

КАК ЛЕТИТ ПУЛЯ?

Автор: **Ruprecht Nennstiel**

Pfingstbornstr.33, D 65207 Wiesbaden, Germany.

Перевод **Геннадия**

Источник <http://www.sniping.ru/index.html?ballistics/fig10>

Краткий обзор

Этот документ является попыткой объяснения сложной проблемы движения пули через атмосферу, избегая формул и математических выкладок, но подразумевает знание читателем с основ физики. Он включает новые экспериментальные наблюдения за полетом пули, выстреленной из огнестрельного оружия, как на коротких, так и на дальних дистанциях. Многочисленные иллюстрации, включенные в документ, могут быть просмотрены по ссылкам для лучшего усвоения материала. Эта статья также задумывалась как введение читателей всех типов (охотников, спортсменов, баллистиков, судебно-медицинских экспертов), интересующихся «загадками» внешней баллистики пуль, выстреленных из огнестрельного оружия.

ВВЕДЕНИЕ

Этот документ является дополненной презентацией, представленной автором на собрании 1995 AFTE в Сан Диего, Калифорния (смотри ссылки) и опубликованную в Журнале AFTE (смотри ссылки). Он в основном предназначен для следующих читателей:

- **Охотников и спортсменов, интересующихся внешней баллистикой,**
- **Студентов и учителей,**
- **Судебно-медицинских экспертов, особенно «новичков» в этой области.**

Название документа «Как летит пуля» может показаться странным вопросом, и с первого взгляда может показаться глупым.

Тем не менее, как и во многих областях науки и техники, изучение относительно простых вещей более тщательным образом может пролить свет на более сложные и запутанные факты. Это особенно верно в отношении движения стабилизируемых вращением пуль, выстреленных из стрелкового оружия.

Большинство людей полагает, что пули летают носиком вперед и остаются стабилизированными от дула до мишени, но это не обязательно так. На коротких дальностях большинство траекторий можно аппроксимировать до прямых линий, в то время как для больших дальностей необходимо принимать в расчет изгиб траекторий.

Большинство экспертов по стрелковому оружию принимают тот факт, что пули может болтать, когда они задевают какие-то объекты, или когда они пролетают промежуточные мишени. Тем не менее, как будет выяснено, некоторые физические условия должны быть выполнены для того, чтобы гарантировать стабильный полет, и пуля не будет стабилизироваться автоматически. Закручивание пули наделяет ее гироскопическими свойствами, которые очень важны – но не достаточны – для обеспечения стабильности пули.

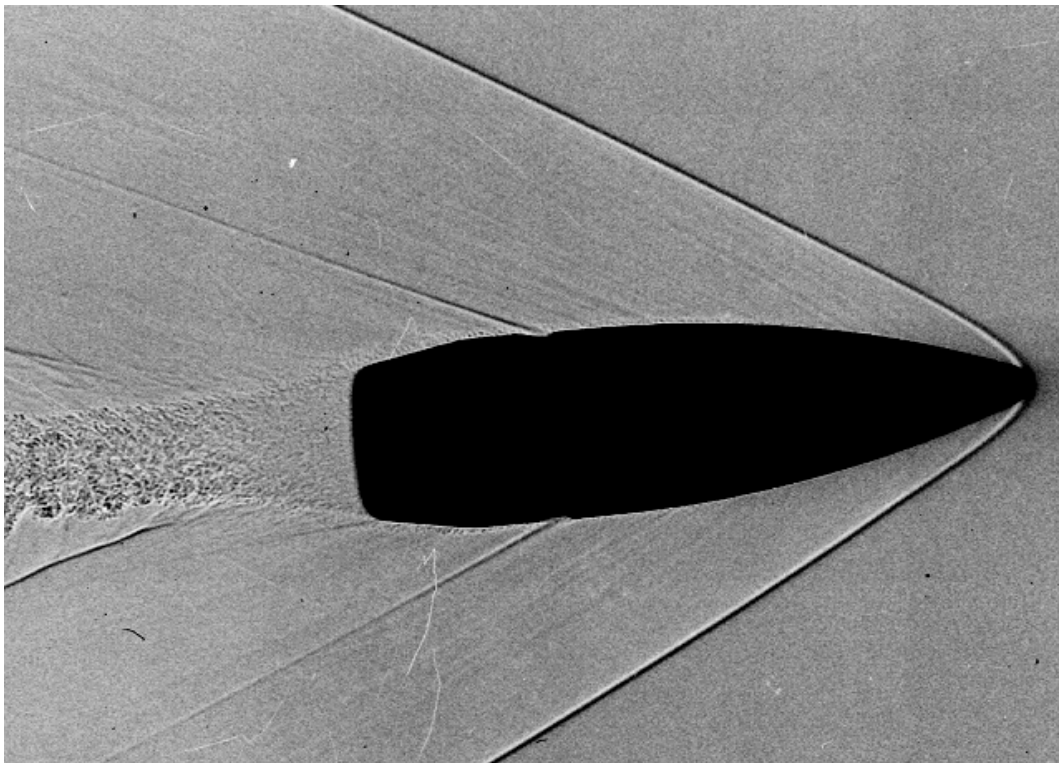
Тем не менее, с точки зрения преподавания, движение вращающегося гироскопа является одним из наиболее сложных движений, с которым студенты-физики не дружат во время лекций по классической механике. Хотя движение гироскопов в целом может быть описано и полностью понято только путем тщательных математических расчетов, это вступление делает попытку описать элементы этого предмета посредством большого количества иллюстраций. Использование формул ограничено и предназначено только для тех, кто бы хотел их видеть

Для объяснения некоторых основных физических терминов, используемых в статье, интересующийся читатель может обратиться к учебнику по элементарной физике.

Данный документ может быть скопирован и свободно использоваться в некоммерческих целях, особенно в целях обучения.

Оглавление:

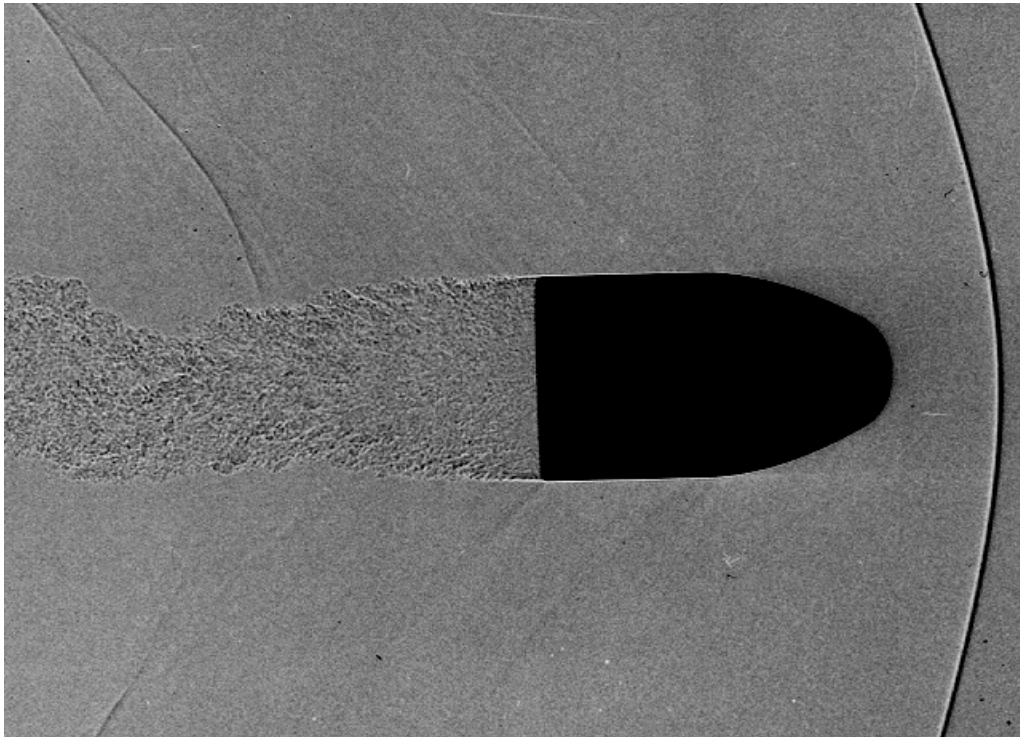
1. ОБОЗНАЧЕНИЯ.	7
2. СИЛЫ И МОМЕНТЫ.	8
3. ВЕТРОВАЯ НАГРУЗКА И ОПРОКИДЫВАЮЩИЙ МОМЕНТ.	11
4. КОЭФФИЦИЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОЗДУХА.	13
5. БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ (BC).	15
6. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОМЕНТОВ.	16
7. СИЛА МАГНУСА И МОМЕНТ МАГНУСА.	18
8. ДВУХПЛЕЧЕВАЯ МОДЕЛЬ РЫСКАЮЩЕГО ДВИЖЕНИЯ.	21
9. СТАБИЛИЗАЦИЯ	22
9.1. Статическая стабильность	23
9.2. Динамическая стабильность	24
9.3. Податливость	26
10. КОРОТКИЕ ДИСТАНЦИИ	27
10.1. Рыскающее движение пуль огнестрельного оружия	28
10.2. Перестабильлизованные пули	32
11. ДАЛЬНИЕ ДИСТАНЦИИ	33
11.1. Рыскане покоя	34
12. АНОМАЛИИ	35
12.1. Статически нестабильная пуля	36
12.2. Динамически нестабильная пуля	36
12.3. На дальних дистанциях	39
13. ВЫВОДЫ	42
14. ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ	42
15. ССЫЛКИ	43



Оболочечная пуля калибра .308 Винчестер (7.62 x 51 НАТО) летит со скоростью примерно 2800 фт/с (850 м/с). Отметьте изменение типа потока от ламинарного к турбулентному на каннелюре пули.

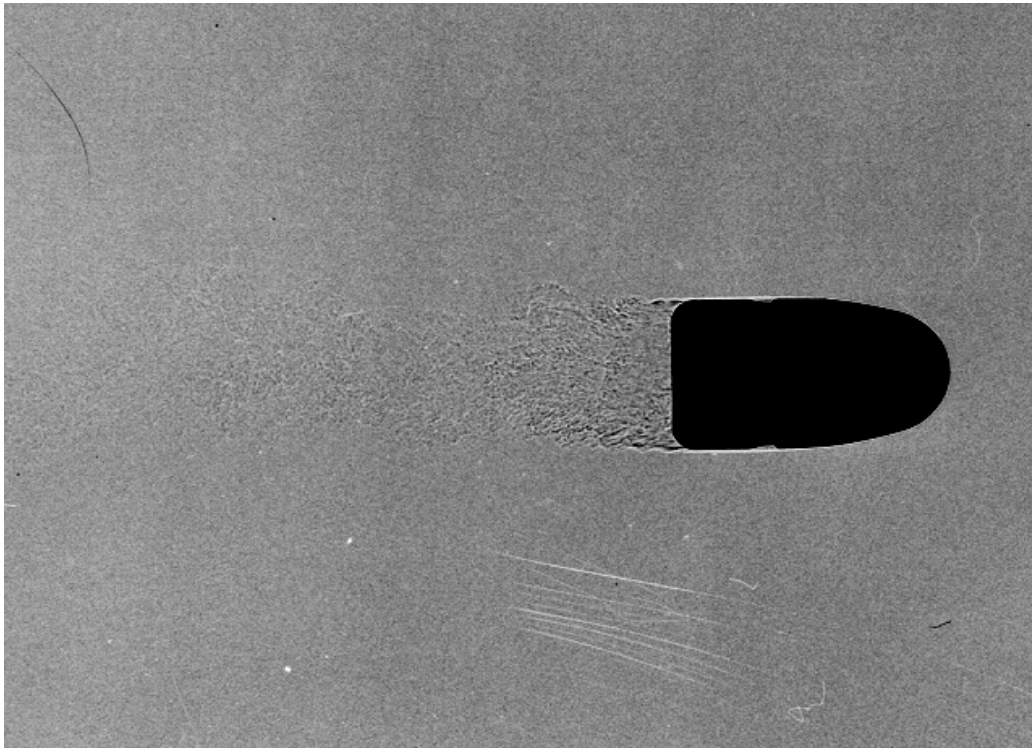
Можно различить по крайней мере три ударные волны. Первая и наиболее интенсивная исходит от носика пули и называется конусом Маха. Вторая ударная волна начинается от расположения каннелюры, и третья ударная волна формируется за донцем пули. Кроме того, можно увидеть высоко турбулентный поток позади донца, который называется турбулентный след.

Тип потока на поверхности пули изменяется от ламинарного пограничного слоя в переднем регионе пули, который характеризуется параллельными обтекающими линиями, до турбулентного потока, демонстрирующего завихрения, начинающиеся от каннелюры.



9-мм оболочечная пистолетная пуля (9 mm Luger FMJ), летящая немного быстрее скорости звука.

можно заметить серьезные отличия: конус Маха все еще присутствует, но он больше не прикреплен к носу пули, и угол открытия конуса увеличился. Турбулентный след все еще виден, но пограничный слой является ламинарным от носика до донца, на всем протяжении поверхности пули.



Пистолетная пуля калибра .32 АСР (7.65 мм Браунинг), летящая на скорости, намного меньшей скорости звука. За донцем пули можно наблюдать только турбулентность (слабую).

1. ОБОЗНАЧЕНИЯ

A	Площадь поперечного сечения пули; $A = \rho d^2/4$
a	Скорость звука в воздухе; $a = a(\rho, T, h)$
B	Символическая переменная, характеризующая геометрию пули
d	Диаметр пули
e_c	Единичный вектор в направлении продольной оси пули
e_t	Единичный вектор в направлении, перпендикулярном траектории
g	Ускорение свободного падения; $g = g(j, y)$
h	Относительная влажность воздуха
I_x	Осевой (или полярный) момент инерции пули
I_y	Поперечный (или экваториальный) момент инерции пули
l	Длина пули
m	Масса пули
Ma	Число Маха
p	Давление воздуха
Re	Число Рейнолдса
r_E	Средний радиус Земли; $r_E = 6\,356\,766$ м
T	Абсолютная температура воздуха
v_w	Скорость пули относительно ветровой системы
y	Высота нахождения пули над уровнем моря
a	Угол по азимуту
d	Угол рыскания
Q	Угол наклона траектории
r	Плотность воздуха; $r = r(\rho, T, h)$
m	Абсолютная вязкость воздуха; $m = m(T)$
j	Угол широты
w	Частота вращения пули (угловая скорость)
w_E	Угловая скорость вращения Земли; $w_E = 7.29 \cdot 10^{-5}$ рад/с

2. СИЛЫ И МОМЕНТЫ

Совет: Если вы не знакомы с физической концепцией сил и моментов, советуем обратиться к справочнику по элементарной физике (глава классическая механика, силы, моменты).

Теневая фотография демонстрирует поле обдувания пули, в основном состоящее из ламинарной и турбулентной областей. Поле обдувания в частности зависит от скорости, с которой движется пуля, формы пули и качества ее поверхности, как от наиболее важных факторов. Поле обдувания, очевидно, стремительно изменяется, когда скорость падает ниже скорости звука, которая составляет около 115 фт/с (340 м/с) для стандартных атмосферных условий.

Математические формулы, посредством которых можно определить параметры поля обдувания (к примеру, давление и скорость поля обдувания в каждом положении) хорошо известны в математике, как уравнения Навье-Стокса. Тем не менее, данные уравнения и их действительные корни являются совершенно различными вещами. Даже с помощью мощных компьютеров до сих пор удалось найти всего лишь несколько применимых решений для некоторых специфических конфигураций.

В виду таких математических ограничений баллистики по всему миру рассматривают движение пули в атмосфере, не учитывая специфических характеристик поля обдувания, и применяя упрощенную точку зрения: поле обдувания характеризуется силами и моментами, действующими на тело. В общем случае, эти силы и моменты должны быть определены экспериментально, что осуществляется в процессе стрелковых экспериментов и тестированием в аэродинамических трубах

В общем случае, тело, движущееся через атмосферу, подвергается влиянию различных сил. Некоторые из этих сил являются силами массы, и прикладываются к CG (центру тяжести) тела и зависят от массы тела и ее распределения по телу. Вторая группа сил называется аэродинамическими силами. Эти силы происходят от взаимодействия поля обдувания с пулей и зависят от формы и качества поверхности тела. Некоторые аэродинамические силы зависят от рыскания, либо от вращения, либо от обоих из них. Описание наиболее важных сил, влияющих на движение пули в атмосфере, показано в приведенной ниже таблице. Для примера, в другой таблице дается величина этих сил для типовой военной пули.

