

И. Б. Палымский^{1,2*}

О влиянии материала оболочки снаряда на дальность выстрела

¹Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация

*e-mail: palymsky@yandex.ru

Аннотация. Показана возможность повышения дальноточности снаряда путем замены стандартной снарядной стали С-60 при изготовлении его оболочки на сталь Гадфильда 110Г13. Более высокое значение предела текучести стали Гадфильда обуславливает повышение давления внутри боеприпаса при его разрыве и, как следствие, повышение действующей на осколки силы и увеличение скорости осколков. В свою очередь, повышение скорости разлета осколков позволяет без потери боевой эффективности уменьшить массу разрывного взрывчатого вещества с соответствующим увеличением толщины стенки оболочки боеприпаса, что, в свою очередь, позволит увеличить массу метательного заряда и дальноточность снаряда. Выполнена оценка увеличения дальности выстрела.

Ключевые слова: осколочно-фугасный боеприпас, дальноточный снаряд, коэффициент нагрузки, взрывчатое вещество, метательный заряд

I. B. Palymskiy^{1,2*}

On the Influence of Projectile Casing Material on Shoot Range

¹Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Novosibirsk,
Russian Federation

²Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

*e-mail: palymsky@yandex.ru

Abstract. The possibility of increasing the range of a projectile by replacing the standard C-60 projectile steel in the manufacture of its shell with Hadfield steel has been shown. A higher value of the yield strength of Hadfield steel causes an increase in pressure inside the ammunition when it ruptures and, as a consequence, an increase in the force acting on the fragments and an increase in the speed of the fragments. In turn, increasing the speed of dispersion of fragments allows, without loss of combat effectiveness, to reduce the mass of explosives with a corresponding increase in the wall thickness of the ammunition shell, which, in turn, will increase the mass of the propellant charge and the range of the projectile. The increase in shot range has been assessed.

Keywords: high-explosive fragmentation ammunition, long-range projectile, load factor, explosive, propellant charge

Введение

При конструировании осколочно-фугасных боеприпасов большое внимание уделяют типу взрывчатого вещества (ВВ), начиняющего снаряд и обеспечивающего разрыв боеприпаса на большое количество поражающих элементов. Пора-

жающее действие осколочного боеприпаса определяется относительным количеством осколков средней величины. Как правило, в качестве разрывного заряда в осколочно-фугасных боеприпасах (ОФБ) используют TNT или А-IX-2, при этом относительное количество осколков средней величины получается различным, то есть зависит от типа используемого ВВ [1,2].

Для изготовления корпусов снарядов средних и крупных калибров традиционно используется в течение уже нескольких десятилетий среднеуглеродистая сталь С-60 и хромистая сталь 45Х1. Относительно высокое процентное содержание углерода в данных сталях обуславливает их несомненное достоинство – они не требуют упрочняющей термообработки при изготовлении боеприпаса [3].

В настоящее время остро стоит проблема увеличения дальноточности артиллерии. Самым простым путем решения этой проблемы представляется увеличение веса разгонного (метательного) заряда. Однако, получаемое увеличение дальности выстрела сопровождается увеличением действующей на снаряд силы, что лимитируется ограниченной прочностью оболочки боеприпаса.

В самом деле, рассматривая уравнение движения снаряда при его разгоне в стволе, можно получить, что сила, действующая на снаряд, растет при увеличении дальности выстрела. Простые оценки показывают, что при выстреле дальноточным снарядом Ф-625д калибра 203 мм на предельную дальность 18 км [4,5], величина действующей в стволе на снаряд силы имеет порядок 360 тс, что равно весу семи средних танков. Как показано ниже, при увеличении дальности выстрела на 6 км величина этой силы возрастет до 620 тс, то есть увеличится на 71%.

Рассмотрим, для примера, недальноточный и дальноточный 203 мм снаряды Ф-625 и Ф-625д для гаубицы Б-4 1931 года [4]. Дальность выстрела дальноточным снарядом примерно на 30% больше, чем недальноточного, а силы, действующие в стволе на снаряд, равны по порядку величины 220 тс и 360 тс, соответственно. Такое увеличение действующей на снаряд силы сопровождается соответствующим усилением корпуса снаряда, а именно, толщина стенок увеличена с 0,08 клб (1,62 см) у Ф-625 до 0,13 клб (2,64 см) у Ф-625д [3]. В этой связи заметим, что наставление по стрельбе из гаубицы запрещает выстрел недальноточным снарядом Ф-625 с полным метательным зарядом [4,5], что, очевидно, связано с недостаточной прочностью корпуса такого снаряда.

