



В ПОИСКАХ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ТОЧНОСТИ

Над причинами, вызывающими рассеивание пуль от выстрела к выстрелу, я начал задумываться после того, как всерьёз занялся снаряжением патронов для стрельбы на кучность. Я набрёл на сайт Дэна с его концепцией ОСW и был заинтригован тем неоспоримым фактом, что рецепт одного заряда может хорошо работать для множества различных винтовок, с разными длинами стволов, диаметрами и методами беддинга – укладки ствола в ложе. Я начал читать всё, что попало мне под руку, по теме вибраций ствола и внутренней баллистике. Единственной вещью, которую я не мог принять, было то, что простое гармоническое колебание не может объяснить тот факт, что один заряд может работать с такими разными винтовками.

Кристофер Лонг

(Christopher Long)
Перевод Геннадия Конойко

По профессии я инженер-радиоэлектронщик и всё время имею дело с резонансом и колебаниями в антеннах и других электрических схемах. Физически невозможно, чтобы различные винтовки имели в точности одинаковые графики гармонических колебаний по отношению к времени вылета пули из канала ствола. Даже простое изменение наружного контура для данной длины ствола будет изменять резонансную частоту, которая для 24-дм тактического ствола будет намного меньше, чем для 27-дм целевого. У меня появилась навязчивая идея изучения чёткой модели и теории этого процесса до такого состояния. Захотелось полностью разобраться в происходящем. Конечно, я часто просто использую процесс или механизм, не задавая вопросов о том, как они работают, но в тех случаях, когда я пытаюсь что-то понять или улучшить, я должен иметь хорошую модель.

Наблюдения и возникающие вопросы

Итак, я начал задумываться о возможных причинах рассеивания выстрелов в группе. За, буквально, тысячи экспериментов с тщательно выверенными навесками зарядов и глубинами посадок пуль были выявлены некоторые очевидные вещи:

1. Точка попадания (ТП) медленно перемещается по кругу по мере увеличения заряда – основное допущение метода ОСW Дэна.
2. Размер группы или рассеивание вокруг ТП изменяется **ОЧЕНЬ** быстро по мере изменения глубины посадки пули.
3. Разброс скоростей для определённого заряда по мере изменения глубины посадки пули будет изменяться **ОЧЕНЬ** быстро.
4. Оптимальные заряды работают во множестве винтовок, имеющих стволы различной длины.

Heavy Gun для 1000-ярдового бенчреста на алюминиевой ложе. Сложный материал для комбинирования, представляющий бенчрест-оружейникам немало головоломок

Разницы даже в 0,3 грана на заряде 25 гран .223 AI было достаточно для того, чтобы увеличить группу 0.5 MOA до группы в 1.2 MOA. Представьте себе, что это были не отдельные группы по три выстрела, а обычно 2 или более группы по 5 выстрелов каждая для каждого заряда, чтобы измерения были достоверными. Когда я пытался сохранять заряд постоянным, изменяя глубину посадки, я наблюдал точно такое же быстрое изменение рассеивания. Изменение глубины посадки пули всего в какие-то 0,010 дм иногда влияли на группы точно так же, как описанные выше. Разброс скоростей также быстро изменялся. Во время этих экспериментов, я часто наблюдал обратную корреляцию между разбросом скоростей и размером групп, когда заряды, дававшие хорошие группы, имели высокие средние отклонения скоростей, и наоборот. Это случалось не всегда, на самом деле, как только я получил по настоящему хороший заряд OCW, он стал достаточно терпимым к этим изменениям по отношению к рассеиванию и разбросу скоростей, опять же подтверждая предположение Дэна.

И вот что не давало мне покоя на протяжении нескольких недель: Изменение заряда на 0,3 грана или глубины посадки пули на 0,010 дм изменяют скорость очень и очень незначительно, обычно менее чем на 50 фт/с при средней скорости порядка 2900 фт/с. Изменение размера групп, тем не менее, оказываются драматическим.

Почему???

Теория гармонического резонанса. Подходит ли она?

Первая возможная теория состоит в том, что моды изгиба ствола возбуждаются по-разному для каждого выстрела. При некотором осмыслении я пришёл к выводу, что это невозможно по следующим причинам. Основная резонансная мода защемленного консольно ствола (балки), выполненного из стали типичных для нас



длин и диаметров находится в пределах от 500 до 1000 Гц, чуть больше, чуть меньше. Даже если вы рассмотрите более высокие моды, такие как 5-я гармоническая мода, вы всё равно будете иметь частоту где-то между 2500 и 5000 Гц. Имейте в виду, что эти моды на самом деле НЕ являются простыми модами изгиба ствола, но одновременно вносят большой вклад в скручивание и удлинение – очень сложная ситуация. На 5000 Гц дульный срез (если предположить, что он является точкой максимального движения), будет производить один цикл колебания за каждые 1/5000 с или 0,2 мс. Если рассеивание было обусловлено модами изгиба ствола, то оно должно быть довольно нечувствительным к маленьким изменениям заряда и глубины посадки пули. Кроме того, изменение распределения веса по длине ствола, даже небольшое, будет полностью изменять положение узловых точек, и, тем самым, делать невозможным существование универсального заряда OCW. Таким образом, я пришёл к выводу, что чувствительность к небольшим изменениям обусловлена не изменением мод изгиба.

Теория, описывающая пункт № 1

Сказав это, я соглашусь, что изменение ТП изменяется в первую очередь из-за колебаний изгиба, но так как они имеют низкую частоту, они будут «гладкими» и не будут изменяться достаточно быстро при вариациях зарядов. Я могу описать это лучше с использованием аналогии из конструирования электронных схем. Ствол напоминает низкочастотный фильтр, имеющий на механическом входе кривую давления в патроннике, и «фильтрующий» его через сложную резонансную структуру, имеющую на выходе изменение положения дульного входа и угла канала ствола в зависимости от времени. Импульс давления происходит достаточно быстро, достигая максимального давления примерно через 0,4 мс, с множеством небольших «ударов и щелчков», происходящих от удара бойка по капсюлю, взрыва капсюля, начала нарастания давления и сдвигания пули с места, удара затвора о боевые упоры и начала врезки пули в нарезы. Всё это происходит менее чем за 0,1 мс (100 микросекунд). Масса ствола не даёт ему испытывать

слишком быстрое возбуждение и смещать дульный срез на какую-либо значительную величину. Он начинает «дребезжать» по кругу, но на самом деле не качается слишком сильно до выхода пули. Такая фильтрация делает положение ствола очень нечувствительным к изменению заряда и глубины посадки пули.