Таблица: Силы, действующие на движущуюся в воздухе пулю:

Силы	Зависят		Примечания
	Рыскание	Вращение	
Силы Массы			
Тяжести	Н	Н	Отвечает за изгиб траектории
Сила Кориолиса	Н	Н	Обычно очень мала
Центробежная Сила	Н	Н	Мала, обычно включена в гравитацию
Аэродинамические силы			
Сопротивления воздуха	Д	Н	Основная аэродинамическая сила
Подъемная (Поперечная ветровая)	Д	Н	Ответственна за боковой снос
Магнуса	Д	Д	Очень важна для стабилизации
Уменьшения тангажа	Д	Д	Обычно очень мала, важна для стабилизации
Поперечная Магнуса	Д	Д	Обычно очень мала

Силы массы

Наиболее простая «баллистическая модель», принимающая во внимание только силу тяжести, была введена Галилео Галилеем (1590). Описание этой важной силы можно найти в любом учебнике по элементарной физике.

$$\mathbf{F}_G = -m \cdot g(\varphi, y) \cdot \mathbf{e}_j$$

Где

\mathbf{e}_j Единичный вектор, направленный противоположно направлению ускорения свободного падения

F_G Сила тяжести

Сила тяжести пропорциональна массе снаряда и местному ускорению свободного падения. Сила направлена к центру земли и прилагается к ЦТ. Сила тяжести ответственна за изгиб траектории.

Так как мы пытаемся изучать движение пуля на Земле, нам необходимо принимать во внимание ее вращение. Тем не менее, формулы Ньютона для движения справедливы только в инерциальной справочной системе координат – которая либо покоится, либо движется с постоянной скоростью. Поскольку мы считаем, что пуля движется в справочной системе координат, закрепленной на вращающейся Земле, нам приходится иметь дело с системой координат, движущейся с ускорением. Но мы можем компенсировать это – и все еще использовать формулы Ньютона – добавлением двух дополнительных сил. **Центробежная сила и сила Кориолиса.**

$$\mathbf{F}_Z = m \cdot \omega_E^2 \cdot r_E \begin{pmatrix} -\sin \varphi \cdot \cos \alpha \\ \cos \varphi \\ \sin \varphi \cdot \sin \alpha \end{pmatrix}$$

где F_Z Центробежная сила

Формула дает компоненты центробежной силы в системе координат хуz, где ось у направлена в противоположную сторону от силы притяжения.

Составляющая по оси y центробежной силы может быть отнесена к поправке на силу притяжения, другими составляющими в баллистике в общем случае пренебрегают в виду их небольшой величины.

$$\mathbf{F}_c = 2m(\mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega})$$

$$\boldsymbol{\omega} = \omega_E \begin{pmatrix} \cos \varphi \cdot \cos \alpha \\ \sin \varphi \\ -\cos \varphi \cdot \sin \alpha \end{pmatrix}$$

где:

\mathbf{F}_c Сила Кориолиса

\mathbf{V} Вектор скорости относительно системы координат xyz

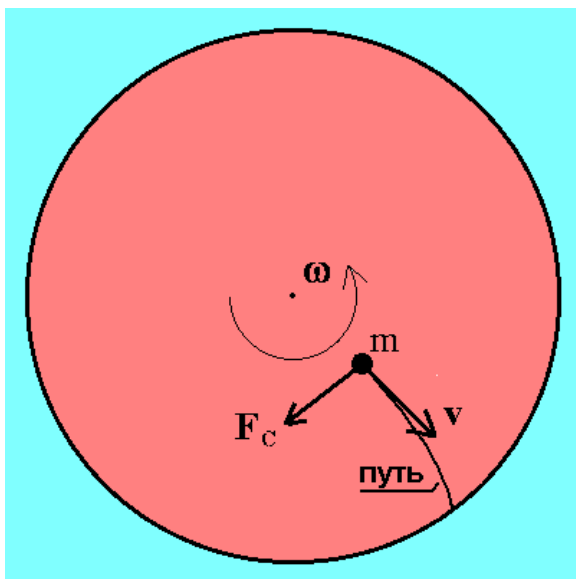
\mathbf{w} Вектор угловой скорости вращения Земли относительно системы координат xyz

Эффект Кориолиса можно продемонстрировать на следующем эксперименте.

Представьте диск, который вначале не вращается. Масса m , которая движется с постоянной скоростью v от центра диска к его наружной поверхности, перемещается по прямой линии. Никакая сила не воздействует на движущуюся массу.

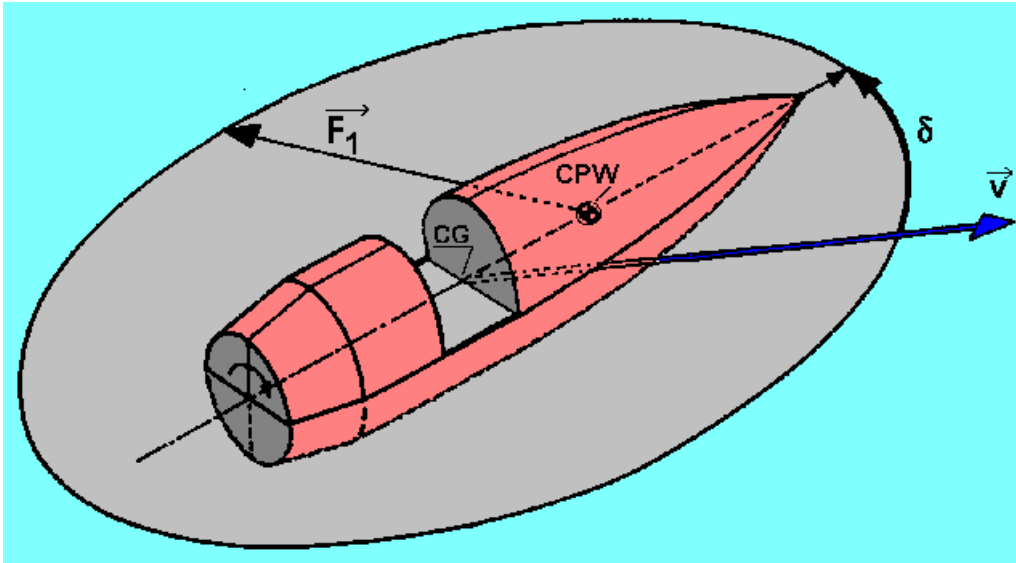
Теперь раскрутим диск с постоянной угловой скоростью w (смотри схему). На массу все еще не действует никаких внешних сил. Наблюдатель, который вращается вместе с диском – и не наблюдает признаков этого вращения – видит, что масса движется вдоль искривленной траектории. Этот наблюдатель может заключить, что масса должна подвергаться воздействию «силы», которая действует перпендикулярно направлению движения. Эта мнимая «сила» называется силой \mathbf{F}_c

Величина воображаемой силы Кориолиса настолько мала, что обычно ею полностью пренебрегают и, как правило, о ней упоминают в баллистике для расстояний в 20 км и более (артиллерийские снаряды).



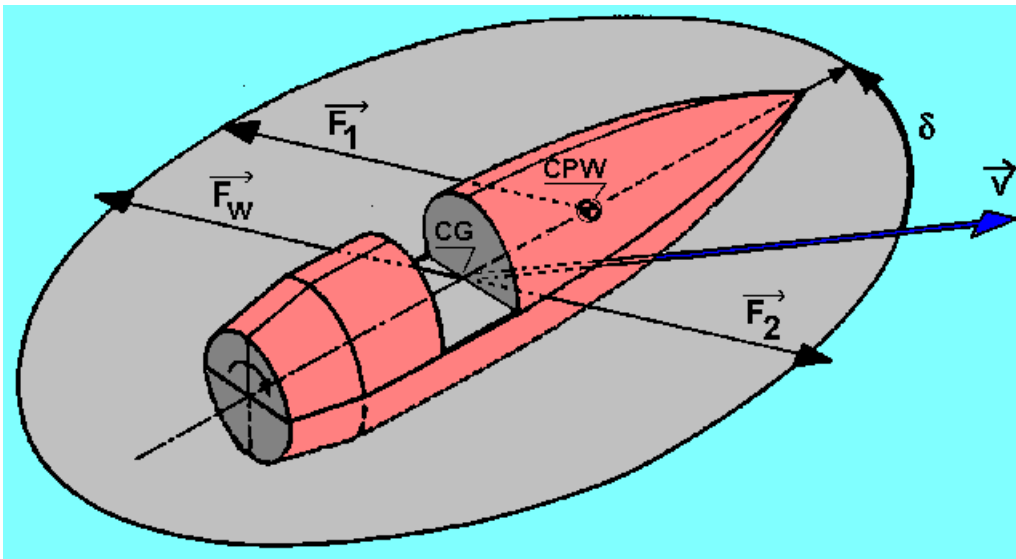
3. ВЕТРОВАЯ НАГРУЗКА И ОПРОКИДЫВАЮЩИЙ МОМЕНТ

Надо отметить, что в общем случае пуля имеет угол рыскания δ . Говоря так, баллистики имеют в виду, что направление движения ЦТ пули отклоняется от направления, в котором расположена ось симметрии пули. Бесчисленные экспериментальные наблюдения показали, что первоначальный угол на дульном срезе ствола оружия практически неизбежен, и он обусловлен такими возмущениями, как вибрация ствола и дульный выхлоп.



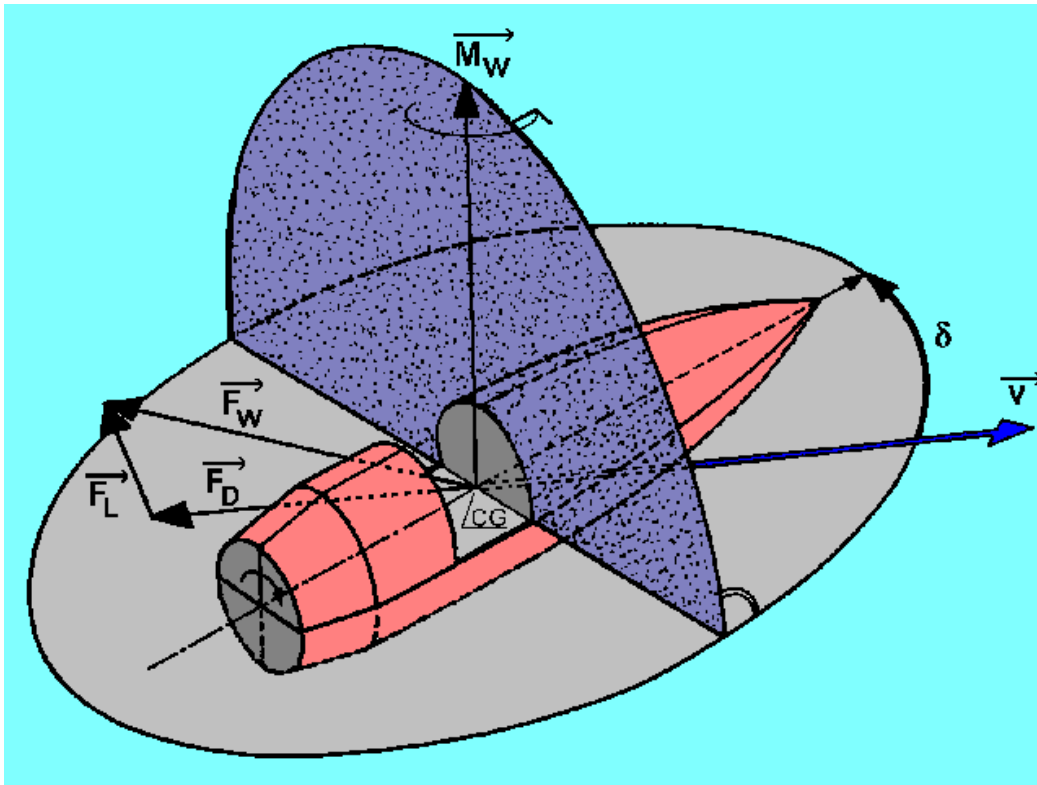
Для такой пули различия в давлении на поверхность пули приводят к возникновению силы, называемой ветровой нагрузкой. Ветровая нагрузка прилагается к центру давления ветровой нагрузки (CPW), который для пуль, стабилизируемых вращением, располагается впереди ЦТ. Расположение CPW, конечно же, не является стационарным и смещается по мере изменения поля обдувания. На рисунке 1. схематично показана ветровая нагрузка F_1 , которая приложена к ее центру давления CPW.

Для пули, движущейся со скоростью v , имеющей угол рыскания δ , давление ветрового потока будет различным, приводя к результирующей силе, которая называется ветровой нагрузкой F_1 . Эта сила будет приложена к центру давления CPW ветровой нагрузки, который, для стабилизируемых вращением пуль, будет располагаться впереди центра тяжести ЦТ или CG. Расположение CPW зависит от условий ветрового потока и изменяется по мере уменьшения скорости. Две силы F_W и F_2 , приложенные к CG, взаимно компенсирующие друг друга, могут быть добавлены к ветровой нагрузке (смотри рисунок 2)



Эта сила прилагается к центру давления CPW для ветровой нагрузки, который, для стабилизируемых вращением пуль располагается впереди центра тяжести CG или ЦТ. Для пуль, стабилизируемых плоскостями, CPW расположен позади CG. Расположение CPW зависит от условий ветрового потока и изменяется по мере уменьшения скорости. Две силы F_W и F_2 , приложенные к CG, взаимно нейтрализующие друг друга, можно добавить к ветровой нагрузке. Силы F_1 и F_2 создают опрокидывающий момент M_W (смотри рисунок 3).

Эта сила прилагается к центру давления CPW для ветровой нагрузки, который, для стабилизируемых вращением пуль располагается впереди центра тяжести CG или ЦТ. Для пуль, стабилизируемых плоскостями, CPW расположен позади CG. Расположение CPW зависит от условий ветрового потока и изменяется по мере уменьшения скорости. Две силы F_W и F_2 , приложенные к CG, взаимно нейтрализующие друг друга, можно добавить к ветровой нагрузке. Силы F_1 и F_2 создают опрокидывающий момент M_W (смотри рисунок 3).



Как показано на рисунке 2, существует возможность добавить две силы к ветровой нагрузке, которые будут иметь одинаковую величину, такую же как и ветровая нагрузка, но будут противоположно направлены. Если приложить эти две силы к ЦТ, Эти две силы, очевидно, не будут иметь никакого воздействия на пулю, так как они полностью уравновешивают друг друга.

Теперь давайте предположим, что эти две силы **F1** и **F2**. Можно показать, что эта пара является свободным вектором, который называется **аэродинамическим моментом** ветровой нагрузки, или, для краткости, **опрокидывающим моментом M_W** , или **моментом рыскания**. Опрокидывающий момент пытается развернуть пулю вокруг оси, которая проходит через ЦТ и перпендикулярна оси формы пули. Для снарядов, стабилизируемых вращением, этот момент будет стремиться вызвать болтанку пули.

Вывод: Ветровая нагрузка, которая прилагается к центру давления, может быть заменена на силу той же величины и направления плюс момент. Сила прилагается к ЦТ, момент разворачивает пулю вокруг оси, проходящей через ЦТ.

Это основное правило классической механики (смотри любой учебник по элементарной физике) и оно верно для любой силы,

которая действует на точку, отличную от ЦТ твердого тела.

Вы можете пойти еще дальше и разложить силу, которая приложена к ЦТ, на силу, которая противоположно направлена к направлению движения ЦТ и силу, которая перпендикулярна этому направлению. Первая сила называется **силой сопротивления воздуха**, F_D или просто сопротивлением

$$\mathbf{F}_D = -\frac{\rho(p, T, h)}{2} \cdot A \cdot c_D(B, Ma, Re, \delta) \cdot v_w^2 \cdot \mathbf{e}_t$$

где:

c_D Коэффициент сопротивления воздуха

F_D Сила сопротивления воздуха

ПОЯСНЕНИЕ:

Сила сопротивления воздуха F_D является компонентом силы F_w , расположенным в направлении, противоположном направлению движения центра тяжести (смотри рисунок). Сила F_w , происходит из-за различий давления на поверхность пули, обусловленного воздухом, обдувающим движущееся тело. В случае отсутствия рыскания сила сопротивления. При данных атмосферных условиях p, T, h , справочной площади A и моментальной скорости v_w , сила сопротивления воздуха полностью определяется **коэффициентом сопротивления воздуха c_D** .

