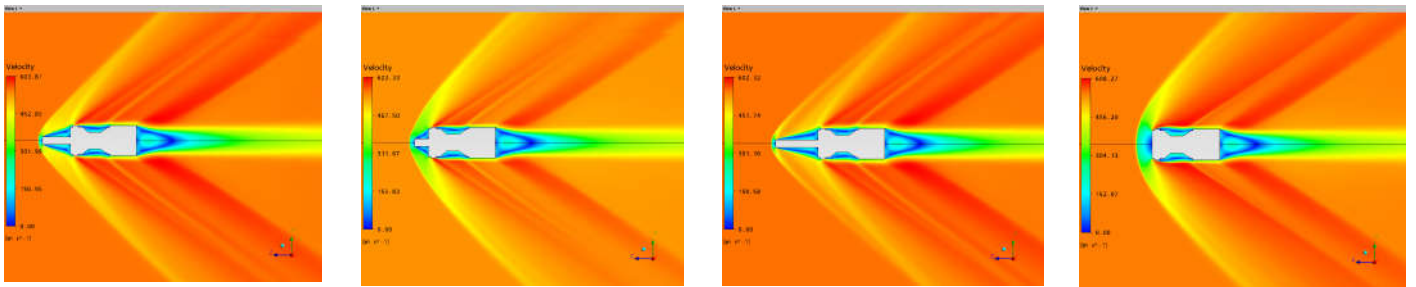
Без иглы



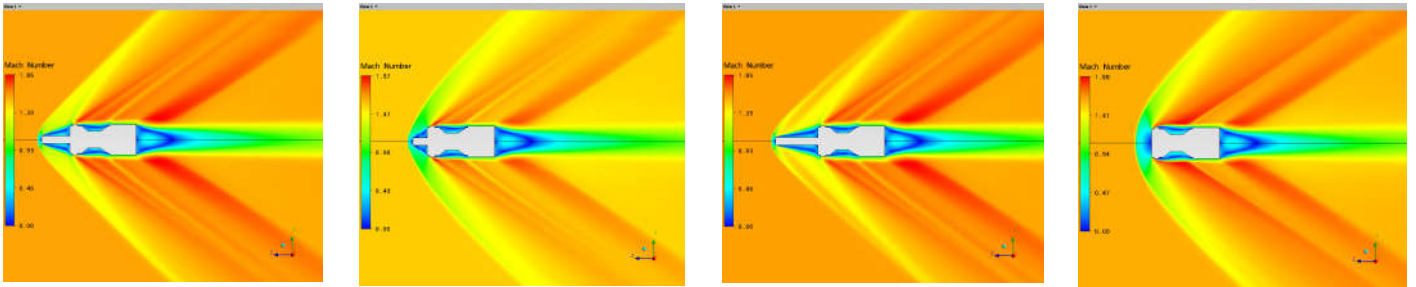
Поле давления



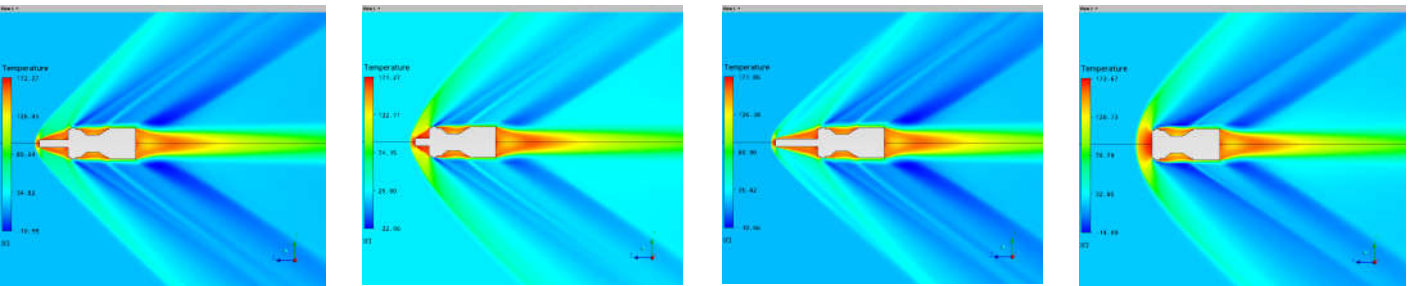
Поле плотности



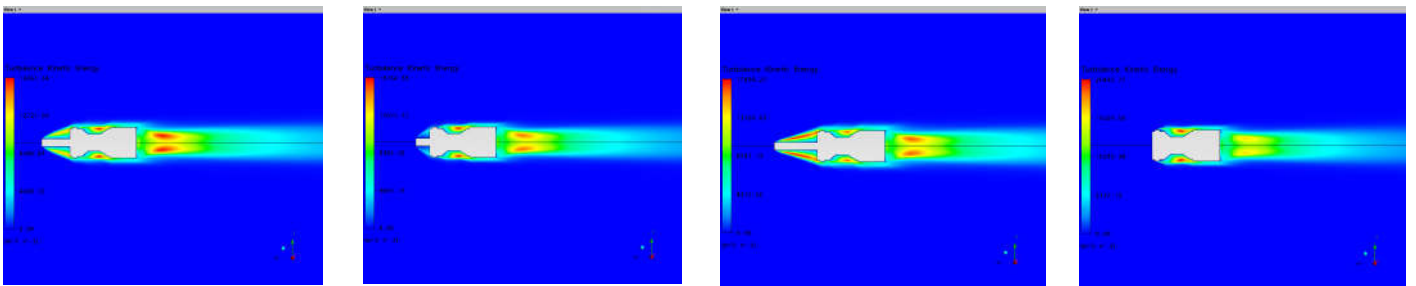
Поле скорости



Поле чисел Маха



Поле температуры



Поле кинетической энергии турбулентных пульсаций

Рис. 4

Как видно из рис. 3-4, при сверхзвуковом обтекании перед пулей возникает отсоединенная ударная волна, скорость за которой резко падает.

При движении вдоль оси пули на изломах ее поверхности возникает серия чередующихся присоединенных косых скачков уплотнения и волн разрежения.

В носовой части пули вокруг аэродинамической иглы и в донной области возникают обширные отрывные зоны в форме «прямого» и «обратного» конусов со скоростями, близкими к нулевым, в этих же областях наблюдается и максимальный газодинамический нагрев потока, и максимальный уровень турбулентных пульсаций.

Как хорошо видно из рисунков, носовая аэродинамическая игла служит для увеличения угла наклона ветвей косого скачка уплотнения и для уменьшения зоны прямого скачка на головной ударной волне, возникающей перед пулей.

Указанные эффекты приводят к снижению необратимых волновых потерь и к уменьшению аэродинамического сопротивления пули. Наращивание длины аэродинамической иглы приводит к заметному усилению производимых ею положительных воздействий на сверхзвуковое обтекание пули.

Интегральные характеристики: сопротивление, формула Сиацчи, коэффициент формы, баллистический коэффициент.

На основании проведенных расчетов сверхзвукового обтекания 4-х вариантов геометрии пули «Магнитка-2» определены интегральная сила сопротивления, действующая на пулю, донное сопротивление и аэродинамический коэффициент сопротивления.