Эта модель изгиба и вибрации ствола описывает первое наблюдаемое явление и то, почему заряды ОСВ работают. Комбинация заряда/пули имеет очень воспроизводимую кривую давления, и стрелитесь однообразно возбуждать моды изгиба, сохраняя ТП достаточно постоянной.

Тем не менее, так как мы исключили моды изгиба из объяснения изменения рассеивания и разброса скоростей, у меня не осталось моделей для объяснения этих наблюдений.

Прозрение

Две вещи слились для меня воедино практически одновременно, сделав возможным создание унифицированной модели. Во-первых, на одном из стрелковых форумов я прочитал сообщение бенчрестрелка о стволе, который стрелял лучше всех тех, которые он когда-либо имел. Он прогнал калибры через ствол и определил, что диаметр дульной части канала ствола был немного меньшим, чем диаметр канала остального ствола, насколько я припоминаю, где-то примерно на одну или две тысячные дюйма. Его теория состояла в том, что при этом пуля имела чистый выход, так как уменьшение канала ствола гарантировало отсутствие прорыва пороховых газов. Во-вторых, я вспомнил один визит к очень высокой ТВ-вышке, стоявшей в центральном Мэне (прим. ред.: Мэн – штат США) много лет назад. Я убивал время, ожидая какого-то события (не помню какого), развлекаясь с огромным натяжным тросом, поддерживающим 1400-футовую вышку. Тросы имели диаметр около трех дюймов, длину, по меньшей мере, 1000 футов и находились под серьёзным натяжением. Я помню, как я брался рукой за трос около закреплённого конца и что есть силы тряс его. Я наблюдал,

как S-образная волна пропадала в облаках, появлялась через несколько секунд, ударялась о закреплённый конец, уходила обратно в облака и так до тех пор, пока не утихла. Я игрался с эти тросом как двухлетний ребёнок несколько минут. Позже, будучи инженером по радиоэлектронике, я изготовил множество электрических схем, в которых использовались линии задержки и изменения формы колебания, вроде колебания натянутого троса. Хотя линии передачи радиосигналов, натяжные тросы и стволы винтовок являются различными вещами, физика есть физика, независимо от области применения.

Теория «бегущей волны»

Вот вторая и ключевая часть модели. Колебание давления газов в патроннике обуславливает появление бегущей волны напряжения, которая ходит вперёд и назад внутри ствола между ствольной коробкой и дульным срезом, немного изменяя диаметр канала ствола в процессе выстрела. Минимальное рассеивание пуль будет происходить, когда скорость изменения диаметра канала ствола будет минимальной, и это рассеивание будет, по меньшей мере, чувствительным к вариациям зарядов (навеска пороха, глубина посадки пуль).

Основную часть рассеивания пуль вокруг точки прицеливания обуславливает положение этой волны и её влияние на дульную часть ствола в точке вылета пули.

Волны напряжения

Рассмотрим ствол как «проводник» звука или приложенных напряжений и представим на момент, что он имеет бесконечную длину. Если вы стукнете по вашей части ствола молотком, это создаст акустическую волну или волну напряжения в стали, которая будет распространяться в обоих направлениях от места удара молотком со скоростью распространения звука в стволе. Волна напряжения – это силовые волны в стали, некоторые из которых распространяются в радиальном направлении (наружу и внутрь от канала ствола в направлении,

поперечному направлению распространения) и называются поперечной компонентой напряжения. Другие в продольном направлении. Они называются продольными компонентами напряжения. Акустическая волна в воздухе, в основном, является продольной, когда воздух сжимается и расширяется вдоль направления распространения. В твёрдых телах, вроде предметов из стали, одновременно могут существовать оба компонента. В нашем бесконечном стволе волна будет распространяться до тех пор, пока энергия механические колебаний в стали не рассеется в виде тепла.

Отражения

Однако, мы не стреляем из бесконечно длинных стволов. Что же происходит с волной напряжения в стволах реальных винтовок? Точно также, как в случае натяжного троса телевышки, когда волна напряжения достигает механического конца объекта по которому движется, например, дульного среза ствола или жёстко вставленного в ствольную коробку конца ствола, она отразится в противоположном направлении. В стали скорость звука будет приближаться к 0,227 дюймам в микросекунду, или примерно 18 916 фт/с. Волна будет проходить от ствольной коробки до дульного среза ствола примерно за 0,12 мс. Она может совершить от 4 до 5 кругов в стволе до того, как вылетит пуля. Обратите внимание на то, что это не зависит от веса ствола и его профиля, так как волна распространяется практически с одной скоростью во всех случаях.

Напряжение вызывает растяжение или изменение формы дульной части – объяснение наблюдения № 2

К чему приводит эта волна напряжения? Вспомните, что напряжение – это количество силы или давления, приложенных к материалу, и это обычно приводит к движению, изгибу или смещению материала. Это называется растяжением. Итак, напряжение, вызванное давлением газов в патроннике, вызывает растяжение ствола. Так как напряжение прилагается очень быстро, часть напряжения уходит в ствол в виде

волны, вызывая пропорциональное растяжение ствола по мере прохождения. Это растяжение первоначально слегка увеличивает канал ствола, затем немного сужает его, постепенно спадает, возвращая диаметр канала ствола в первоначальное состояние.