Другая сила - **подъемная сила F_L** или **подъем** для краткости. Название подъем указывает на направление силы вверх, что верно для взлетающего самолета, но в общем случае не верно для пули. Направление подъемной силы зависит от направления угла рыскания. Так словосочетанием, лучшим чем подъемная сила, было бы **поперечная ветровая сила**, это название можно найти в некоторых учебниках по баллистике.

$$F_L = \frac{\rho(p, T, h)}{2} \cdot A \cdot c_L(B, Ma, Re, \delta) \cdot v_w^2 \cdot e_L$$

$$e_L = \frac{1}{\sin \delta} (e_t \times (e_c \times e_t))$$

где:

c_L Подъемный коэффициент; $c_L(B, Ma, Re, d)$

e_L Единичный вектор

F_L Подъемная сила

Подъемная сила F_L (также называется сила поперечного ветра) это компонент ветровой нагрузки F_w в направлении, перпендикулярном направлению движения центра тяжести в плоскости угла рыскания . Подъемная сила исчезает при отсутствии рыскания, и по этой причине происходит снос вращающейся пули даже при отсутствии ветра.

Очевидно, что при отсутствии рыскания ветровая нагрузка сводится только к силе сопротивления воздуха.

4. КОЭФФИЦИЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОЗДУХА

Коэффициент сопротивления воздуха c_D является одним из наиболее важных аэродинамических коэффициентов и в основном зависит от :

- геометрии пули (символическая переменная V),
- числа Маха Ma ,
- числа Рейнольдса Re ,
- угла рыскания d

В баллистике обычно принимаются следующие предположения и упрощения:

- 1. Пренебрежение Re** - Можно показать, что за исключением очень маленьких скоростей зависимостью c_D от Re можно пренебречь;
- 2. Зависимость от d** - В зависимости от применяемой физической модели баллистического тела углом рыскания либо полностью пренебрегают ($d=0$), либо имеют дело только с очень маленькими углами рыскания. Большие углы рыскания указывают на нестабильность.

Для малых углов рыскания обычно делается следующее приближение:

$$а) c_D(B, Ma, d) = c_{D0}(B, Ma) + c_{Dd}(B, Ma) * d^2 / 2$$

Другая теория, которая принимает во внимание существенные углы рыскания, называется «метод аналогии поперечного потока». Обсуждение этого метода лежит за рамками темы данной статьи, тем не менее формула для определения коэффициента сопротивления воздуха в данном случае выглядит так:

$$б) c_D(B, Ma, d) = c_{D0}(B, Ma) + F(B, Ma, Re, d)$$

3. Определение коэффициента сопротивления при нулевом рыскании

Коэффициент сопротивления при нулевом рыскании является функцией числа Маха Ма и в основном определяется экспериментальным путем либо при тестировании в аэродинамической трубе, либо измерениями, сделанными при помощи Доплеровского радара.

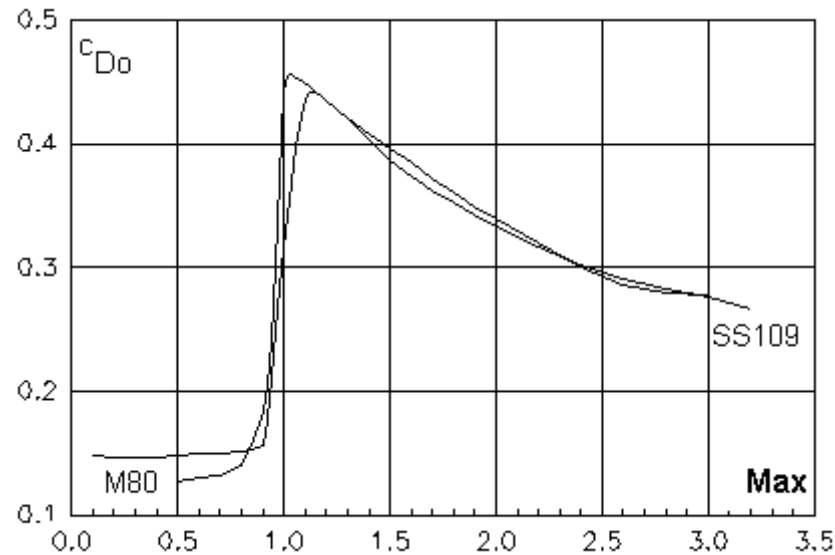


Рис.: Коэффициент сопротивления для нулевого рыскания для двух военных пуль
M80 (кал. 7.62 x 51 НАТО)
SS109 (кал. 5.56 x 45)

Существует также программное обеспечение, которое оценивает коэффициент сопротивления для нулевого рыскания как функцию числа Маха в зависимости от геометрии пули. Этот метод в основном применяется на фазе разработки новых снарядов.

4. Стандартные функции сопротивления воздуха

В общем случае каждая геометрия пули имеет собственный коэффициент сопротивления при нулевом рыскании как функцию от числа Маха. Это означает, что для каждой геометрии пули требуются специфические – требующие серьезных затрат времени и дорогостоящие – измерения. Широко используемым упрощением является применение «стандартной функции сопротивления» $c_{Do}^{standard}$, которая зависит только от числа Маха и от фактора формы i_D , который зависит только от геометрии пули и вычисляется по формуле:

$$c_{Do}(B, Ma) = i_D(B) * c_{Do}^{standard}(Ma)$$

где:

c_D Коэффициент сопротивления воздуха; $c_D(B, Ma, Re, d)$

$c_{Do}^{standard}$ Стандартная функция сопротивления при нулевом рыскании

i_D Фактор формы

Если это упрощение применимо, определение коэффициента сопротивления воздуха как функции от числа Маха сводится только к определению подходящего фактора формы. Будет показано, что концепция **баллистического коэффициента**, широко применяемого в США для снарядов стрелкового оружия, использует такую же идею.

5. БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ (BC)

«Баллистический коэффициент» или **bc** – это характеристика сопротивления, испытываемого пулей, движущейся в атмосфере, которая широко используется производителями компонентов для переснаряжения патронов, в основном в США. Хотя, с современной точки зрения, **bc** являются пережитками ранних времен знаний о внешней баллистике, баллистические коэффициенты были экспериментально определены для такого большого количества пуль стрелкового оружия, что никакие трактаты специалистов по внешней баллистике не в состоянии отменить их применение.

Баллистический коэффициент тестовой пули bc^{test} летящей со скоростью v является действительным числом и определяется как замедление, обусловленное сопротивлением воздуха, для «стандартной» пули, деленное на замедление, обусловленное сопротивлением воздуха, для тестовой пули.

Стандартной называется пуля, имеющая массу 1 фунт (0.4536 кг) и диаметр в 1 дюйм (25.4 мм). Коэффициент сопротивления для стандартной пули может быть взят из **G1**-функции, и будет называться $c_{Do}^{G1}(Ma)$.

Используя формулу:

$$c_{D0}^{test}(B, Ma) = i_D^{test}(B) * c_{D0}^{G1}(Ma)$$

можно получить для **bc** (подразумевая «стандартные» атмосферные условия):

$$bc^{test} = 1 / i_D^{test}(B) * m_{test} / d_{test}^2$$

где:

c_{D0}^{test} Коэффициент сопротивления для тестовой пули при нулевом рыскании

c_{D0}^{G1} Стандартный коэффициент сопротивления G1 при нулевом рыскании

i_D^{test} Фактор формы для тестовой пули

bc^{test} Баллистический коэффициент для тестовой пули

m_{test} Масса тестовой пули в фунтах

d_{test} Диаметр тестовой пули в дюймах

Эта формула также показывает, что **bc** и фактор формы i_D для «тестовой» пули являются двумя аспектами одного и того же принципиального упрощения (неизвестной) конкретной функции сопротивления для пули до (данной) «стандартной» функции сопротивления для стандартной пули.

6. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОМЕНТОВ

Итак, мы рассмотрели силы, то, как образуются ветровая нагрузка и **опрокидывающий момент**, но мы еще не имели дела с их влиянием.

$$M_W = \frac{\rho(p, T, h)}{2} \cdot A \cdot c_M(B, Ma, Re, \delta) \cdot v_w^2 \cdot d \cdot e_W$$

$$e_W = \frac{1}{\sin \delta} (e_t \times e_c)$$

где:

c_M Коэффициент опрокидывающего момента; $c_M(B, Ma, Re, d)$

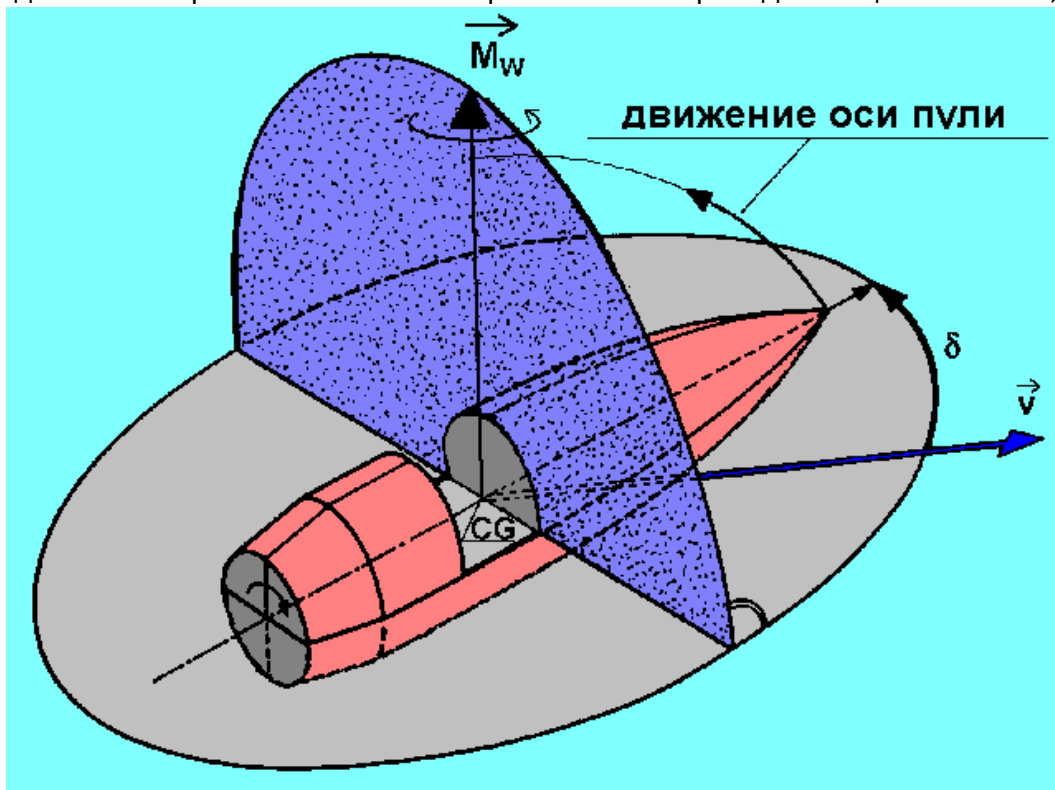
e_W Единичный вектор

M_W Опрокидывающий момент

Сила сопротивления и подъемная сила прилагаются к ЦТ и просто воздействуют на движение ЦТ. Конечно же, сопротивление замедляет это движение. С влиянием подъемной силы мы встретимся позже.

Очевидно, что опрокидывающий момент стремится увеличить угол рыскания, и можно ожидать, что пуля начнет болтаться и станет нестабильной. Это хорошо видно, если стрелять пулями из стволов, не имеющих нарезов. Тем не менее, если мы говорим о вращающихся снарядах, в игру вступает **гироскопический эффект**, влияние которого невероятно.

Гироскопический эффект может быть описан и объяснен исходя из общих законов физики и может быть подтвержден математическими вычислениями. В данный момент мы просто должны принять то, что мы наблюдаем: ввиду гироскопического эффекта продольная ось пули движется в противоположном направлении от опрокидывающего момента, как показано стрелкой на **рисунке 4**



В общем случае из-за влияния гироскопического эффекта, ось симметрии пули будет двигаться по поверхности конуса со скоростью, вектор которой будет направлен по оси конуса. Это движение часто называется **прецессией**. Тем не менее, более современные источники называют это **медленной модой осцилляции**.

Опрокидывающий момент M_w стремится повернуть пулю вокруг оси, которая проходит через **CG** и которая перпендикулярна плоскости рыскания, плоскости, сформированной вектором скорости v и продольной осью пули. При отсутствии вращения угол рыскания d будет возрастать, и пуля начнет болтаться.

Если пуля обладает существенным вращением, скажем, если она вращается достаточно быстро вокруг оси своей симметрии, будет иметь место **гироскопический эффект**: продольная ось пули движется в направлении опрокидывающего момента, перпендикулярно к плоскости сопротивления. Тем не менее, эта ось смещается вместе с плоскостью сопротивления, которая затем поворачивается вокруг вектора скорости.

Чтобы еще больше все усложнить, скажем, что реальное движение стабилизируемой вращением пули еще более запутано. В дополнение к этому, к медленной осцилляции добавляется еще и быстрая осцилляция. Тем не менее, мы вернемся к этому позже.

Момент замедления вращения

Поверхностное трение оболочки снаряда замедляет его вращательное движение. Тем не менее, угловая скорость вращающейся пули снижается намного меньше **моментом замедления вращения**, чем поступательная скорость, которая уменьшается ввиду действия силы сопротивления воздуха. Как будет показано позже, это является причиной того, почему пуля, которая гироскопически стабильна на дульном срезе

будет оставаться гироскопически стабильной во время всего остального полета.

$$M_s = -\frac{\rho}{2} \cdot A \cdot c_{spin}(B, Ma, Re) \cdot v_w^2 \cdot d \cdot \frac{\omega \cdot d}{v_w} \cdot e_c$$

где:

c_{spin} Коэффициент момента затухания вращения; $c_{spin}(B, Ma, Re)$

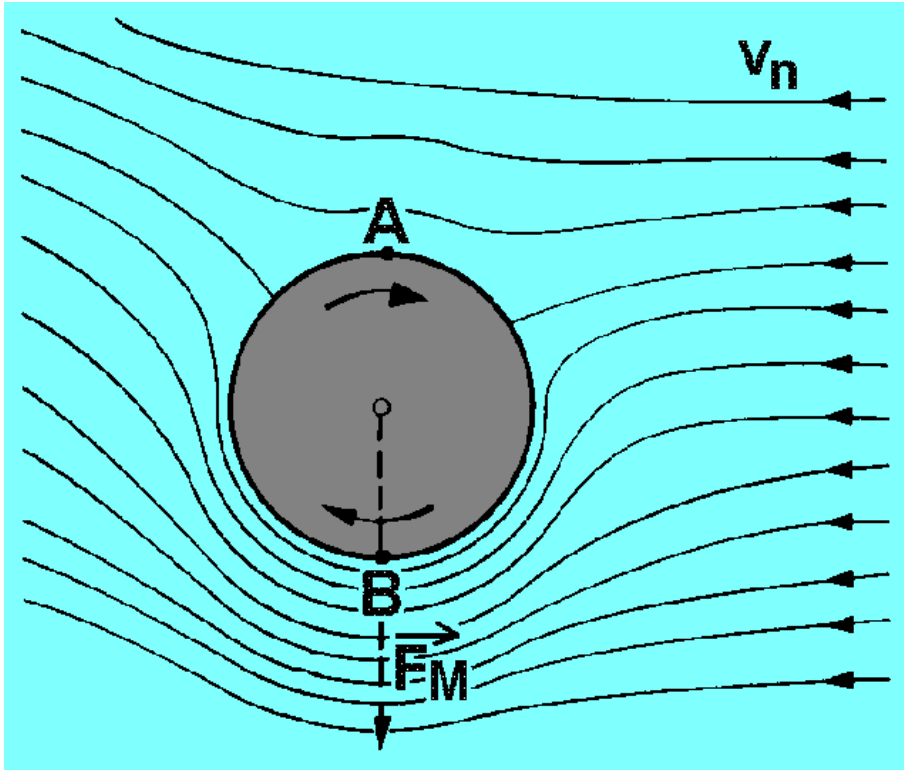
M_s Момент затухания вращения

ОБЪЯСНЕНИЕ:

Поверхностное трение на поверхности пули замедляет ее вращательное движение. Момент затухания вращения (также момент затухания оборачивания) рассчитывается по приведенной выше формуле. Коэффициент затухания вращения зависит от геометрии пули и типа обтекания (ламинарное или турбулентное).