В Таблице 1 представлены интегральные характеристики пули для двух рассчитанных режимов полета – со скоростью 455 м/с и 550 м/с.

Безразмерный аэродинамический коэффициент сопротивления отнесен к скоростному напору и к площади миделя пули.

Таблица 1

	Скорость 455 м/с			Скорость 550 м/с		
	Сопротивлен. (н)	Донное сопротивлен. (н)	Коэффициент сопротивлен.	Сопротивлен. (н)	Донное сопротивлен. (н)	Коэффициент сопротивлен.
Исходная геометрия, игла 17 мм	28.26	7.89	1.025	38.14	10.22	0.947
«Короткая» игла, 8.5 мм	36.42	7.91	1.321	53.45	10.40	1.327
«Длинная» игла, 25.5 мм	25.53	7.69	0.926	34.67	10.00	0.860
Без иглы	42.51	7.72	1.542	66.22	10.16	1.643

Как видно из Таблицы 1, наибольшим аэродинамическим сопротивлением обладает конфигурация пули «без иглы», наименьшим – конфигурация с «длинной» иглой. Понятно, что, увеличивая и дальше длину иглы, можно еще снизить сопротивление.

Но, как показывает опыт, пули с длинными аэродинамическими иглами чаще дают рикошет. Кроме того, возможная длина иглы обычно ограничена размерами патрона (70 мм в нашем случае).

Из Таблицы 1 также видно, что значение донного сопротивления пули практически не зависит от наличия или длины носовой аэродинамической иглы, а коэффициенты полного сопротивления пули «без иглы» и с «длинной» иглой (25.5 мм) при скорости 550 м/с отличаются в 2 раза (1.64 и 0.86 соответственно).

Таким образом, конфигурация пули «Магнитка-2» с «длинной» иглой 25.5 мм практически в 2 раза аэродинамически более совершенна, чем вариант «без иглы», а исходная конфигурация с иглой 17 мм в 1.5-1.7 раза превосходит конфигурацию «без иглы».

Этот факт находит свое отражение в Таблице 2, где представлены так называемые коэффициенты формы и баллистические коэффициенты рассматриваемых вариантов пуль.