Когда этот импульс проходит вперёд и назад, он пересекает сам себя, и в этом процессе складывается сам с собой, довольно предсказуемым образом. Форма импульса подчиняется кривой зависимости давления пороховых газов от времени и зависит от механических свойств ствола. Эта теория хорошо объясняет, почему очень небольшие изменения параметров заряда могут привести к большим изменениям рассеивания пули. Если диаметр дульной части изменяется очень быстро за определённое время после начала выстрела, и если пуля вылетает в это время, тогда очень небольшое изменение заряда приведёт к очень небольшому изменению времени вылета, но к большому изменению направления вылета, так как диаметр дульной части всегда будет отличаться. Посмотрите на это как на динамическое изменение формы дульного среза. Хорошо известно, что дульный срез является, пожалуй, самой критичной частью ствола в плане кучности. Итак, эта теория или модель может объяснить чувствительность к заряду и объяснить наблюдение № 2, приведённое выше.

Модель и имитация

Прекрасная теория, но как её проверить? Для проверки вначале вы должны создать модель, которая могла бы (по возможности) предсказать поведение реальной системы, и затем использовать эту модель для предсказания результата некоторых контрольных экспериментов. Если экспериментальные данные соответствуют данным, полученным на модели, вы, по меньшей мере, можете сказать, что эксперимент не опровергает теорию.

Для проверки этой теории я создал модель ствола винтовки с использованием Matlab. Matlab – это очень мощный инструмент инженерного программирования и анализа, и он прекрасно подходит

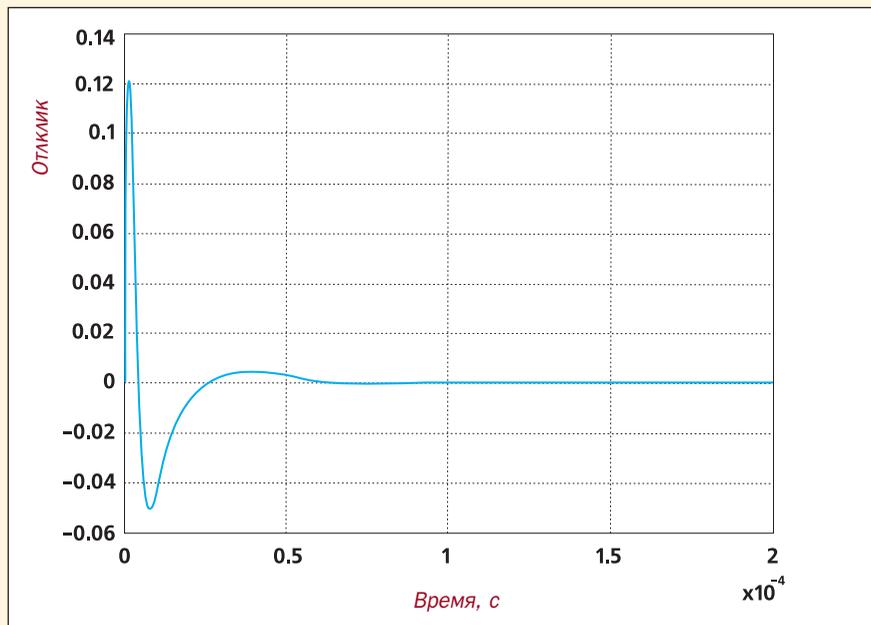


Рис. 1. Отклик акустического импульса

для проведения анализа подобного типа. Я использовал модель ствола в виде простого фильтра для предсказания того, как будет выглядеть волна напряжения, возбуждаемая идеальным ударом молотка, или одиночным импульсом. Это показано на рисунке 1.

Кривая зависимости давления от времени была взята непосредственно из Quickload (программа расчёта баллистических параметров) анализа моего кучностного

заряда .223 Remington Ackley Improved для ствола длиной 27 дм. Это 75-грановая пуля Hornady AMax с 25.5 гран пороха VVN140, дающие скорость пули примерно 2950 фт/с. Кривая давления показана на рисунке 2.

Теперь модель немного усложняется. На самом деле, давление не концентрируется в патроннике, а распространяется за пулей по мере её продвижения по стволу. Чтобы это первое приближение можно