7. СИЛА МАГНУСА И МОМЕНТ МАГНУСА.

В общем случае ветровая нагрузка будет являться доминирующей аэродинамической силой. Тем не менее, существует еще несколько более мелких сил, но нам бы хотелось упомянуть только силу Магнуса, которая, как оказывается, является очень важной для стабилизации пули.



В соответствии с **рисунком 5**, мы рассматриваем пулю сзади. Предположим, что пуля имеет правостороннее вращение, как показано двумя стрелками. Кроме того, мы предусматриваем наличие угла рыскания d . Продольная ось пули должна наклоняться влево, как показано на предыдущих рисунках. И еще существует компонент скорости ветрового потока V_n , перпендикулярный оси симметрии пули.

Из-за вращения пули и прилипания молекул воздуха к поверхности пули, ветровой поток в районе пули становится асимметричным. Скорость течения воздуха и скорость поворота тела **вычитаются** в точке **A** и **складываются** в точке **B** (смотри приведенный выше рисунок). Тем не менее, в соответствии с правилом Бернулли (смотри любой учебник по элементарной физике), это совпадает с различием в давлении. Повышенное давление в **A** и пониженное давление в **B** дает увеличение направленной вниз силы, которая также называется силой **Магнуса** F_M , приводящей к возникновению направленной вниз (только для данной диаграммы!)

Это объясняет то, почему сила Магнуса, в отношении летящей пули, требует наличия вращения, а также угла рыскания, иначе она исчезает. (Генрих Густав Магнус, *1802, умер в 1870; Немецкий физик).

$$\mathbf{F}_M = \frac{\rho(p, T, h)}{2} \cdot A \cdot c_{Mag} \left(B, Ma, Re, \frac{\omega \cdot d}{v_w}, \delta \right) \cdot \frac{\omega \cdot d}{v_w} \cdot v_w^2 \cdot \mathbf{e}_M$$

$$\mathbf{e}_M = \frac{1}{\sin \delta} (\mathbf{e}_c \times \mathbf{e}_t)$$

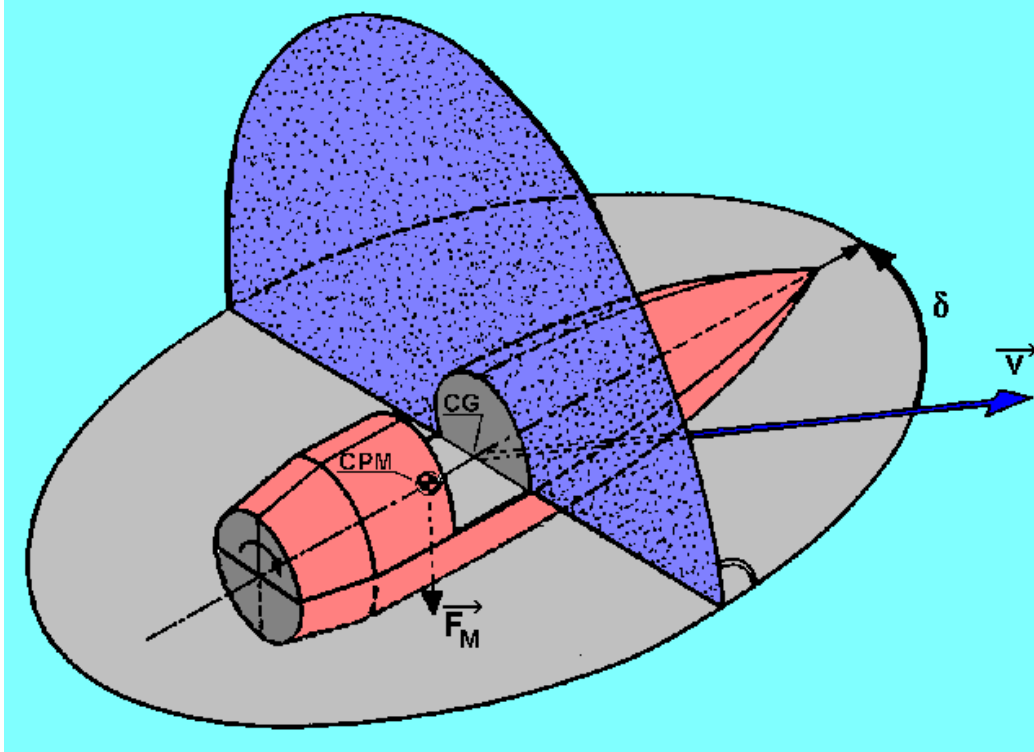
где:

c_{Mag} Коэффициент силы Магнуса; $c_{Mag}(B, Ma, Re, w, d)$

\mathbf{e}_M Единичный вектор

F_M Сила Магнуса

Сила Магнуса обычно очень мала и в основном зависит от геометрии пули, частоты вращения, скорости и угла рыскания. Во внешней баллистике для определения силы Магнуса используется данная формула.



Если представить себе всю поверхность пули, то можно найти полную силу Магнуса, прилагаемую к мгновенному центру давления СРМ (смотри **рисунок 6**).

Центр давления для силы Магнуса изменяется как функция от структуры поля обдувания, и может располагаться как **позади**, так и **впереди** ЦТ. Величина силы Магнуса существенно меньше величины ветровой нагрузки. Тем не менее, в определенный момент, который будет обсуждаться позже, она будет иметь существенное значение в стабилизации пули.

На приведенном рисунке 6 предполагается, что **СРМ** расположен позади **СГ**. Эксперименты показали, что это является верным для стандартной оболочечной пули НАТО калибра 7.62 x 51 по крайней мере вблизи дульного среза для режима высоких сверхзвуковых скоростей.

Вы можете повторить шаги, которые были пройдены в процессе обсуждения ветровой нагрузки. Опять же, мы можем заменить силу Магнуса, приложенную к ее Центру Давления (СР), на эквивалентную силу, приложенную к ЦТ плюс момент, который назовем **Момент Магнуса M_M**

$$\mathbf{M}_M = \frac{\rho(p, T, h)}{2} \cdot A \cdot c_{Mp} \left(B, Ma, Re, \frac{\omega d}{v_w}, \delta \right) \cdot \frac{\omega d}{v_w} \cdot d \cdot v_w^2 \cdot \mathbf{e}_{MM}$$

$$\mathbf{e}_{MM} = \frac{1}{\sin \delta} (\mathbf{e}_c \times (\mathbf{e}_c \times \mathbf{e}_t))$$

где:

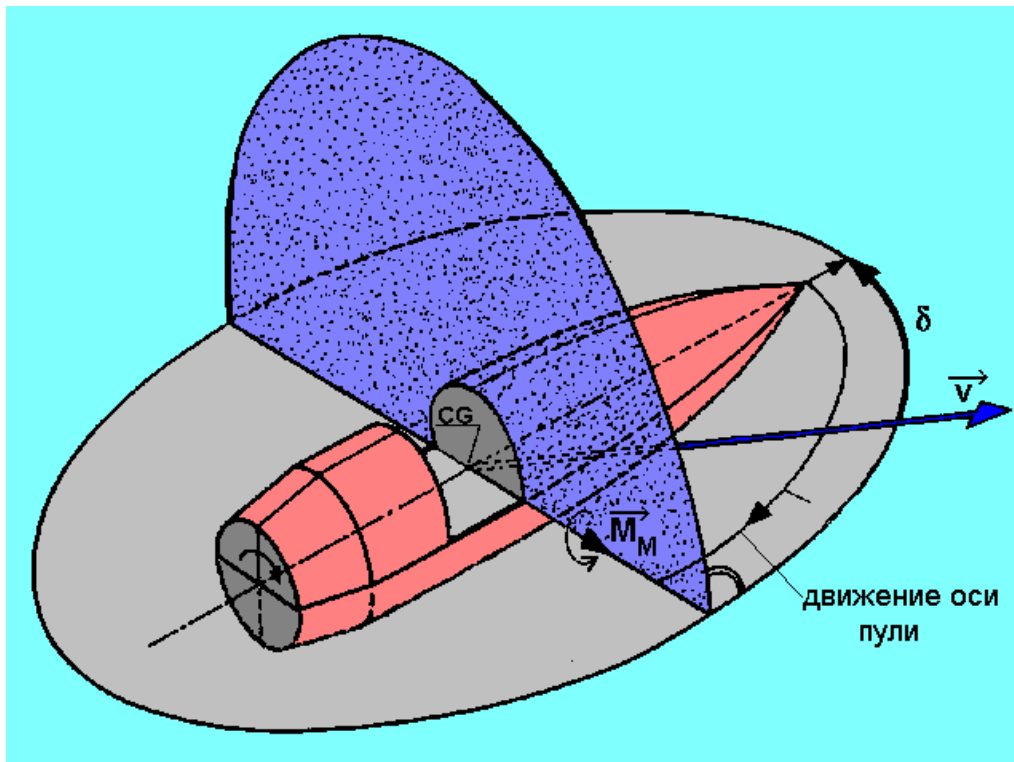
c_{Mp} Коэффициент момента Магнуса; $c_{Mp}(B, Ma, Re, w, d)$

\mathbf{e}_{MM} Единичный вектор

\mathbf{M}_M Момент Магнуса

ОБЪЯСНЕНИЕ:

Так как сила Магнуса прилагается к **СРМ**, который не обязательно совпадает с **CG**, с этой силой возникает момент Магнуса M_M (смотри **рисунок 7**). Расположение центра давления силы Магнуса зависит от поля обдувания и может располагаться как впереди, так и позади **CG**. Как оказывается, момент Магнуса оказывается очень важным для динамической стабилизации пули, стабилизируемых вращением. Для момента Магнуса во внешней баллистике используется данная формула.



Сила Магнуса, приложенная к центру давления СРМ, может быть заменена на силу той же величины и направления, приложенную к **CG**, плюс **моментом Магнуса M_M** . Этот момент пытается развернуть пулю вокруг оси, перпендикулярной продольной оси пули.

Тем не менее, гироскопический эффект, также применимый для момента Магнуса, и ось пули будет смещаться в направлении момента. Таким образом, если условия, приведенные на рисунке, применимы, момент Магнуса будет иметь **стабилизирующее влияние**, и будет **уменьшать** угол рыскания d .

Можно легко показать, что это будет верно лишь тогда, когда центр давления для силы Магнуса СРМ будет располагаться **позади CG**. Сила Магнуса **дестабилизирует** пулю и **увеличивает** угол рыскания, если центр давления располагается **впереди CG**, что может оказаться справедливым для специфического скоростного режима.

Тем не менее, гироскопический эффект также применим и к силе Магнуса. Вспомните, что ввиду гироскопического эффекта носик пули движется в направлении соответствующем моменту. В соответствии с условиями, показанными на рисунке 7, сила Магнуса будет иметь **стабилизирующий эффект**, так как стремится уменьшить угол рыскания, так как ось пули движется в направлении, противоположном углу рыскания.

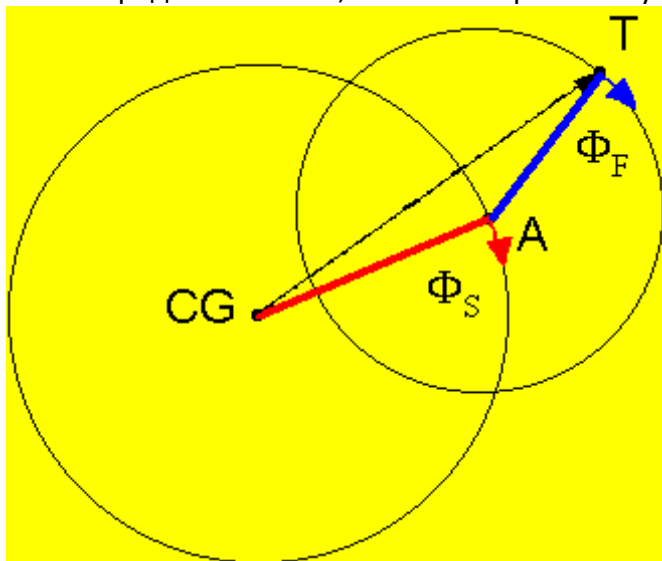
Подобное испытание показывает, что сила Магнуса оказывает **дестабилизирующее** влияние и увеличивает угол рыскания, если ее центр давления располагается **вперед** центра тяжести. Позже это наблюдение будет очень важным, когда мы встретимся с динамически нестабильными пулями, нестабильность которых обусловлена этим эффектом.

8. ДВУХПЛЕЧЕВАЯ МОДЕЛЬ РЫСКАЮЩЕГО ДВИЖЕНИЯ.

Теперь мы закончили обсуждать наиболее важные силы и аэродинамические моменты, влияющие на движение пули, но пока мы не видели, как выглядит результирующее движение пули. В данный момент нас не интересует сама по себе форма траектории (поступательное движение тела), но мы хотим сконцентрироваться на вращении вокруг ЦТ.

Рыскающее движение пули, стабилизируемое вращением, производимое суммой всех аэродинамических моментов, может быть смоделировано в виде суперпозиции **быстрой** и **медленной мод осцилляции**, и наиболее простым образом может быть объяснено и понято посредством **двухплечевой модели** (смотри ссылку [4]).

Представьте себе, что вы смотрите на пулю сзади, как показано на **рисунке 8**.

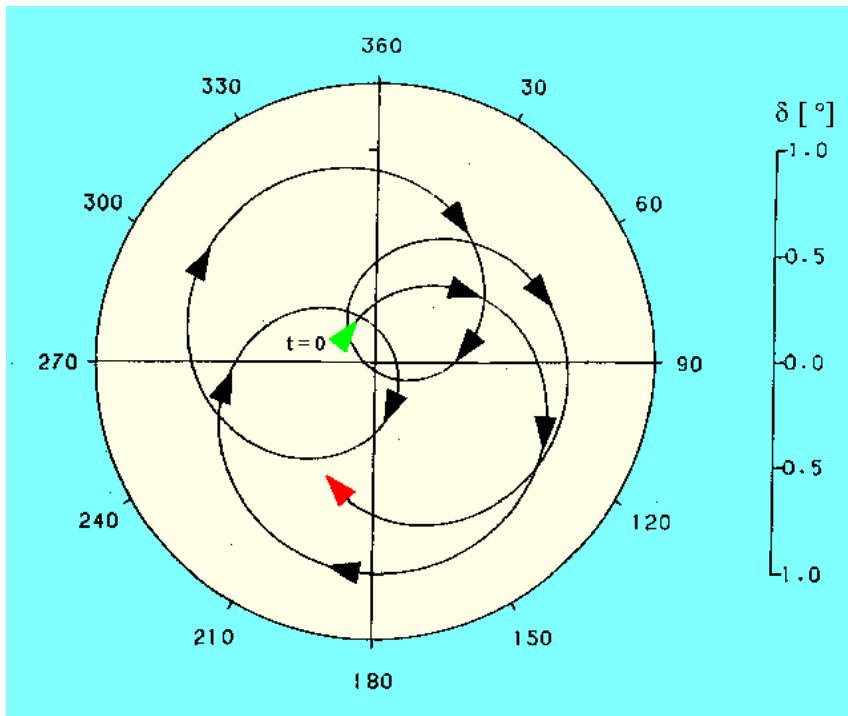


Простая **двухплечевая модель** адекватно описывает рыскающее движение пули, стабилизированной вращением, происходящее от взаимодействия всех аэродинамических моментов.

Рыскающее движение может быть осознано как суперпозиция **быстрой** и **медленной осцилляций**, часто называемых **нутацией** и **прецессией**.

Представьте, что вы смотрите на пулю сзади. **Плечо медленной моды** от CG до A должно иметь точкой вращения CG и вращается с **частотой медленной моды**. Таким образом, A движется по окружности вокруг (**красная окружность**). **Плечо быстрой моды** от A до T, где T – носик пули, должно иметь точкой вращения точку A и вращаться с **частотой быстрой моды**. Таким образом, T вращается по окружности вокруг A. Расстояние от CG до T – это проекция продольной оси пули.

В соответствии с **рисунком 9**, представьте, что вы смотрите на пулю, летящую в сторону глаза наблюдателя. Тогда носик пули движется по спиралевидной (она еще называется **геликоидной**) траектории, как показано на рисунке, в то время, как CG остается закрепленным в центре окружности. Носик пули периодически возвращается назад, перпендикулярно к траектории. Если это происходит, угол рыскания становится минимальным.