При одинаковом весе дальноточного и недальноточного снарядов (100 кг), увеличение прочности оболочки дальноточного снаряда (толщины стенки) обеспечивается увеличением ее веса на 7,6 кг, чему соответствует уменьшение веса разрывного заряда с 23,4 кг до 15,8 кг [2].

Но попытки дальнейшего уменьшения веса разрывного заряда с целью обеспечить возможность усиления корпуса снаряда бесперспективны из-за неизбежного при этом падения боевой эффективности, в частности, осколки, образующиеся при разрыве такого снаряда, не смогут пробить даже стальной лист толщиной 3 мм [6].

Сказанное показывает бесперспективность попыток увеличить дальность стрельбы простым увеличением веса метательного заряда.

Некоторые перспективы в вопросе увеличения дальности выстрела связаны с заменой разрывного ВВ снарядов более эффективным и использованием других видов стали.

На наш взгляд, наиболее перспективным материалом для производства корпусов дальнобойных снарядов является аустенитная марганцовистая сталь 110Г13Л (сталь Гадфильда). Одним из достоинств такой стали является то, что при разрыве сделанных из нее боеприпасов наблюдается повышенная скорость разлета осколков, причем, это повышение может достигать 20% [3]. Это повышение позволит уменьшить вес разрывного заряда, с соответствующим увеличением прочности корпуса боеприпаса за счет увеличения толщины стенок, что, в свою очередь, позволит увеличить дальность выстрела.

Методика исследования

Анализируются физико-химические свойства стали Гадфильда 110Г13Л, в частности, более высокая скорость разлета осколков при взрыве сделанных из нее оболочек. С учетом этого обстоятельства, предлагается делать корпуса дальнобойных снарядов из стали Гадфильда с уменьшением веса разрывного ВВ и соответствующим утолщением стенок боеприпаса, а за счет увеличения прочности оболочки боеприпаса увеличить дальность выстрела. Все сказанное сопровождается расчетами. Для определенности рассматриваются недальнобойный Ф-625 и дальнобойный Ф-625д снаряды для 203-мм гаубицы Б-4 1931 года, известной как «кувалда Сталина» [4].

Для проведения всех вычислений и обработки формул использовалась программа символьных вычислений Maple 17 [7,8], а для работы с графиками – Mathcad 14 [9,10].

Результаты

Первая аустенитная легированная сталь массового производства предложена в 1882 году английским металлургом Робертом Гадфильдом и известна как сталь Гадфильда 110Г13Л. Из нее изготавливают траки гусениц танков, тракторов, машин, щеки дробилок, рельсовые крестовины, стрелочные переводы, работающие в условиях ударных нагрузок и истирания, а также оконные решетки в тюрьмах, которые невозможно перепилить. Для нее характерно высокое сопротивление износу (истиранию) при больших давлениях или ударных нагрузках и высокая пластичность.

Отличительной особенностью материала является его аномально низкая теплопроводность. Она примерно в 4-6 раз меньше, чем у других разновидностей стали. Стоит отметить также и сравнительно небольшой коэффициент теплового расширения. Вышеописанные характеристики материала позволяют использовать его для изготовления деталей, которые в последующем будут подвергаться воздействию перепадов температур [11].

Отмеченные физико-химические свойства стали Гадфильда обусловлены ее специфическим химическим составом и методами закалки и обработки. В табл. 1 приведен состав стали Гадфильда, относительные доли химических элементов

даны в процентах, а в последнем столбце приведено значение предела текучести (в скобках для снарядной стали С-60) в МПа [3].

Таблица 1

Химический состав стали Гадфильда

Fe	Mn	C	Si	σ_r , МПа
82	13	1	1	910 (760)

Однако, в контексте данной работы, самым главным достоинством аустенитной марганцовистой стали 110Г13Л (стали Гадфильда) является то, что при разрыве сделанных из нее боеприпасов наблюдается повышенная скорость разлета осколков, причем, это повышение может достигать 20% [3]. Такое увеличение скорости разлета осколков связано с более высоким значением предела текучести стали Гадфильда (табл. 1), так как оно обуславливает повышенное давление внутри боеприпаса при его разрыве (см. ниже формулу (5)) и, как следствие, повышение действующей на осколки силы при разрыве боеприпаса и увеличение скорости осколков.