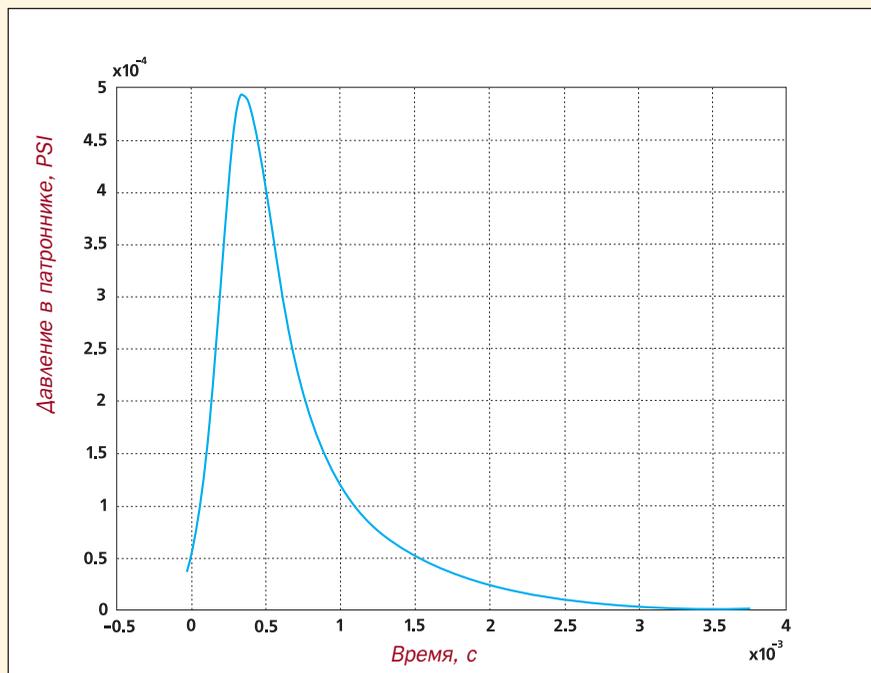


Рис. 2. Давление в патроннике в зависимости от времени

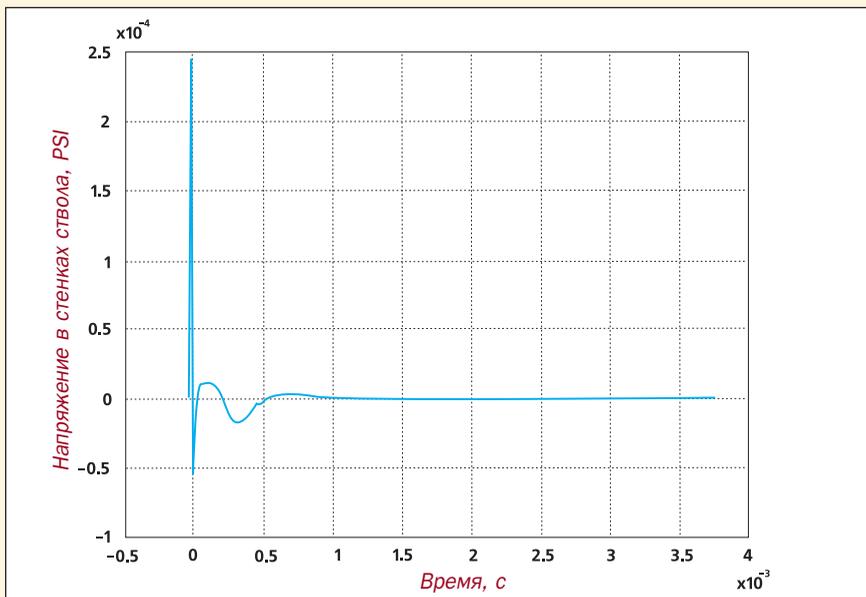


Рис. 3. Напряжение в стволе в зависимости от времени без отражений

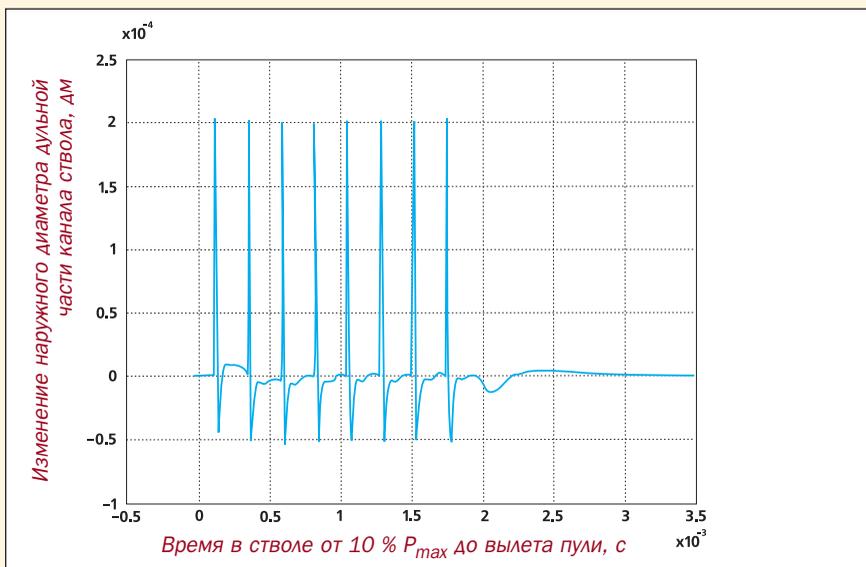


Рис. 4. Изменение диаметра канала ствола на дульном срезе в зависимости от времени

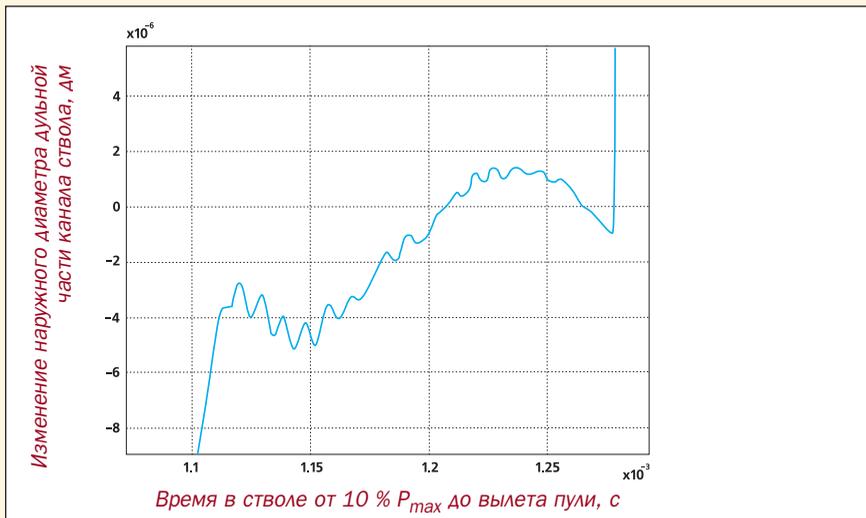


Рис. 5. Возмущение ствола в момент вылета пули

было обчитать, я сделал допущение, что импульс давления всегда сконцентрирован в районе патронника и не принимается во внимание при движении пули. В следующих приближениях этот эффект будет учтён. Тем не менее, взглядом на систему в первом приближении. Итак, если вы возьмёте импульс давления и пропустите его через фильтр (ствол), то получите отклик импульса. Полученная в результате бегущая волна напряжения будет иметь вид вроде изображённого на рисунке 3.

На графике показана волна напряжения для случая бесконечно длинного ствола. Конечно же, таких не существует, поэтому нам нужно сделать модель, имитирующую отражение этой волны в направлении назад и вперёд. Обратите внимание на то, что импульс имеет интересный «хвостовой» отклик примерно через 0,5 мс после основного возмущения. Он обусловлен видоизменением главного пика давления откликом ствола, и оказываются наиболее важным свойством всей системы.

Имитация рассчитывает сложение этого импульса в каждой точке ствола в каждый момент времени имитации. Matlab может даже анимировать импульс во время его прохождения вперёд и назад. Длина ствола, составляющая 27 дм от зеркала затвора до дульного среза, на самом деле с точки зрения импульса, уменьшается до отрезка длиной от середины патронника до дульного среза. Пока мне не удастся измерить ствол электронными методами, я продолжу использовать эту величину в качестве эффективной длины ствола. Это всего лишь предположение и условность, и данный параметр может изменяться до тех пор, пока не будет собрано достаточное количество данных. До этого времени данное предположение будет сохраняться.