Данный рисунок схематически показывает основное угловое движение пули, стабилизированной вращением, вблизи от дульного среза.

Представьте, что CG пули закреплен в центре системы координат, и таким образом, пуля летит в направлении глаза наблюдателя. Тогда ее носик движется по спиралевидной траектории (как показано кривыми линиями) в направлении стрелок. На дульном срезе ($t=0$) угол рыскания может быть маленьким, но возрастет до максимального значения примерно в 1° , уменьшаясь затем снова почти до нуля.

Отметьте, что величина успешных максимальных углов рыскания будет меньше, чем у их предшественников, так как пуля на рисунке предполагается динамически стабильной (максимальный угол рыскания уменьшается по мере того, как пуля продолжает продвигаться вперед).

Эта простая модель адекватно описывает рыскающее движение, если дополнительно принять, что частота быстрой моды превосходит частоту медленной моды, и длины плеч для медленной моды и быстрой моды для динамически стабилизированной пули постоянно укорачиваются.

9. СТАБИЛИЗАЦИЯ

Теперь нам необходимо обсудить условия, которые должны быть выполнены для того, чтобы пуля летела стабильно. Говоря, что пуля летит в стабильном положении, мы в основном подразумеваем, что продольная ось пули стремится принять направление общего движения.

Можно показать, что для стабилизированной пули должны быть выполнены три различных условия:

она должна быть **статически стабильной**,

она должна быть **динамически стабильной**,

она должна быть **податливой**.

9.1. Статическая стабильность

Если присутствует **гироскопический эффект**, и пуля отвечает на ветровую нагрузку смещением ее носика в направлении опрокидывающего момента, тогда говорят, что пуля **статически** (или что то же самое **гироскопически**) стабильна. Если пуля не стабильна статически, к примеру, если она выстрелена из гладкого ствола, опрокидывающий момент заставит пулю **болтаться**. Пуля может стать статически стабильной, если ее существенным образом закрутить.

Статически нестабильные пули для стрелкового оружия очень трудно встретить в «реальной жизни», так как такие снаряды будут просто бесполезны. Тем не менее, если их отстреливать с незначительным закручиванием, «хорошо спроектированные пули» могут быть статически нестабильны.

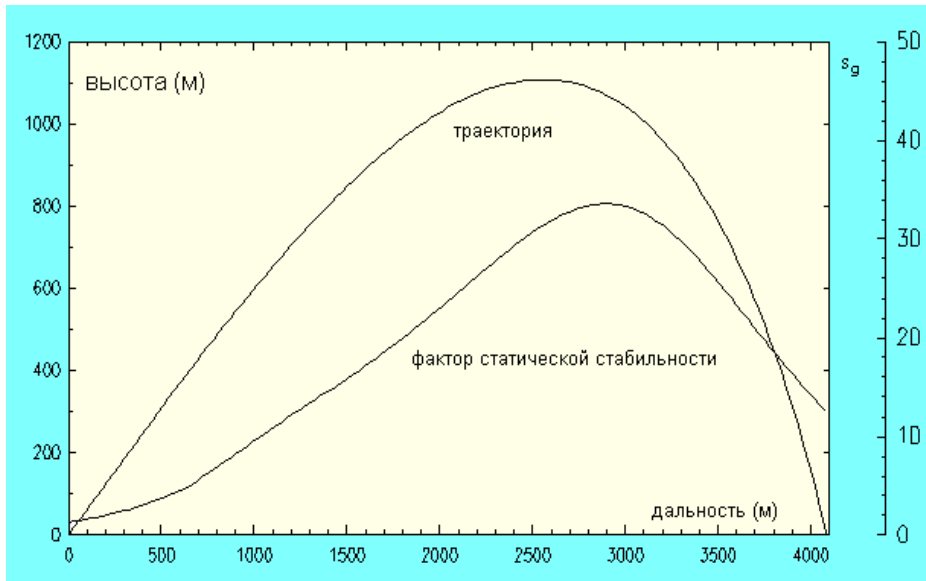
Существует возможность определения **фактора статической стабильности** s_g и выведения условия статической (или гироскопической) стабильности, которое просто показывает превышение этим фактором единичного значения.

$$s_g = \left(\frac{I_x}{I_y} \right) \cdot \left(\frac{\omega \cdot d}{v_w} \right)^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot I_x}{\rho \cdot \pi \cdot d^5 \cdot c_{M\alpha}} \right) > 1$$

где:

$c_{M\alpha}$ Производный коэффициент опрокидывающего момента; сМа(В,Ма)

s_g Фактор гироскопической стабильности



ОБЪЯСНЕНИЕ:

Говорят, что стабилизируемый вращением снаряд **гироскопически стабилен**, если, при наличии угла рыскания d , он отвечает на внешнюю ветровую нагрузку F_1 основным движением нутации и прецессии. В этом случае продольная ось пули движется в направлении, перпендикулярном направлению ветровой нагрузки.

Можно показать путем математических выкладок, что это условие выполняется, если фактор гироскопической стабильности s_g превосходит единицу. Такое состояние называется **условием гироскопической стабильности**. Пулю можно сделать гироскопически стабильной путем ее существенной раскрутки. (при увеличении w !).

Так как частота вращения w уменьшается намного медленнее, чем скорость v_w , фактор гироскопической стабильности s_g , как минимум вблизи от дульного среза, постоянно возрастает. Практический пример показан на **рисунке 10**

Этот рисунок демонстрирует **фактор гироскопической стабильности** для пули М80 калибра 7.62 x 51 НАТО, выстреленных под углом вылета 32° со скоростью 870 м/с из ствола с шагом нарезов в дульной части в 12 дюймов. Пуля М80 демонстрирует статическую стабильность на всем

протяжении траектории полета, так как условие статической стабильности $sg > 1$ сохраняется везде. Величина sg имеет минимальное значение 1.35 на дульном срезе.

В общем можно сказать, что если пуля статически стабильна на дульном срезе, то она будет статически стабильно на всем оставшемся полете. Это можно просто понять из того факта, что фактор статической стабильности пропорционален отношению вращательной и поперечной скоростей пули (смотри формулу). Так как скорость вращения пули затухает намного меньше, чем поперечная скорость (которая затухает вследствие действия силы сопротивления воздуха), фактор статической стабильности возрастает, по крайней мере, на большей части.

Конструктора пуль и винтовок обычно предпочитают $sg > 1.2 \dots 1.5$ на дульном срезе, тем не менее, можно заметить, что многие образцы стрелкового оружия демонстрируют **избыточную** статическую стабильность.

Так, если пуля гироскопически стабильна на дульном срезе, она будет гироскопически стабильна на всем остальном полете. Величина sg также зависит от плотности воздуха ρ и поэтому необходимо уделять большое значение гарантированной гироскопической стабилизации пули в условиях экстремально холодных температур.

Конструктора пуль и оружия обычно предпочитают иметь $sg > 1.2 \dots 1.5$, но также возможно достигать еще большей стабилизации. Это называется **перестабилизацией**.

Фактор гироскопической (также он называется статической) стабильности зависит всего от одного аэродинамического коэффициента (производного коэффициента опрокидывающего момента c_{Ma}) поэтому его определять намного проще, чем фактор динамической стабильности. Это может быть причиной, по которой некоторые публикации по баллистике приводят только статическую стабильность, когда упоминается стабилизация пуль.

Тем не менее, условие гироскопической стабильности является всего лишь **необходимым условием**, гарантирующим стабильный полет, но не самым существенным. Два других условия – условие динамической стабильности и условие податливости также должны быть удовлетворены.

9.2. Динамическая стабильность

Говорят, что пуля динамически стабильна, если угол рыскания, наведенного на дульном срезе, затухает со временем, или, другими словами, угол рыскания уменьшается по мере полета пули. Можно показать, что это будет справедливо, если будет выполнено **условие динамической стабильности**.

$$s_g > \frac{1}{4 \cdot s_d \cdot (1 - s_d)}$$

$$s_d = \left(\frac{c_{L\alpha} - \frac{m \cdot d^2}{I_x} \cdot c_{M_{p\alpha}}}{c_{L\alpha} - c_D + \frac{m \cdot d^2}{I_y} \cdot (c_{mq} + c_{m\dot{\alpha}})} \right)$$

где:

c_D Коэффициент сопротивления воздуха

c_{La} Производная коэффициента подъема

$c_{M_{pa}}$ Производная коэффициента момента Магнуса

$c_{mq} + c_{m\dot{\alpha}}$ Производная момента затухания тангажа

s_g Фактор гироскопической (статической) стабильности

s_d Фактор динамической стабильности

ОБЪЯСНЕНИЕ:

Говорят, что снаряд **динамически стабилен**, если его нутация и прецессия со временем гасятся, что говорит о том, что его угол рыскания, получаемый при вылете за пределы дульного среза (первоначальное рыскание) уменьшается.

Фактор динамической стабильности s_d может быть определен из линеаризованной теории гироскопов (предполагая, что углы рыскания малы) и из приведенного выше **условия динамической стабильности**. Иная трактовка этого условия осуществляется на основании **треугольника стабильности**.

$$\sigma > |2s_d - 1|$$

где:
 s_g Фактор гироскопической стабильности

s_d Фактор динамической стабильности

$$\sigma = \sqrt{1 - \frac{1}{s_g}}$$

ОБЪЯСНЕНИЕ:

Условие динамической стабильности можно привести по-другому, на основании очень показательной интерпретации стабильности пули. Используя числовое значение s , в соответствии с приведенным выше определением, условие динамической стабильности принимает очень простую форму (смотри формулу выше). Это означает, что для того, чтобы пуля была гироскопически и динамически стабильна, график зависимости S от S_d



должен находиться полностью внутри треугольника стабильности (зеленая область на приведенной ниже картинке 11).

Красные области являются зонами гироскопической стабильности, но динамической нестабильности: где либо медленная мода осцилляции (левая область), либо быстрая мода осцилляции (правая область) остаются не погашенными.

s_d , тем не менее, зависит от пяти аэродинамических коэффициентов. Так как эти коэффициенты определить достаточно трудно, расчет фактора динамической стабильности, изменяющегося как функция от моментальной скорости, становится весьма затруднителен.

Если, наоборот, пуля динамически нестабильна, угол рыскания увеличивается.

Появление начального угла рыскания на дульном срезе вовсе не является индикатором нестабильности пули. В некоторых последних публикациях утверждения «пуля не стабилизирована» и «пуля показывает (большой) угол рыскания» используются как синонимы, что неверно. Наоборот, начальный угол рыскания на дульном срезе неизбежен и происходит из-за различных возмущений.

Пули, выстреленные из стрелкового оружия, автоматически не будут динамически стабильны. Пули могут быть динамически нестабильны в момент вылета из ствола. Другие пули динамически стабильны около дульного среза и теряют динамическую стабильность по мере продолжения полета, когда поле обдувания начинает изменяться.

9.3. Податливость

В соответствии с общим определением стабильности, пуля может стать нестабильной, если станет **перестабилизированной**. Перестабилизация означает, что пуля вращается слишком быстро и становится неспособной следовать изгибающейся траектории, так как ее продольная ось стремится сохранить свое положение в пространстве. Этот эффект часто наблюдается при стрельбе под большими углами, но менее интересен при нормальных ситуациях стрельбы.

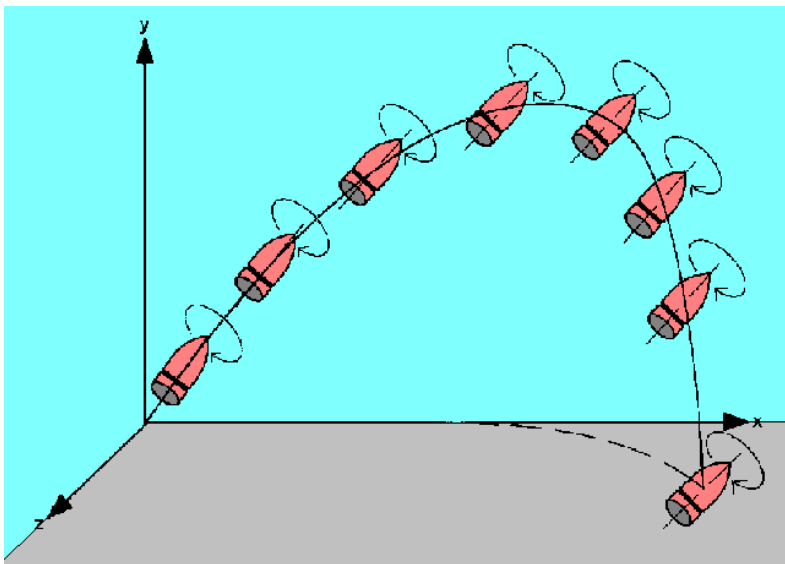


Рисунок 12 схематически показывает перестабилизированную пулю, выпущенную под большим углом возвышения, которая приземляется донцем вперед.

Математически, говорят, что пуля податлива, если выполняется условие податливости.

На этом рисунке схематически показана **перестабилизированная пуля** на крутой траектории.

Перестабилизация пули наиболее вероятна, если пуля имеет **избыточную статическую стабильность** (большую величину s_g и небольшую величину фактора податливости) и выстреливается под большим углом вылета, особенно при стрельбе вертикально вверх. Перестабилизированная пуля на крутой траектории приземляется донцем вперед.

Тем не менее, когда пуля выстреливается из оружия, перестабильзация имеет небольшое значение в нормальных условиях стрельбы, но **должна** приниматься во внимание при стрельбе под большими углами возвышения.

$$f > f_l$$

$$f = \frac{1}{|\delta_p|} = \left(\frac{I_x}{I_y} \right) \left(\frac{\omega \cdot v_w}{4 \cdot g \cdot \cos \Theta} \right) \left(\frac{1}{s_g} \right)$$

где:

f Фактор податливости

f_l Меньший предел фактора податливости; $f_l \gg 5.7$

s_g Фактор гироскопической стабильности

d_p Вектор рыскания покая

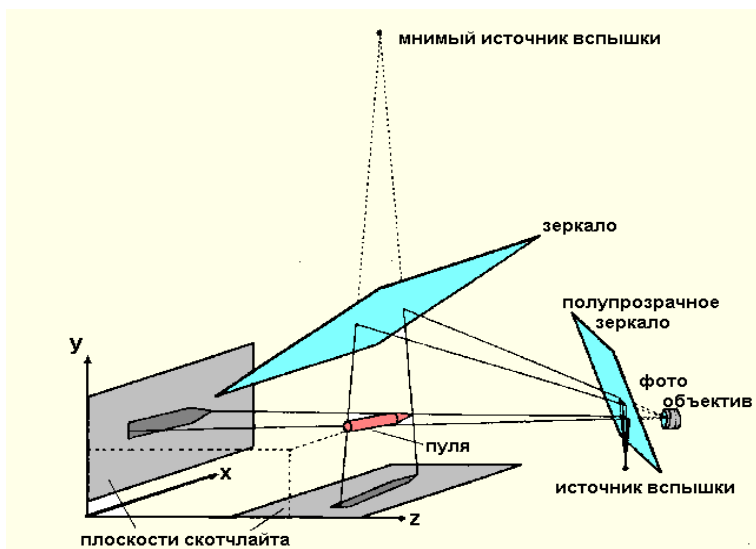
ОБЪЯСНЕНИЕ:

Фактор податливости f характеризует способность продольной оси снаряда следовать изгибающейся траектории (смотри рисунок 12). Величина f может быть просто определена как обратная рысканию покая. Можно показать, что фактор податливости f пропорционален величине, обратной фактору гироскопической стабильности.

10. КОРОТКИЕ ДИСТАНЦИИ

В предыдущей главе были рассмотрены физические процессы движения пули под воздействием сил массы и аэродинамических сил. Оставшаяся часть этого документа будет посвящена экспериментальным наблюдениям за пулями стрелкового оружия, которые, в основном, подтвердят сделанные выводы.

Оборудование для экспериментов



Экспериментальное оборудование, используемое институтами для исследования баллистики пуль при рыскающем движении, показано на **рисунке 13** .

Пуля входит в поле зрения камеры и подсвечивается световой вспышкой малой длительности, которая должна быть сконцентрирована в точке. Посредством оптической системы, состоящей из двух зеркал и двух отражающих пленок Скотчлайта, делаются две теневые фотографии: первая – прямой вид со стороны нахождения камеры, и вторая фотография делается сверху.