Результаты расчетов интегральной силы сопротивления, действующей на пулю, позволяют воспользоваться эмпирической формулой Сиаччи и определить **коэффициент формы и баллистический коэффициент** пули (см. Таблицу 2), широко используемые во внешней баллистике при моделировании полета и определении характеристик пуль и снарядов.

Формула Сиаччи позволяет вычислить сопротивление снаряда или пули по формуле:

$$R = 1000 \cdot i \cdot d^2 \cdot H(y) \cdot F(v),$$

где R – сила сопротивления в ньютонах, i – коэффициент формы, показывающий аэродинамическое совершенство пули или снаряда, d – диаметр пули (в метрах), H(y) – функция зависимости сопротивления от высоты, обусловленная изменением плотности воздуха по высоте, т.е. стратификацией, F(v) – приближенная функциональная зависимость сопротивления от скорости полета v, это, собственно и есть известный полуэмпирический закон Сиаччи.

Воспользуемся этой формулой для определения коэффициента формы пули, зная определенную численным образом силу сопротивления пули из Таблицы 1, принимая H(0)=1 – высота полета y=0, и аппроксимируя закон Сиаччи для сверхзвуковой скорости простой формулой

$$F(V) = V/3 - 80.$$

Таблица 2

	Скорость 455 м/с		Скорость 550 м/с	
	Коэффициент формы	Баллистический коэффициент*	Коэффициент формы	Баллистический коэффициент*
Исходная геометрия, игла 17 мм	1.396	11.257	1.308	10.548
«Короткая» игла, 8.5 мм	1.799	14.507	1.833	14.781
«Длинная» игла, 25.5 мм	1.261	10.169	1.189	9.588
Без иглы	2.010	16.208	2.271	18.313

* Масса пули «Магнитка-2» принималась равной 35 г

Следует отметить, что накопленные баллистические экспериментальные данные дают следующую разбежку значений коэффициента формы пуль и снарядов различной формы: $i=0.45 - 1.0$ для неоперенных пуль и снарядов, имеющих достаточно гладкую, «обтекаемую» форму, $i=1.3 - 1.5$ для оперенных «обтекаемых» пуль, $i=1.0 - 2.5$ для пуль, имеющих плохо обтекаемую форму, в частности, «катушечного» типа, к которым относится и «Магнитка-2».

Во внешней баллистике широко используется баллистический коэффициент C , характеризующий полетные качества пули или снаряда и зависящий от соотношения аэродинамических и массовых сил:

$$C = 1000 \cdot i \cdot d^2 / m,$$

где m – масса пули или снаряда в килограммах. Чем меньше значение баллистического коэффициента C , тем ниже уровень сил сопротивления и тем медленнее пуля или снаряд теряют скорость на траектории полета, т.е. обладают большей дальностью.

Заключение

Для расчета аэродинамических характеристик и баллистических коэффициентов пуль и снарядов и решения практических задач внешней аэродинамики и баллистики приведены результаты численного моделирования сверхзвукового вязкого обтекания пули «Магнитка-2» 12-ого калибра с аэродинамической иглой, предназначенной для снижения аэродинамического (волнового) сопротивления.

Представлены результаты расчетов распределенных характеристик обтекания пули, летящей со скоростью 455 м/с и 550 м/с – поля давления, плотности воздуха, скорости, чисел Маха, температуры; результаты расчета интегральных характеристик для 4-х вариантов геометрии пули (исходная конфигурация с аэродинамической иглой длиной 17 мм, 2 дополнительных конфигурации с «короткой» (8.5 мм) и «длинной» (25.5 мм) иглой и конфигурация пули без аэродинамической иглы) – полного аэродинамического сопротивления пули, коэффициентов формы и баллистических коэффициентов по формуле Сиаичи.

Проведенные расчеты показали, что наибольшим аэродинамическим сопротивлением обладает конфигурация пули «без иглы», наименьшим – конфигурация с «длинной» иглой; значение донного сопротивления пули практически не зависит от наличия или длины носовой аэродинамической иглы.

Коэффициенты полного сопротивления пули «без иглы» и с «длинной» иглой (25.5 мм) при скорости 550 м/с отличаются в 2 раза (1.64 и 0.86 соответственно).

Расчетные исследования показали, что конфигурация пули «Магнитка-2» с «длинной» иглой (25.5 мм) практически в 2 раза аэродинамически более совершенна, чем вариант «без иглы», а исходная конфигурация с иглой 17 мм в 1.5-1.7 раза превосходит конфигурацию «без иглы».

Численное моделирование внешней аэродинамики позволяет решать подобные задачи с достаточной степенью точности и может успешно использоваться для проектирования и последующих баллистических расчетов пуль и снарядов.

Литература

1. В.Н.Трофимов, А.В.Трофимов «Пули. Пулевые патроны». М: ДАИРС. 2007, 365 стр.