Тем не менее, нас больше интересует напряжение на дульном срезе и его изменение со временем. На рисунке 4 показан график изменения диаметра дульного среза, обусловленный этим напряжением. Опять же, помните, что вы смотрите на упрощённую имитацию растяжения дульного среза ствола, в котором не присутствуют гармонические колебания, отдача или другие

Таблица 1. Предсказанное оптимальное время нахождения пули в стволе

Узел	Длина ствола, дюймы и мс														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	0.550	0.580	0.610	0.645	0.670	0.700	0.790	0.810	0.825	0.855	0.883	0.915	0.940	0.970	1.000
2	0.590	0.640	0.680	0.720	0.760	0.775	0.840	0.870	0.900	0.945	0.978	1.005	1.035	1.060	1.090
3	0.685	0.725	0.765	0.805	0.840	0.880	0.980	1.005	1.030	1.07	1.110	1.150	1.185	1.220	1.260
4	0.725	0.785	0.835	0.880	0.930	0.955	1.030	1.065	1.120	1.16	1.200	1.240	1.275	1.310	1.345
5											1.330		1.425	1.470	1.520
6														1.560	1.605

возмущения, возникающие в реальной ситуации.

Обратите внимание на то, что имитация продолжается дальше того момента, в который, по нашим данным, должна вылететь пуля, в данном случае примерно 1,24 мс по Quickload.

Если мы увеличим масштаб по времени в районе момента вылета, то сможем заметить, что на этом участке дульный срез ствола ведёт себя очень интересно (рис. 5).

Теория, соответствующая наблюдениям № 2 и № 4

Данная теория говорит, что если пуля покидает ствол в момент времени, когда скорость изменения диаметра дульной части минимальна, рассеивание будет минимальным, и любые небольшие изменения времени вылета, обусловленные вариациями заряда, будут оказывать минимальное влияние на рассеивание. Обратите внимание на то, что момент вылета пули (1,24 мс) как раз приходится на момент, когда скорость изменения диаметра дульного среза оказывается минимальной. Также обратите внимание на то, что в моменты около 1,05 и 1,28 мс импульс оказывается непосредственно на дульном срезе, и диаметр его оказывается огромным. На самом деле, лучшей точкой для цикла колебания, соответствующего данному патрону является точка 1,24 мс, или момент, непосредственно предшествующий возвращению импульса. Есть ещё одна, но не такая растянутая по времени, хорошая точка примерно 1,15 мс.

Таким образом, данная теория и модель практически предсказывает оптимальное время вылета, соответствующее минимальному рассеиванию в группах. Это соответствует наблюдению № 4.

Оптимальные времена нахождения пули в стволе

Эта модель была использована для предсказания оптимальных времен нахождения пули в стволе (от 10 % Pmax до вылета) как функции от длины ствола, которые приведены в таблице 1.

Эти значения времени были получены в результате работы программы имитации для каждой длины ствола, с визуальным определением времени до минимального диаметра дульной части, изменяющегося для каждого прохода волны.

Одним из основных наблюдений было то, что заряды ОСВ оказываются хорошо работающими практически в любой винтовке, независимо от длины ствола. Это наблюдение заставило нас отказаться от модели простого гармонического колебания как причины рассеивания. И так, как будет работать данный заряд (пуля, гильза, порох и определённый вес

заряда), если мы будем использовать один и тот же заряд в винтовках с различными длинами стволов?

Кучностной заряд, разработанный для винтовки .223 AI 27", был использован в качестве постоянной в Quickload. Вычислялось время в стволе во все том же Quickload в зависимости от изменения только длины ствола. Результат был начерчен на одном графике с моделью, имитирующей возмущение дульного среза для стволов тех же длин с выбором лучших времён вылета для каждой длины для одного и того же номера движения волны. На рисунке 6 показаны эти данные. Синяя линия с ромбиками показывает зависимость, а каждый ромбик соответствует определенной длине ствола. Длинне 16 дм соответствует самый левый ромбик, а длине 27 дм самый правый. Как и ожидалось, получилась почти прямая линия. Тем не менее, она не следует длине ствола «один

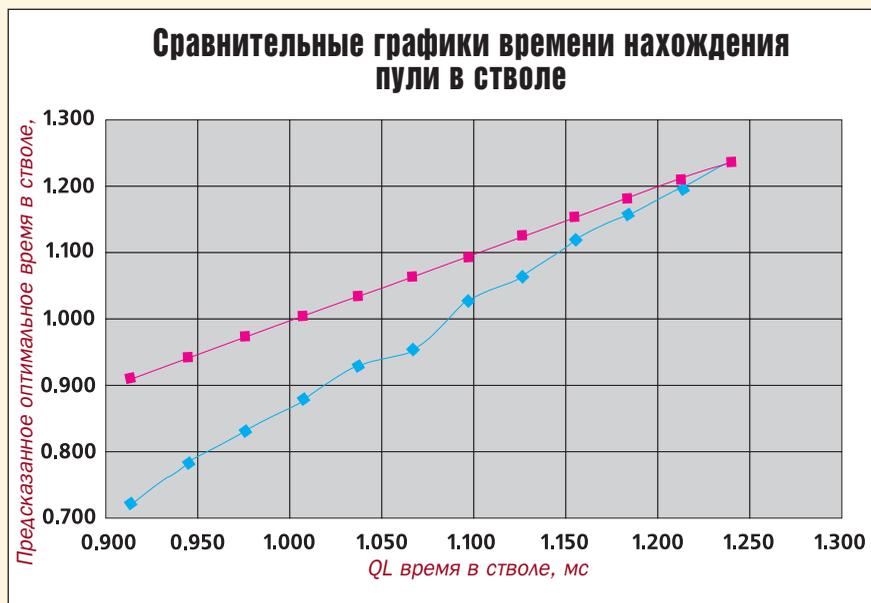


Рис. 6. Предсказанное Quickload время в стволе для данного заряда в сравнении с предсказанным оптимальным временем в стволе