Исходя из двух видов пули, находящихся на одной фотопластинке, находятся мгновенные положения продольной оси пули, в частности, может быть определен мгновенный угол рыскания.

Можно установить множество фотографических станций, одну впереди другой, которые позволят определить угол рыскания, угол прецессии и положение ЦТ как функцию от дистанции полета.

На рисунке 13. схематично показана экспериментальная установка, которую можно применить для определения рыскающего движения пули, стабилизированных вращением.

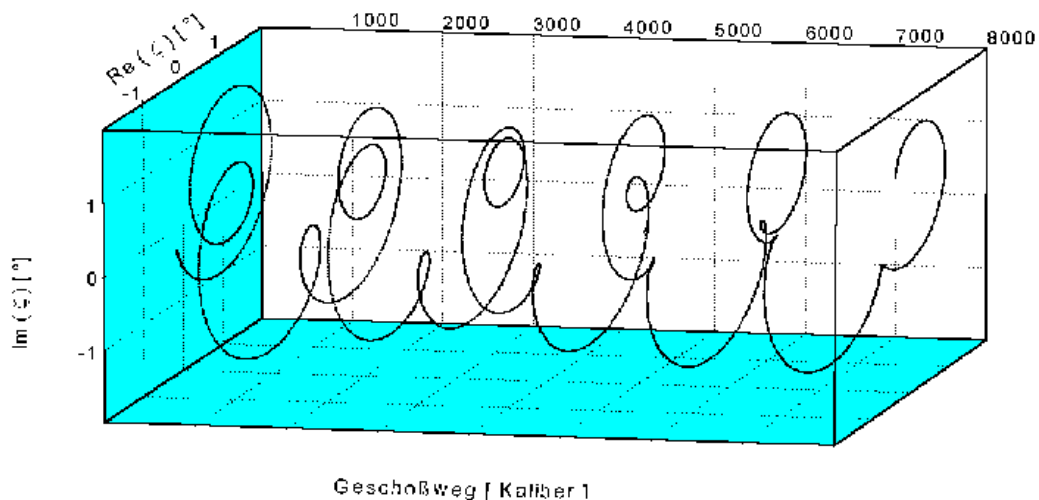
После входа пули в фотографическую станцию, включается световая вспышка короткой длительности (обычно 1 миллионная секунды или менее) в момент прохода пулей светового барьера. Посредством двух зеркал (смотри рисунок) пуля, в один и тот же момент, освещается с двух взаимно перпендикулярных направлений. Камера фокусируется на две теневые фотографии пули, получающиеся на двух плоскостях Скотчлайта. При помощи технических методов, пленка в камере показывает два различных вида пули. Для измерения пространственного угла рыскания, угла прецессии и положения ЦТ пули используется измерение видимого контура пули.

Несколько фотографических станций можно смонтировать одну впереди другой, что позволит изучить угол рыскания как функцию от дистанции стрельбы x .

10.1. Рыскающее движение пули огнестрельного оружия

Используя сложную и трудоемкую технику фотографии, были изучены некоторые марки пули для стрелкового оружия, и результаты этих опытов для некоторых выбранных пули приведены ниже.

Стабильные пули.



На рисунке 14 показана траектория, которую оставляет в пространстве носик пули **M193 (калибра 5.56 x 45)** с момента вылета пули из ствола до пролета ею дальности в 8000 калибров, что соответствует дальности примерно 150 футов (45 м). Если представить, что ЦТ движется по прямой линии, расположенной в центре коробки, то кривая линия будет показывать положение носика пули в пространстве по мере ее прохождения слоя воздуха.

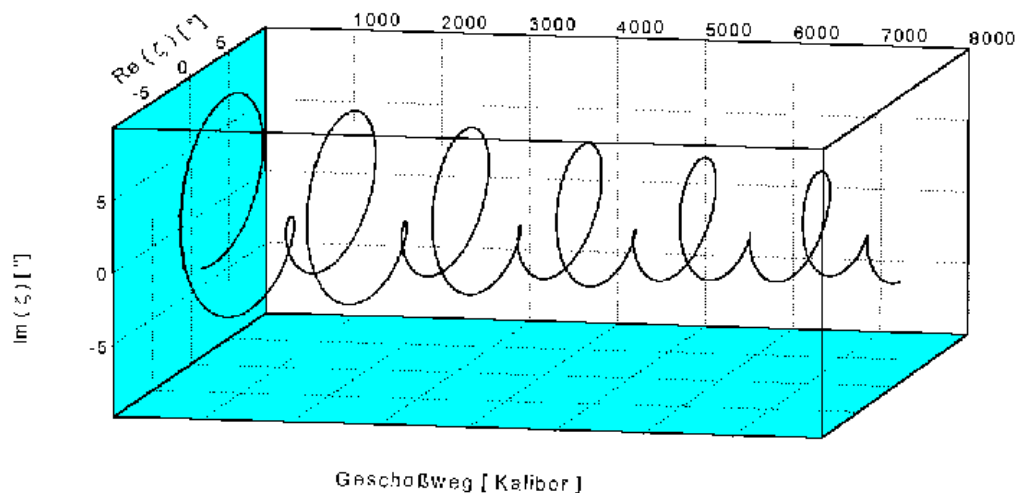
Также можно оценить примерную величину максимального угла рыскания, который не превосходит двух градусов для данного примера. Хотя рисунок и не показывает это очень четко, рыскающее движение пули M193 является незатухающим. Тем не менее, другие эксперименты показывали, что пуля M193 может показывать небольшое затухание.

Представьте себе, что CG пули движется по прямой линии

в центре коробки. Тогда спиралевидная кривая показывает пространственное движение носика пули по дальности, выраженной в калибрах (0...8000 калибров). В данном примере пуля М193 демонстрирует небольшую прецессионную нестабильность.

Пуля		Дульные величины		Угол рыскания	
Масса	3.58 г	Скорость	964.1 м/с	Максимум	< 2°
Диаметр	5.68 мм	Фактор статической стабильности	1.38	Динамически стабильна	нет

Следующий пример (смотри **рисунок 15**) показывает рыскающее движение **бронебойной пули с твердым сердечником** того же самого калибра (5.56 x 45). В этот раз, несомненно, рыскающее движение пули затухает, или другими словами, снаряд динамически стабилен. Тем не менее, вблизи дульного среза можно наблюдать максимальный угол рыскания величиной более пяти градусов.



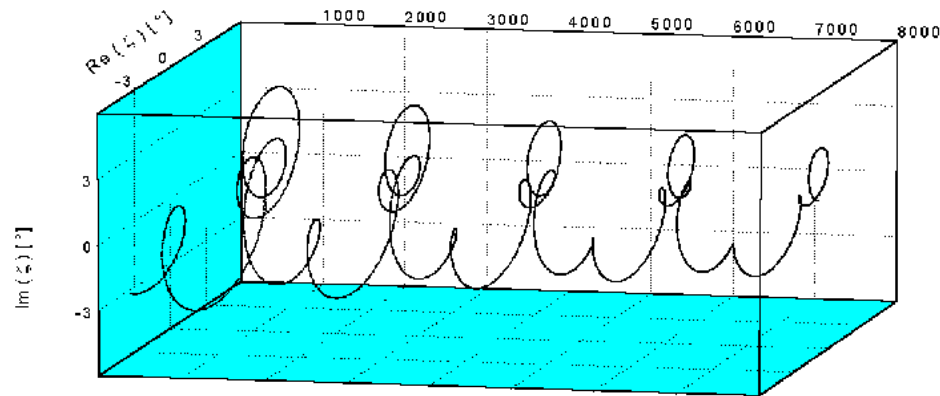
Дальность между двумя успешными экстремумами рыскания составляет около семи метров.

Пуля		Дульные величины		Угол рыскания	
Масса	3.9 г	Скорость	1015 м/с	Максимум	< 6°
Диаметр	5.56 мм	Фактор статической стабильности	1.13	Динамически стабильна	да

На следующем **рисунке 16** показано рыскающее движение **Русской пули образца 1974 года**.

Можно наблюдать максимальные углы рыскания более трех градусов вблизи дульного среза. Опять же, рыскающее движение затухает, но становится более сложным. Необходимо большое упорство, чтобы повторить траекторию полета носика пули.

Плечо быстрой моды затухает наполовину по пролету дистанции в 30 метров, в то время, как медленной моде требуется вдвое большая дистанция для затухания наполовину



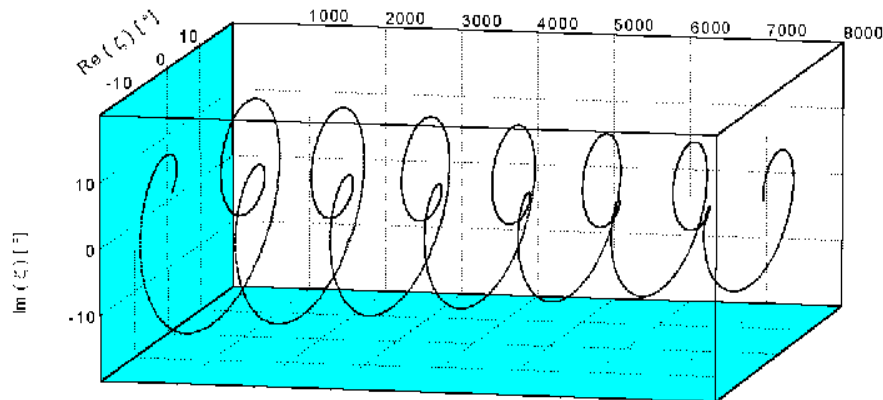
Geschoßweg [Kaliber]

Пуля		Дульные величины		Угол рыскания	
Масса	3.44 г	Скорость	917 м/с	Максимум	< 4°
Диаметр	5.64 мм	Фактор статической стабильности	1.56	Динамически стабильна	да

Наше изучение военных пуль будет завершено изучением пуль калибра **7.62 x 51 НАТО**.

Следующий **рисунок 17** демонстрирует поведение бронебойной пули с твердым сердечником, и он демонстрирует очень симметричную и хорошо прослеживаемую траекторию. Тем не менее, в данном примере можно наблюдать углы рыскания более десяти градусов.

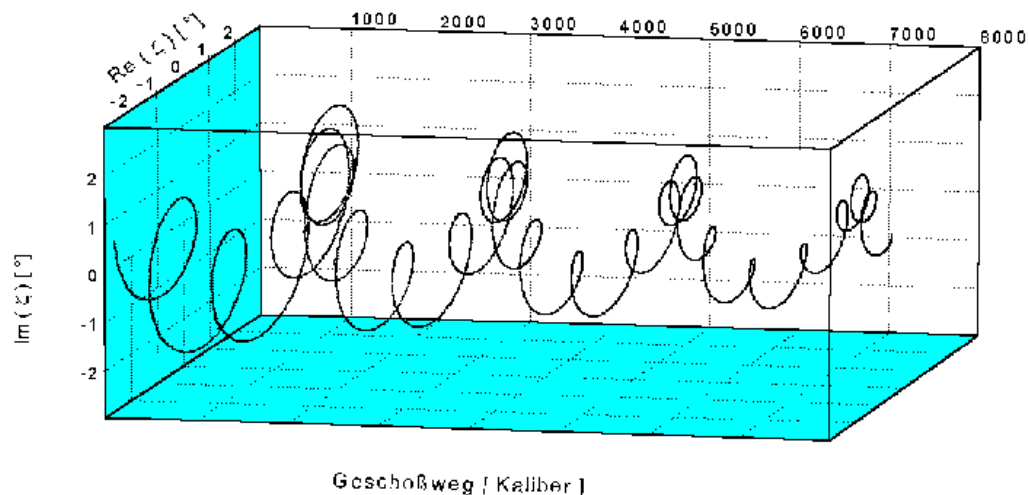
Период рыскания, пространственная дальность между двумя успешными экстремумами рыскания, составляет примерно восемь метров.



Geschoßweg [Kaliber]

Пуля		Дульные величины		Угол рыскания	
Масса	9.8 г	Скорость	784 м/с	Максимум	< 13°
Диаметр	7.82 мм	Фактор статической стабильности	1.17	Динамически стабильна	да

Последний пример (смотри **рисунок 18**) относится к стандартной пуле **M80 (7.62 x 51 НАТО)**. Очевидно, рыскающее движение стало очень сложным и траекторию носика пули проследить очень непросто, хотя она все еще демонстрирует симметричную и воспроизводимую структуру.



До сих пор мы имели дело только с хорошими пулями. Все они имели существенную статическую стабильность с фактором статической стабильности на дульном срезе находящемся в пределах от 1,1 до 2. Почти во всех случаях рыскающее движение угасает, что свидетельствует о том, что пули были также динамически стабильны.

Этот вывод не удивителен. Все эти пули были сконструированы для военного применения и для ведения войн. **Множество инженеров и ученых в баллистических исследовательских институтах были заняты оптимизацией этих боеприпасов.** Каждая из этих пуль, возможно, прошла

множество баллистических улучшений и усовершенствований, основанных на стрелковых экспериментах и тестах в аэродинамических трубах. Таким образом, было бы более чем удивительно найти какие-либо плохие внешнебаллистические свойства у этих пуль.

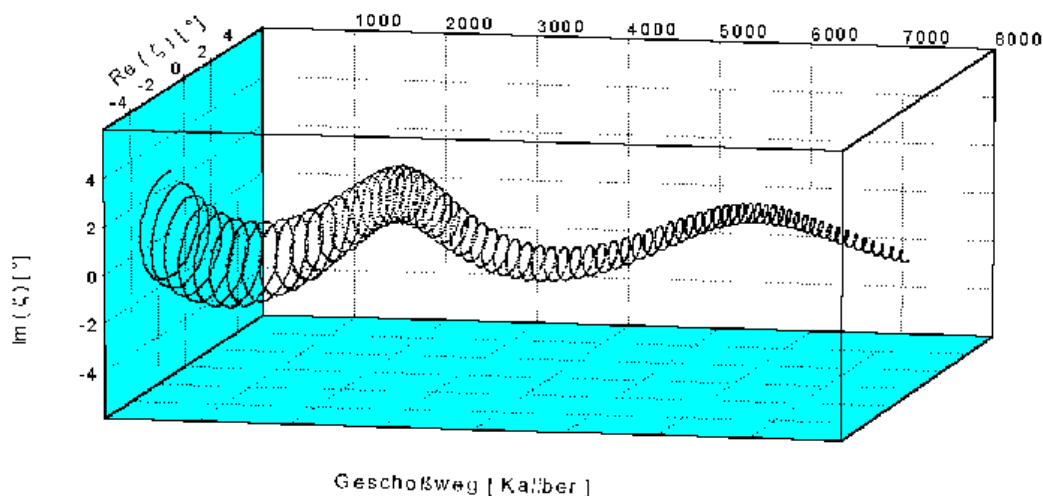
Пуля		Дульные величины		Угол рыскания	
Масса	9.5 г	Скорость	877 м/с	Максимум	< 2°
Диаметр	7.82 мм	Фактор статической стабильности	2.061	Динамически стабильна	да

10.2. Перестабелизированные пули

Можно задать вопрос, будут ли пули, выстреливаемые из пистолетов и револьверов показывать такое же поведение, что и хорошо спроектированные военные пули.

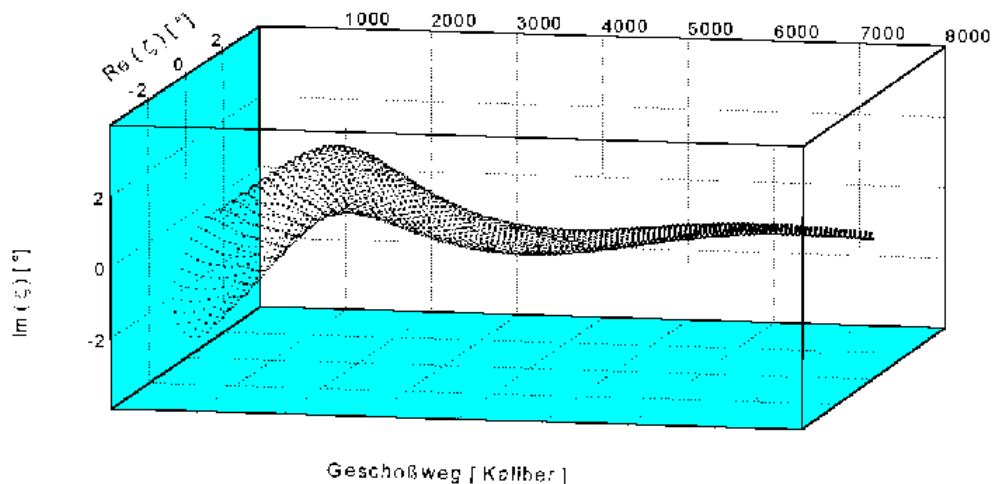
На следующем **рисунке 19** показано изучение пули калибра **.357 магнум KTW**, выстреленной из револьвера Кольта на максимальную

дальность стрельбы примерно в 240 футов (70 м). Траектория носика пули, показанная на рисунке, характеризует перестабелизированную пулю. Пуля получила слишком сильное вращательное движение. Частота быстрой моды осцилляции, также называемая частотой нутации, очень велика (более 100 оборотов в секунду) и пуля ведет себя очень нервно. Очевидно, что рыскающее движение затухает, так как максимальный угол рыскания непрерывно уменьшается с полупериодом затухания для быстрой моды осцилляции в 22 метра.