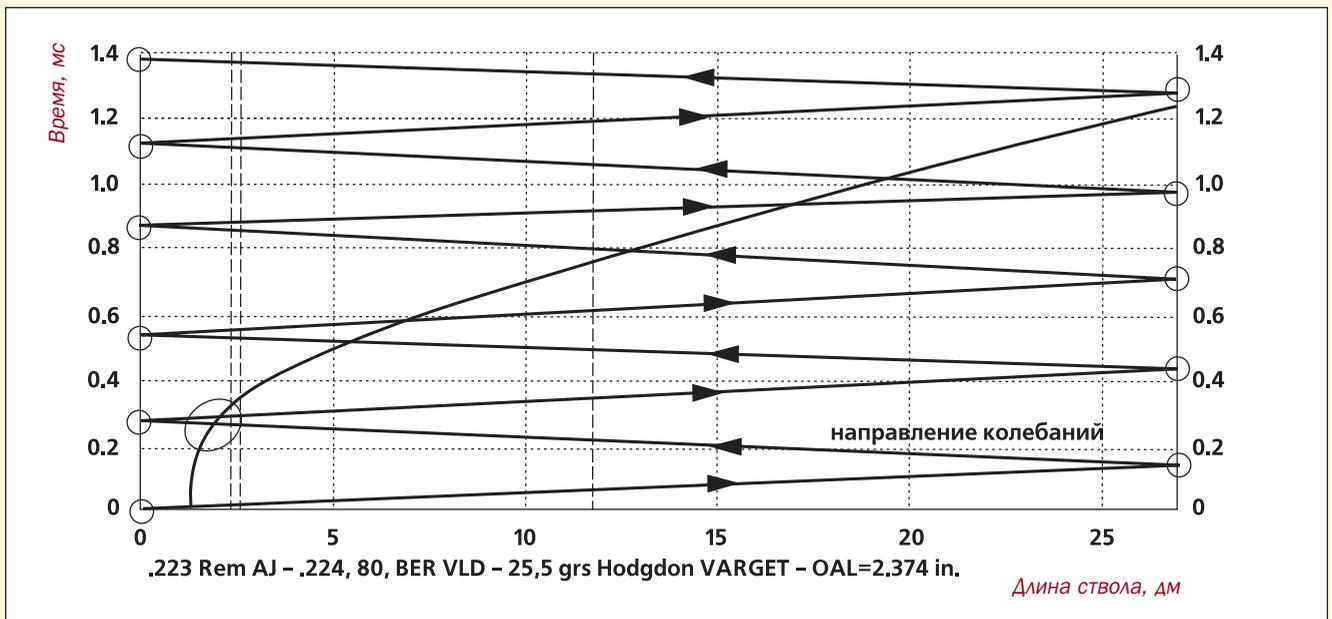


Рис. 7. Отражение колебания, наложенное на положение пули в зависимости от времени

к одному», и демонстрирует небольшую дивергенцию по мере укорочения ствола. Пурпурная линия показывает, что точно должно получаться для отношения один к одному. Интересно отметить, что данное отношение оказывается довольно близким к «один к одному» в районе от примерно 24 до 27 дм. В этот диапазон длин стволов попадают большинство производимых в настоящее время винтовок с поворотными затворами. Это демонстрирует способность заряда ОСW хорошо работать во многих винтовках, что подтверждается теорией и моделью.

Теория, объясняющая наблюдение № 3

Итак, теперь у нас есть модель, которая объясняет наблюдения № 1, № 2, и № 4. А как насчёт наблюдения № 3? Может ли она описать экстремальную чувствительность к глубине посадки пули, размера групп и быстрых изменений разбросов скоростей?

Модуляция пули

Я полагаю, что данная теория может объяснить данную чувствительность по следующей причине. Так как колебание изменяет диаметр канала ствола по мере своего прохождения вперёд и назад,

кажется логичным, что фрикционная нагрузка на пулю также будет изменяться по мере изменения диаметра канала ствола. За время первых двух или трёх возвращений колебания назад к концу патронника, пуля проходит менее двух дюймов, и давление приближается к максимальной отметке (рис. 7). Если канал ствола сужается, он будет обуславливать некоторое замедление пули, увеличивая тем самым скорость увеличения давления. Наоборот, если канал ствола расширяется после прохождения первой части колебания, пуля будет чувствовать себя свободней, и скорость увеличения давления будет падать. Другими словами, колебание, взаимодействуя

Таблица 2. Данные по оптимальному времени заряда для .223 Remington Ackley Improved -Оригинальный пульный вход

Винтовка:		Savage 12FV со стволом PacNor SSSM 1:8 27", Leupold 8.5-25X50 LRT, ложка Bell & Carlson Stock с гласс							Измеренные		
Калибр:		.223 Remington Ackley Improved							Средняя дульная скорость, фт/с	Максим. разброс скоростей, фт/с	Ср откл
Данные по заряду		Дополн. 8/31/03 - cdl									
Производитель пули	Пуля	Вес пули, гран	Порох	Вес заряда, гран	ОДП до спр. точки, дюйм	ОДП до носика пули, дюйм	Капсоль	Гильза (форм. выстрелом)			
Hornady	Amax	75	Win 748	25.0	1.892	2.397	CCI BR-4	LC	2857	14	
Hornady	Amax	75	IMR4895	24.5	1.892	2.397	CCI BR-4	LC	2911	40	
Hornady	Amax	75	Varget	24.4	1.892	2.397	CCI BR-4	LC	2882	43	
Hornady	Amax	75	VVN140	24.3	1.892	2.397	CCI BR-4	LC	2887	13	
Berger	VLD	80	Varget	25.5	1.850	2.374	CCI BR-4	LC	2952	33	
Berger	VLD	80	Win 748	25.0	1.850	2.374	CCI BR-4	LC	2880	47	

Современный Heavy Gun – почти идеальное испытательное средство для стрельбы на дальние дистанции

с пульей на критических первых нескольких дюймах, может существенно изменить характеристики горения путем модуляции сил замедления пули.

Чтобы понять это, нам необходимо изучить то, как сгорает порох в патроне. Скорость горения пороха определяется многими факторами, но, в общем, он горит быстрее при больших давлениях и медленней при низких давлениях, особенно на начальных стадиях горения. Во время начальной стадии, порох поджигается не весь, и фронт вспышки движется в сторону всех зёрен. В промежуточной стадии все зёрна воспламенились, и скорость газообразования является функцией давления и температуры, а также характеристик пороха. На финальных стадиях, скорость газообразования спадает по мере расхода зёрен.

Любой систематический эффект, который изменяет давление в патроннике или объём во время первоначальных стадий может существенно изменить время наступления пика давления. Если заряд оказался не совсем тяжёл и гильза заполнена неполностью, первоначальная стадия длится дольше, чем для заряда, близкого к максимальному. Все заряды OCW, созданные в соответствии с этой теорией на практике работали лучше, когда пороховой заряд приближался к максимальному объёму. Это также



объясняет, почему вариации напряжения дульца и глубины посадки пули могут иметь (иногда) отрицательное влияние на кучность и вариации скорости. Согласен, это не ново, но теперь существует полное объяснение того, для чего это всё делается.

Модуляция давления посредством пересечения отраженных колебаний с пулей будет немного изменять положение пули при прохождении следующего колебания, ещё более изменяя горение. В результате получается, что общее горение происходит хаотично, что по определению является любым процессом, демонстрирующим экстремальную чувствительность к начальным условиям.

С другой стороны, если время встречи колебания с пулей настает после того, как горение пороха достигает средней точки, тогда эффект модуляции оказывается менее существенным.

Итак, причина, по которой мы видим очень существенные изменения размеров групп от изменения глубины посадки пуль (наблюдение № 2), можно теперь объяснить встречей пули с колебанием во время первоначальной стадии горения пороха. Скорость горения, то есть реальное время в стволе будет сильно изменяться от небольших изменений времени, необходимого колебанию, чтобы обогнать пулю и вернуться. Вопрос № 3 объясняется также как и № 2, так как они похожи, изменением времени в стволе, происходящем от изменения дульной скорости. Нам нужно только быть уверенными в том, что мы выбрали порох и объём заряда такими, чтобы точно знать, что порох выйдет из первоначальной стадии до первого возвращения колебания.

Сравнение предсказанных моделей с результатами реальной стрельбы на стрельбище

Итак, насколько данная модель соответствует реальности? Одним словом (ладно, двумя словами),

беддингом

Среднее значение скорости, фт/с	Размер 5-п группы на 100 ярд,	Размер 5-п группы на 200 ярд,	Скорость по Quickload, фт/с	Время в стволе по Quickload, мс	Заметки
7	-	0.700	2951	1.249	
20	-	0.550	2945	1.240	
17	-	0.650	2884	1.259	
4	-	0.600	2858	1.277	
12	0.600	-	2968	1.188	Слишком быстро
21	-	0.700	2923	1.244	

Таблица 3. Данные по оптимальному времени заряда для .223 Remington Ackley Improved -Пульный вход увеличен на 0.100"

Винтовка: Savage 12FV со стволом, PacNor SSSM 1:8 27", Leupold 8.5-25X50 LRT, ложка Bell & Carlson Stock с гласс									Измеренные		
Калибр: .223 Remington Ackley Improved									Средняя дульная скорость, фт/с	Максим. Разброса скоростей, фт/с	Ср откл
Данные по заряду Дополнены 10/18/03 - cdl - пульн.вход смещен вперед на 0.010											
Производитель пуль	Пуля	Вес пули, гран	Порох	Вес заряда, гран	ОДП до спр. точки, дюйм	ОДП до носика пули, дюйм	Капсоль	Гильза (форм. выстрелом)			
Hornady	Amax	75	Win 748				CCI BR-4	LC			
Hornady	Amax	75	IMR4895	25.5	2.020	2.525	CCI BR-4	LC	2913	60	
Hornady	Amax	75	IMR3031	24.5	2.020	2.525	CCI BR-4	LC	2998	34	
Hornady	Amax	75	Benchmark				CCI BR-4	LC			
Hornady	Amax	75	Varget				CCI BR-4	LC			
Hornady	Amax	75	VVN140	25.5	2.020	2.525	CCI BR-4	LC	2938	51	
Berger	VLD	80	Varget				CCI BR-4	LC			
Berger	VLD	80	Win 748				CCI BR-4	LC			

почти идеально. Я говорю почти, так как в самом Quickload имеется достаточная погрешность, и оценка точной эффективности длины ствола, которая нужна реальному пороховому заряду для получения оптимальных групп обычно оказывалась на 1 или 2 процента меньше предсказанной Quickload. Обратите внимание на то, что Quickload использует время от 10 % максимального давления до вылета пули как определение времени в стволе. Я принял это для своих расчётов, чтобы максимально упростить пользование Quickload.

Даже при таких потенциальных ошибках моделирования мне удалось подтвердить, что оптимальное время в стволе для данной винтовки 223AI с 27-дм стволом точно равняется 1,24 мс для различных порохов. Так как я не могу заставить 75-грановую пулю вылететь через 1,15 мс без существенного повышения максимального давления. Я попробовал использовать 55-грановые пули Vmax, и снова получил минимальные размеры групп на отметках 1,15 и 1,05 мс. Я заметил, что чувствительность заряда здесь оказалась более высокой, чем на медленных зарядах, что предсказывалась меньшим временем стабильности на 1,15 мс (смотри таблицу 2 и таблицу 3). В таблицах записаны заряды, использовавшиеся для проверки моделей 75- и 80-грановых пуль, моих основных пуль для данной винтовки. Там приведены измеренные размеры групп, скорости и предсказанные данные из Quickload. Все

показанные заряды обеспечивали лучшие группы и минимальные смещения точки попадания при широчайших вариациях веса заряда и глубины посадки. Это настоящие заряды OCW.

С этой моделью мне удалось получить оптимальный вес заряда почти без всякой разработки, я мог начать с веса заряда чуть меньшего предсказанного и наблюдать за размером групп при медленном увеличении заряда. Обычно я начинал с пули, слегка касающейся полей нарезов. Интересно, часто мне удавалось добиваться оптимального заряда с пулей, посаженной в поля, и сажая пулю глубже и глубже, проходя через область плохих групп, потом группы опять начинали уменьшаться. Наконец, достигался ещё один оптимум, особенно если я немного уменьшал навеску пороха достаточным образом, чтобы давление/скорость возвращались примерно до того же состояния, какими они были в случае посадки в поля нарезов.