Пуля		Дульные величины		Угол рыскания	
Масса	7.3 г	Скорость	506 м/с	Максимум	< 3°
Диаметр	9 мм	Фактор статической стабильности	6.7	Динамически стабильна	да

Второй пример представлен на следующем **рисунке 20**. Оболочечная пуля с круглым носиком калибра **9мм Люгер FMJ RN** демонстрирует сходное поведение. Расчеты показывают, что пуля имеет фактор статической стабильности на дульном срезе 22.5. Это слишком большое значение по сравнению с достаточной величиной. Пуля показывает очень хорошее затухание. После пролета дистанции примерно 6000 калибров (170 футов = 50 м), максимальное рыскание затухает почти до нуля.



Общим наблюдением, которое может быть сделано, является то, что многие пули, выстреленные из пистолетов и револьверов являются перестабилизованными. Тем не менее, открытым остается вопрос, будет ли избыточное вращение, вроде наблюдавшегося на двух последних примерах, приводить к каким-либо баллистическим недостаткам.

Если рассматривать только короткие дистанции, скажем, до нескольких тысяч калибров, которые, в основном, являются дальностями, на которых используются револьверы и пистолеты, избыточное вращение не будет влиять на кучность. Тем не менее, при выстрелах под большими углами возвышения, продольная ось пули может не последовать изогнутой форме траектории, стремясь сохранить свою ориентацию в пространстве, и как следствие, пуля может упасть донцем вперед.

Пуля		Дульные величины		Угол рыскания	
Масса	8.0 г	Скорость	373 м/с	Максимум	< 2°
Диаметр	8.97 мм	Фактор статической стабильности	22.5	Динамически стабильна	да

11. ДАЛЬНИЕ ДИСТАНЦИИ

До настоящего момента мы рассматривали пули близких от дульного среза дистанциях. Мы встретились с хорошо спроектированными военными снарядами и перестабилизованными пистолетными и револьверными пулями, но все они демонстрировали динамическую стабильность. Другими словами, максимальный угол рыскания, который возникал вблизи дульного среза, гасился по мере движения пули вперед. После пролета дистанции в несколько тысяч калибров, в зависимости от скорости гашения, мгновенный угол рыскания практически сводился к нулю.

Рыскание покая

Теперь представим стабильную пулю, пролетевшую существенно большую дистанцию. Если мгновенное рыскание динамически стабильного стабилизируемого вращением снаряда было погашено, означает ли это, что продольная ось точно совпадает с направлением движения ЦТ.

Из математических зависимостей можно узнать, что продольная ось пули и направление скорости ЦТ отклоняются на небольшой угол, который называется уравнивающим рысканием или **рысканием покая**.

$$\delta_p = - \frac{8 \cdot I_x \cdot \omega}{\pi \cdot \rho \cdot d^3 \cdot c_{M\alpha} \cdot v_w^4} \cdot \left(\mathbf{v}_w \times \frac{d\mathbf{v}_w}{dt} \right)$$

где:

$c_{M\alpha}$ Фактор податливости

d_p Вектор рыскания покая

ОБЪЯСНЕНИЕ:

Равновесный угол рыскания (или **рыскание покая**, также называемое **равновесным рысканием**) – это угол, на который отклоняется мгновенная ось прецессии от направления полета (смотри **рисунок 21**). В результате влияния этого маленького наклона, возникает постоянный воздушный поток, который стремится отклонить пулю вправо. Таким образом, возникновение рыскания покая является причиной, по которой пуля

отклоняется вправо (для правосторонних нарезов) или влево (для левосторонних нарезов).

Поскольку мгновенное рыскание, получаемое на дульном срезе, у стабильной пули гасится, угол d становится равным рысканию покая.

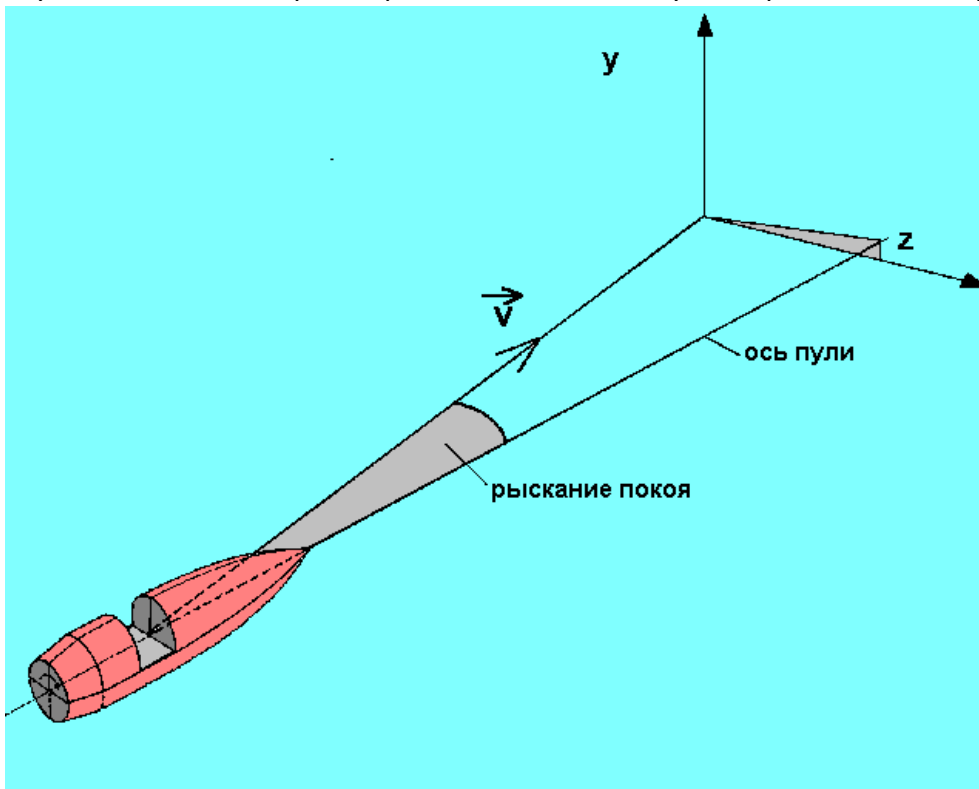
Величина угла рыскания покая обычно составляет лишь доли градуса около дульного среза, но может достигать существенных значений в верхней точке траектории, особенно для больших углов вылета.

Возникновение рыскания покая ответственно за боковой снос стабилизируемых вращением снарядов даже при отсутствии ветра. Зависящий от вращения боковой снос также называется **деривацией**.

Также можно показать, что для правостороннего вращения рыскание покая лежит справа от траектории. Таким образом, носик пули описывает розочку со средним смещением вправо, что приводит к боковому сносу вправо.

Приведенная выше формула для вектора рыскания покая является аппроксимацией на основе стабильности полета пули.

Для пули с правосторонним вращением ось симметрии пули в основном направлена вправо и немного вверх по отношению к

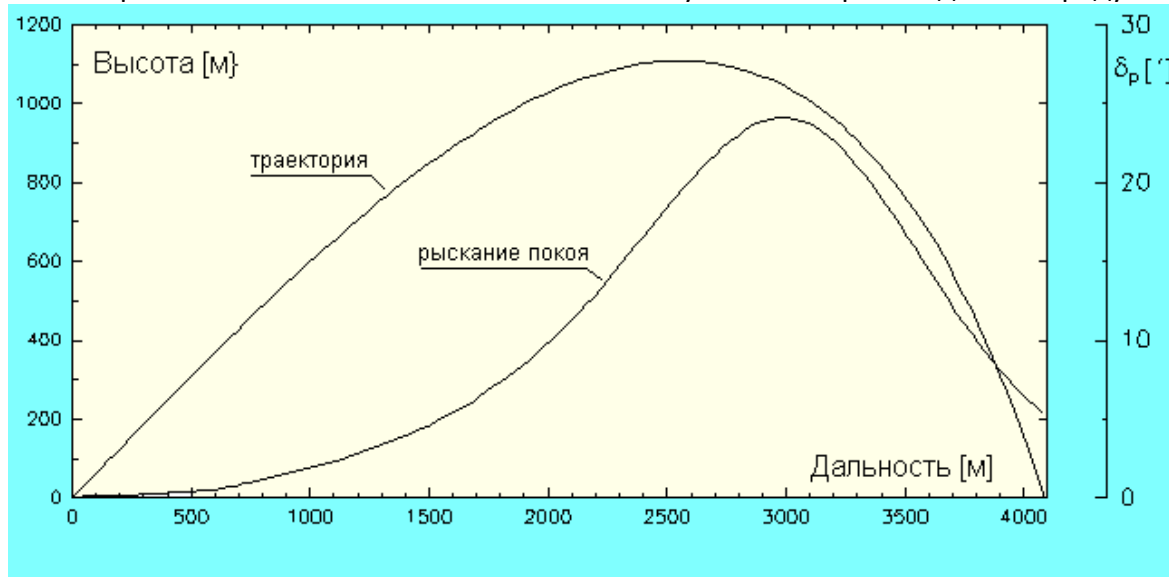


направлению вектора скорости – указывающего направление, в котором движется ЦТ – так как показано на **рисунке 21**

Если пуля летит стабильно (гироскопически и динамически!) и случайное рыскание погашено, обычно после пролета дистанции в несколько тысяч калибров, ось симметрии пули и перпендикуляр к траектории расходятся на небольшой угол, и тогда говорят о наличии рыскания покоя .

Для пуль, выстреленных из стволов с правосторонними нарезами, продольная ось смещается вправо и немного вверх по отношению к направлению полета, приводя к боковому сносу вправо. Рыскание покоя, хотя оно обычно измеряется лишь долями градуса, является причиной сноса пуль, стабилизируемых вращением.

Обычно рыскание покоя имеет очень маленький угол и измеряется долями градуса. **Рисунок 22**



показывает изменения угла рыскания покоя вдоль траектории пули **M80 калибра 7.62 x 51 НАТО**, выстреленной под углом **32°**. Хотя в данном примере рыскание покоя никогда не превышает половины градуса, результирующий боковой снос в точке падения составляет почти 100 ярдов.

12. АНОМАЛИИ

Все приведенные до этого момента примеры могут привести к заключению о том, что в реальности нестабильности **не** возникают, и многие теоретические аспекты, о которых говорилось в начале этого документа, не имеют практической важности.

Оставшаяся часть этой статьи посвящена **аномалиям** – или более правильно это можно назвать – **непредсказуемому поведению пуль**, с которым может столкнуться стрелок.

12.1. Статически нестабильная пуля

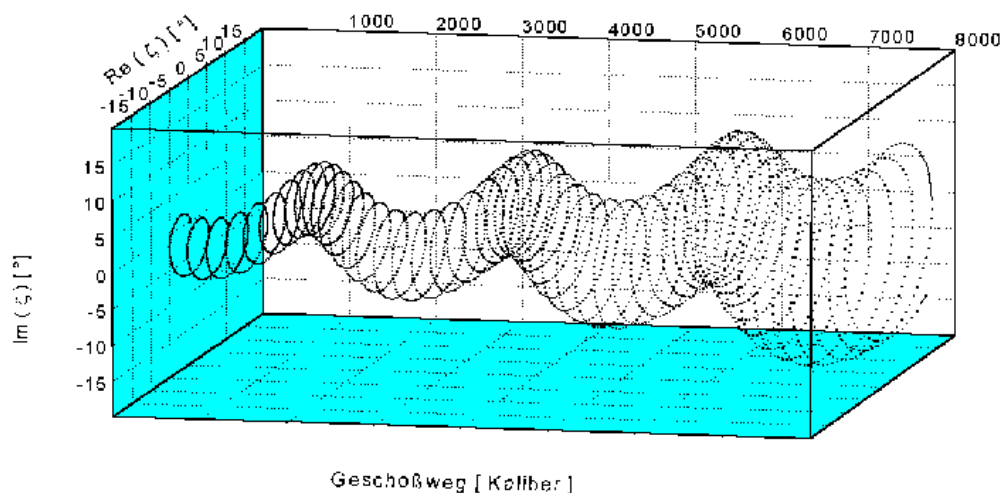
Как уже говорилось, о статической нестабильности обычно беспокоиться не приходится, если иметь дело с хорошо сконструированной пулей, выстреленной из стрелкового оружия. Тем не менее, результаты экспериментальных исследований Джилза и Лиминга (смотри **Вывод**) для пули 7.62 x 51 НАТО, выстреленных из гладкого ствола, могут быть расширены, как минимум, в некоторой степени, до послерикошетного полета нестабилизированных снарядов.

В своих экспериментах Джилз и Лиминг определили «отсутствие признаков чистого опрокидывания с одного конца на другой» и то, что такие неврещающиеся пули НАТО летели «примерно широкой стороной вперед» и «просто колебались по сторонам в направлении запуска, а затем быстро затухали в уравновешенном положении при большом угле рыскания». Авторам даже удалось оценить стационарный угол рыскания теоретическим путем, применив **аналогию поперечного потока**, и определить, что статически нестабильная пуля НАТО летит **донцем вперед** при стационарном угле рыскания примерно в 127° .

12.2. Динамически нестабильная пуля

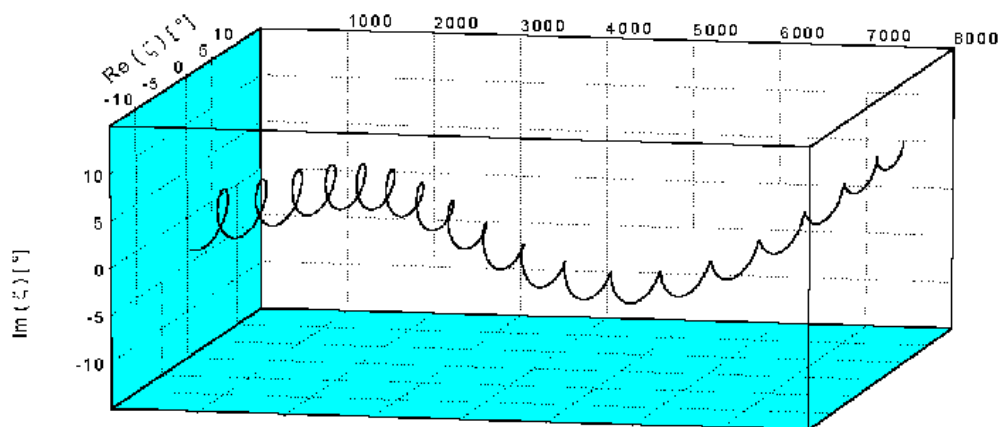
Вблизи от дульного среза

На **рисунке 23** показано рыскающее движение пули **Wadcutter** калибра **.38 Special**, выстреленной из револьвера. Пуля статически стабильна, фактор статической стабильности, больший четырех, говорит о том, что пуля закручена слишком сильно. Очевидно, что пуля динамически нестабильна. Осцилляция на медленной моде постоянно возрастает. Максимальный угол рыскания увеличивается примерно в три раза от значения в пять градусов на дульном срезе до 15° после прохождения дистанции в 8000 калибров (240 футов = 73 м).



Пуля		Дульные величины		Угол рыскания	
Масса	?	Скорость	187 м/с	Максимальный	5°..15°
Диаметр	9 мм	Фактор статической стабильности	4.25	Динамически стабильна	нет

Подобный вывод, за исключением величины угла рыскания, можно сделать для пули калибра .32 ACP FMJ RN (7.65 мм Браунинг), выстреленной из пистолета. Это показано на **рисунке 24**.