Я отстрелял сотни комбинаций, и изучал каждый заряд из разработанных ранее через призму предсказанного времени нахождения пули в стволе и его оптимума. Во всех случаях, без исключений, лучшие заряды отличались от предсказанного времени вылета не более чем на 2 %. Кроме того, они демонстрировали все характеристики зарядов OCW, будучи нечувствительными к весу заряда и небольшим изменениям глубины посадки ($\pm 0.010''$). Я попросил

других стрелков проверить мою модель и в настоящее время ожидаю результатов.

Итоги и выводы

Итак, теперь у нас есть теория и модель, которые могут предсказать оптимальные времена нахождения пули в стволе исходя только из длины ствола, независимо от его конструкции или крепления. При наличии данной характеристики, мы можем использовать программу по внутренней баллистике, вроде Quickload для отыскания комбинации пороха и веса заряда, которые бы одновременно удовлетворяли следующим требованиям:

- максимального заполнения гильзы для гарантирования максимально быстрой начальной стадии,
- гарантирования того, что весь порох воспламенится до того, как первое колебание вернётся к пуле, находящейся в патроннике,
- удовлетворения требованию общей длины ствола, основанного на длине ствола.

Следующие шаги

Я планирую оснастить ствол тензодатчиками и акустическими сенсорами (микрофонами) для того, чтобы получить чёткое подтверждение вышеприведённой теории. Я дополню этот документ, как только данная информация станет доступной.

Хорошей стрельбы!

Скорость пули, фт/с	Размер 5-п группы на 100 ярд,	Размер 5-п группы на 200 ярд,	Скорость по Quickload, фт/с	Время в стволе по Quickload, мс	Заметки
21	0.300		2989	1.226	25.3 ??
13		0.576	2993	1.238	
12	0.280	0.476	2917	1.250	

Дополнение от 8/8/04

Благодаря Дэну (green788), Дэвиду (LTRDavid), и огромному количеству других людей оказывается, что данная теория предсказания времени нахождения пули в стволе для получения самых маленьких групп показывает достаточно точные результаты. Эти данные были собраны для большого количества винтовок, калибров, зарядов и условий. Процесс использования QuickLoad для отыскания хорошей комбинации пороха и веса заряда для данной длины ствола оказывается очень эффективным, особенно если фактор горения пороха и фактор веса патрона калибруются под реальную винтовку, основываясь на измеренных данных по скорости и давлению. При снаряжении патронов на стрельбище мне очень эффективную помощь оказал комплекс PressureTrace вместе с хронографом Oehler. При QuickLoad, работающем на ноутбуке, можно производить непосредственную оценку заряда, а также очень быстро производить соответствующие

изменения, отыскивая заряд ОВТ/ОСВ для данных тестируемых пороха и пули.

Мы не можем переоценить пользу от использования PressureTrace во время этого процесса. Он позволяет вам не только видеть, насколько QuickLoad правильно определяет скорость, но и насколько правильно он определяет давления. Вы можете легко отвергнуть комбинации пороха/капсюля/гильзы/глубины посадки пули до того, как потратите на них огромные усилия, так как кривая давления покажет вам вариации в скорости точно также, как и хронограф. При наличии обоих данных у вас сложится чёткая картина того, будет ли работать система. Кроме того, так как он предоставляет количественные данные по давлению, вы всегда знаете огибающую в единицах уровня заряда, и вы можете измерить также влияние изменений температуры. С собой на стрельбище я брал электронагреватель, на котором и нагревал 10 патронов до температуры примерно 125°F. Отстреляв их до того, как

ЭТАЛОННАЯ МОДЕЛЬ

	N нечетное	N четное
A	4.42642857E-03	4.40803571E-03
B	2.84942857E-02	2.68380952E-02
C	-3.18785714E-03	-2.40148810E-03
D	2.91180952E-02	4.39015873E-02

$$ОВТ = (A * N + B) * L + C * N + D$$

N – номер узла, может быть нулем или отрицательным

L – длина ствола в дюймах

ОВТ в миллисекундах

у них будут шансы остыть, вы можете немедленно увидеть, как будут вести себя ваши заряды при экстремальных температурах в поле.

На основе визуального наблюдения зарядов ОВТ мы вывели достаточно простую формулу, которую можно использовать для вычисления оптимального времени нахождения пули в стволе для ствола любой заданной длины. Просто подставьте числа с A по C в формулу, выбрав данные из левой колонки, если номер узла N нечётный, и из правой колонки, если узел чётный. Номер узла случаен и может быть как нулем, так и отрицательным числом.

Например, если ствол имеет длину 24 дюйма, и вы хотите найти ОВТ для узла 4, формула будет выглядеть так:

$$ОВТ = (4.40803571E-03 * 4 + 2.68380952E-02) * 24.0 + (-2.40148810E-03 * 4) + 4.39015873E-02 = 1.101 ...$$

Вы найдёте, что приведенная выше формула дает ОВТ немного отличающиеся от табличных значений в приведённом выше тексте. Это происходит из-за влияния неминусовой ошибки человека при визуальном определении времен ОВТ, и того факта, что формула основана на обработке оригинальных данных. Этими вариациями можно пренебречь, так как вариации в параметрах горения для разных партий пороха превышают данные ошибки моделирования.

Если вы попробуете это решение, пожалуйста, пришлите мне свои наблюдения, если найдете на это время.

Благодарность

Я бы хотел поблагодарить Дэна Ньюберри (Dan Newberry) за всю помощь, оказанную им в этих исследованиях. Без побуждения им я бы никогда не взялся за это предприятие. Я бы также хотел поблагодарить мою жену и семью за предоставленную мне возможность провести на стрельбище все свободные воскресенья, за то, что они предоставили мне время для опробования всех вариаций зарядов. Без их терпения невозможно было бы все проверить.