Дистанция в калибрах

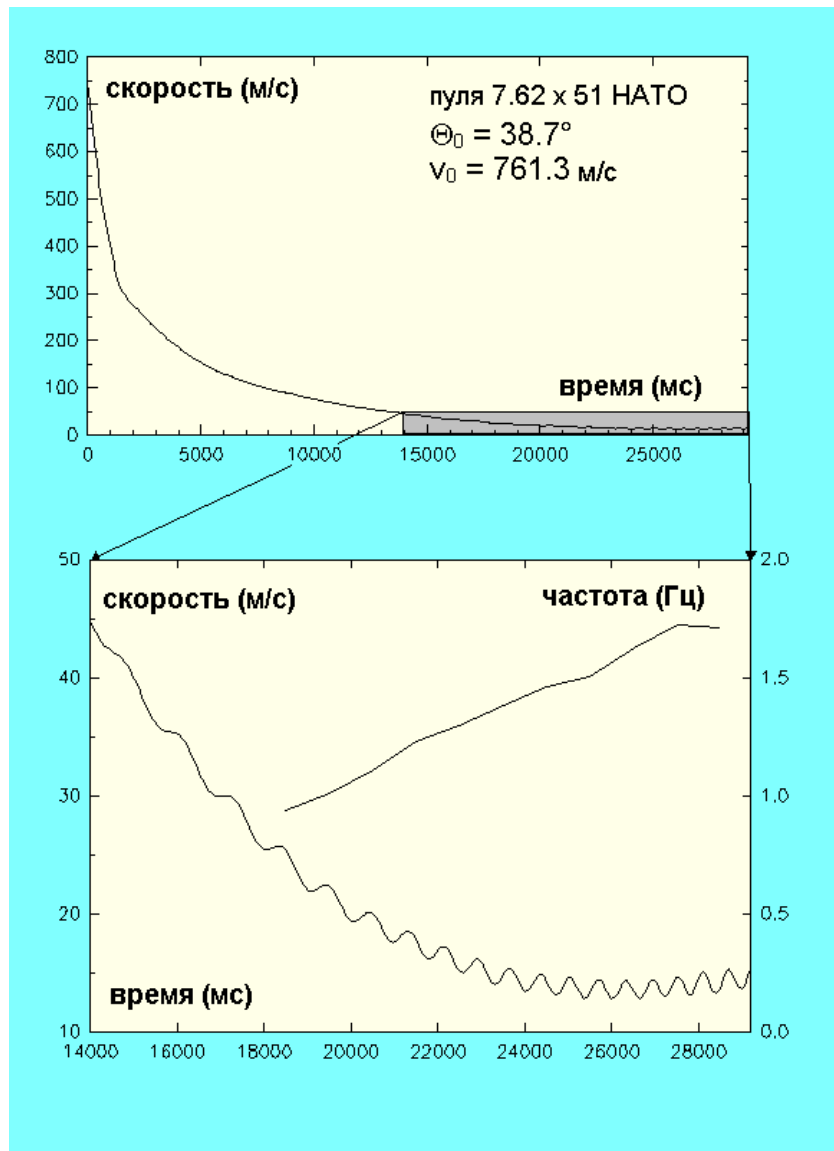
Возникает вопрос, в каких случаях эти нестабильности имеют существенный практический эффект. Если говорить о коротких дистанциях до нескольких тысяч калибров, динамическую нестабильность пули определить трудно, если, конечно, не применять очень сложную технику измерений. Если пуля сильно превышает эту дальность, угол рыскания достигает существенных значений, сопротивление возрастает и кучность падает. Скорее всего, вариации от выстрела к выстрелу будут ненормальными, а траектории станут непредсказуемыми.

Пуля		Дульные величины		Угол рыскания	
Масса	4.7 г	Скорость	262 м/с	Максимум возр.	3°..7°
Диаметр	7.84 мм	Фактор статической стабильности	4.2	Динамически стабильна	нет

12.3. На дальних дистанциях

В конце концов, мы изучим пулю, которая стабильна около дульного среза, но теряет динамическую стабильность после пролета существенного расстояния.

Две иллюстрации на **рисунке 25** показывают зависимость скорости от времени для стандартной пули калибра **7.62 x 51 НАТО**, выстреленной под углом почти в 40° . Это измерение было сделано при помощи Доплеровской системы сопровождения для больших дальностей, которая способна следовать изогнутой траектории от дульного среза до места попадания (смотри благодарности).



Измерение скорости Доплеровским радаром для стандартной пули НАТО калибра 7.62 x 51, выстреленной под углом 38.7° демонстрирует быструю потерю скорости вблизи дульного среза, но осциллирующую природу скорости для полетного времени, превышающего 14 секунд.

Считается, что такая осцилляция скорости с частотой 1.0...1.6 Гц может быть объяснена **прецессионной нестабильностью**, приводящей к **конусообразному движению пули**.

С первого взгляда все выглядит нормально. Скорость пули существенно уменьшается вблизи дульного среза, и после общего времени полета примерно в 30 секунд, пуля падает на дальности более 2,5 километров.

Более пристальное изучение кривой зависимости скорости от времени, начиная с 14 секунд полета, четко демонстрирует осциллирующее поведение.

Увеличенный сектор кривой зависимости скорости от времени показан на нижней иллюстрации рисунка 25.

Расчеты показывают, что частота колебания скорости возрастает от примерно одного оборота в секунду на 20 секундах полетного времени до почти двух оборотов в секунду на 28 секундах.

Нет никаких сомнений в том, что измерения при помощи Доплеровского радара не являются ошибочными. С другой стороны, мы столкнулись не с аэродинамической силой, которая может быть ответственна за ускорение или замедление пули и вызывать осцилляции скорости.

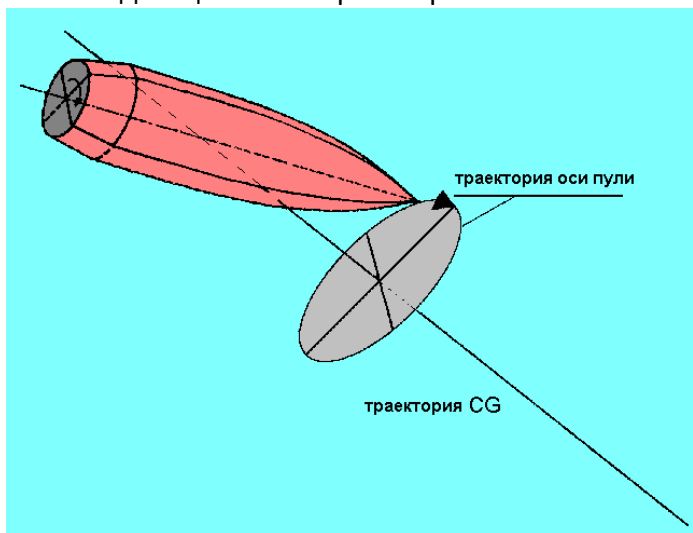
Это экспериментальное наблюдение можно объяснить **динамической нестабильностью** пули 7.62 x 51 НАТО на **низких скоростях**.

Из предыдущих рисунков мы узнали, что пуля калибра 7.62 x 51 НАТО статически и динамически стабильна вблизи дульного среза. Таким образом, рыскающее движение будет затухать, и после пролета определенной дистанции рыскание, за исключением небольшого рыскания покоя (деривации), практически окажется нулевым.

Когда скорость пули существенно снизится, и она начнет лететь на дозвуковой скорости, спектр обтекания сильно изменится. Это было подтверждено экспериментальными исследованиями BRL (смотри **Выводы**), и одним из последствий изменения спектра обтекания станет смещение центра давления для силы Магнуса. Для сверхзвуковой скорости эта точка располагается **позади** ЦТ, но перемещается **вперед** ЦТ на дозвуковых скоростях. Как было показано ранее (смотри **рисунок 7**), **момент Магнуса** становится **сильным дестабилизирующим моментом**, и как следствие, пуля становится динамически нестабильной.

Осцилляция на низких частотах, также называемая прецессией, больше не будет угасать и начинает медленно усиливаться. Тем не менее, пуля все еще имеет повышенную статическую стабильность, и, таким образом, гироскопический эффект продолжает иметь место.

В конце концов, продольная ось пули смещается к поверхности конуса, в то время, как траектория является осью конуса. Так как эта осцилляция незатухающая, угол открытия конуса постоянно возрастает. Рисунок 26 схематически показывает конусообразное движение пули НАТО на ниспадающей ветви траектории.



На **рисунке 26** схематически показана **статически стабильная, но динамически нестабильная** пуля калибра 7.62 x 51 НАТО на ниспадающей ветви траектории большой дальности.

Динамическая нестабильность, или в данном случае более точно прецессионная нестабильность, происходит из-за изменения в поле обтекания воздухом по мере замедления пули. Момент Магнуса превращается в дестабилизирующий момент, и медленная мода осцилляции становится недемпфируемой.

Комбинация статической стабильности – пуля имеет даже избыточную статическую стабильность и отвечает на воздействие ветровой нагрузки смещением носика в направлении опрокидывающего момента – и **недемпфируемой** (возрастающей) **медленной моды осцилляции**, приводит к показанному **конусообразному движению**.

Имея это в виду, можно просто объяснить результаты экспериментов по измерению скорости Доплеровским радаром. Необходимо помнить, что техника использования доплеровского радара позволяет измерять только **радиальную скорость** объекта в луче радара. То есть Доплеровский анализатор определяет только компоненты скорости, которые либо **приближаются**, либо **удаляются** от антенны.

Для пули на ниспадающей ветви траектории, если описывать конусообразное движение, скорость тела, ось которого удаляется от антенны, добавляется к радиальной скорости ЦТ. С другой стороны, скорость тела, ось которого приближается к антенне, вычитается из радиальной скорости ЦТ. Это объясняет осциллирующую природу измеренного Доплеровского сигнала. Это приводит к суперпозиции радиальной скорости ЦТ и медленной моды осцилляции продольной оси пули. Это схематично показано на **рисунке 27**.

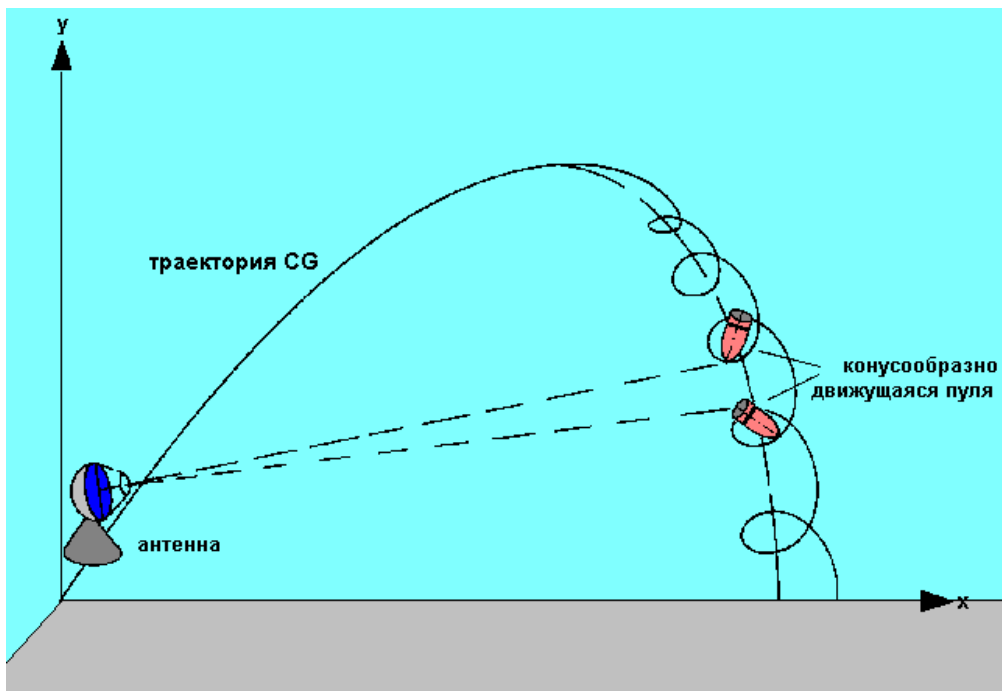


Рисунок 27 качественно объясняет результаты измерения скорости Доплеровским радаром для пули калибра **7.62 x 51 НАТО** при ее конусообразном движении на ниспадающей ветви траектории.

Пока конусообразно движущаяся пуля движется носиком в сторону антенны, компонент скорости вычитается из радиальной скорости ее ЦТ (антенна «видит» приближающуюся ось пули плюс удаляющийся ЦТ) и когда носик пули удаляется от антенны, компонент скорости добавляется к радиальной скорости пули (антенна «видит» удаляющуюся ось пули плюс удаляющийся ЦТ).

Таким образом, осциллирующая природа измеренной скорости (смотри рисунок 25) происходит из-за **суперпозиции** конусообразного движения продольной оси пули и расположения ЦТ на траектории.

Наиболее поразительным фактом является то, что антенна определяет все это для такой крошечной пули, летящей на большом удалении, превышающем два километра.

Очевидно, что динамическая нестабильность пули НАТО оказывает заметное влияние на ее траекторию. По мере увеличения рыскания, скорость пули еще больше уменьшается, и дальность падает. Было отмечено, что для изучаемой партии пуль НАТО нестабильности были не воспроизводимы, и дальности, таким образом, даже при стрельбе на практически одинаковых дульных скоростях и при практически одинаковых углах вылета отличались существенно, по случайному закону.

Стоит еще отметить, что расчеты внешней баллистики (смотри **Выводы**), основанные как на **модели точечной массы**, так и на **модифицированной модели точечной массы** не способны точно предсказать траекторию такой нестабильной пули.

13. ВЫВОДЫ

Пули, выстреленные из стрелкового оружия, следуют общим правилам физики и ведут себя, как гироскопы. Угловое движение этих пуль может быть представлено в виде двух осцилляций, которые проще всего можно показать на двухплечевой модели.

Практически все пули для стрелкового оружия являются статически стабильными, многие пистолетные и револьверные пули даже имеют избыточную статическую стабильность.

Тем не менее, динамическая стабильность не является автоматически гарантированной. Некоторые пули динамически нестабильны в момент вылета из канала ствола, другие могут терять динамическую стабильность во время полета после того как подвергаются замедлению.

До настоящего времени не существует иного удобного метода, кроме эксперимента, с помощью которого можно предсказать динамическую нестабильность пули, особенно на дальних дистанциях. Некоторые очень сложные компьютеризованные процедуры (численные решения формул Навье-Стокса) для решения этих проблем только разрабатываются исследователями-баллистами.

14. ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

Мне бы хотелось поблагодарить профессора, доктора J.G. Nauck, из Дрездена, за рецензирование и его очень полезные советы по улучшению этого документа.

Экспериментальные измерения и расчеты рыскающего движения различных стабилизируемых вращением пуль стрелкового оружия были проведены испытательным полигоном Германской армии WTD91 в Меппене. Я бы хотел поблагодарить эту организацию за предоставление мне отчетов, содержащих эти уникальные и крайне полезные результаты.

Траекторные измерения на больших дальностях при помощи Доплеровского радара для пуль калибра 7.62 x 51 НАТО стали возможными для меня благодаря WEIBEL equipment, Gentofte, Denmark.

Я бы хотел также поблагодарить всех читателей этой статьи за их советы и поддержку.

15. ССЫЛКИ

- [1] Nennstiel, R., AFTE Training Seminar, 5.6.-9.6.1995, San Diego, CA USA.
- [2] Nennstiel, R., "How do bullets fly?", AFTE Journal, Vol.28, No.2, April 1996, S.104-143.
- [3] Nennstiel, R., "EBV4 User's Manual", Exterior Ballistics for the PC, Wiesbaden, Germany, 1995.
- [4] Farrar, C.L., Leeming, D.W., Military Ballistics - A Basic Manual, Brassey's Publisher Limited, Headington Hill Hall, Oxford OX3 0BW, England, 1983.
- [5] Giles M.J., Leeming D.W., "An Aerodynamic Model for Unstable Projectiles", Proc. of the 11th Int. Symp. on Ballistics, Brussels, May 9 - May 11, 1989.
- [6] Piddington, M.J., "Aerodynamic Characteristics of the 7.62 mm Nato Ammunition", BRL MR 1833, Aberdeen Proving Ground, Maryland, USA, 1967.
- [7] McCoy, R., Modern Exterior Ballistics, The Launch and Flight Dynamics of Symmetric Projectiles, USA.