Как следует из широко используемой формулы Покровского для начальной скорости осколков при взрыве цилиндрического боеприпаса [1–3]:

$$v_0 = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\beta}{2 + \beta}}, \quad (1)$$

указанное двадцатипроцентное увеличение скорости разлета образующихся при разрыве боеприпаса осколков может быть обусловлено увеличением скорости детонации разрывного взрывчатого вещества (ВВ) или/и увеличением эффективного значения коэффициента нагрузки. Здесь D – скорость распространения детонационной волны при взрыве ВВ, а $\beta = m_{\text{ВВ}}/M$ – коэффициент нагрузки, определенный как масса разрывного заряда, отнесенная к массе оболочки боеприпаса.

Однако, скорость детонационной волны D является характеристикой выбранного ВВ и, как следствие, изменяться не может. В свою очередь, эффективное количество разрывного ВВ (эффективное значение коэффициента нагрузки β) может изменяться при изменении материала корпуса.

Теперь оценим эффективное значение коэффициента нагрузки, соответствующее двадцатипроцентному увеличению скорости разлета осколков:

$$\sqrt{\frac{\eta\beta}{2 + \eta\beta}} = 1,2 \sqrt{\frac{\beta}{2 + \beta}}, \quad (2)$$

где $\eta\beta$ – эффективное значение коэффициента нагрузки, а η – коэффициент умножения.

Из соотношения (2) найдем выражение для коэффициента умножения:

$$\eta = \frac{6,545}{4,545 - \beta}. \quad (3)$$

Выписанная точная формула для коэффициента умножения (3) имеет особенность при $\beta = 4,545$, но это значение коэффициента нагрузки соответствует безоболочным боеприпасам, которые в данной работе не рассматриваются.

Для простоты и наглядности будем использовать вместо (3) асимптотическую формулу, которая получена разложением выражения (3) в ряд по степеням β и удержанием первого главного члена разложения:

$$\eta = 1,44 \cdot (1 + 0,22 \beta), \beta \ll 1. \quad (4)$$

В этой связи отметим, что для рассматриваемого в настоящей работе дальнобойного снаряда Ф-625д коэффициент нагрузки β равен 0,188 [6], и значения для коэффициента умножения η , вычисленные по точной (3) и приближенной (4) формулам отличаются меньше чем на 0,2%.

Подставляя в соотношение (4) $\beta = 0,188$, находим, что $\eta = 1,5$.

Учитывая полученное значение коэффициента умножения η и учитывая, что в дальнобойном снаряде Ф-625д вес разрывного заряда составляет 15,8 кг [3,6], находим уменьшенную массу разрывного заряда, оболочка которого сделана из стали Гадфильда (без понижения боевой эффективности):

$$15,8/1,5 = 10,5 \text{ кг.}$$

Освободившаяся при этом масса 5,3 кг (15,8 – 10,5) должна быть использована для усиления оболочки боеприпаса.

А именно, родственный к рассматриваемому недальнобойный боеприпас Ф-625 снаряжается разрывным ВВ весом 23,4 кг и имеет толщину стенки 0,08 клб (1,62 см). Уменьшение веса разрывного ВВ на 7,6 кг (с 23,4 кг до 15,8 кг) позволило увеличить толщину стенки оболочки до 0,13 клб (2,64 см) при создании дальнобойного снаряда Ф-625д.

Простой пересчет показывает, что если при увеличении веса материала оболочки снаряда на 7,6 кг (с 23,4 кг до 15,8 кг) толщина стенки снаряда увеличилась на 1 см (с 1,62 см до 2,64 см), то дополнительное увеличение веса оболочки на 5,3 кг позволит увеличить толщину стенки боеприпаса еще на 0,7 см. Таким образом, в дальнобойном боеприпасе предлагаемой конструкции толщина стенки составит 0,16 клб (3,34 см).

Оболочка снаряда может выдержать давление P , которое при всех прочих равных условиях пропорционально произведению толщины стенки h и предела текучести материала σ_t [12]:

$$h \cdot \sigma_t = C \cdot P, \quad C - const. \quad (5)$$

С учетом значений пределов текучести материала σ_t (последний столбец табл. 1) получается, что при замене материала оболочки боеприпаса (стали С-60 на сталь Гадфильда) допустимое давление на снаряд P (другими словами, действующая на снаряд сила или его ускорение в стволе гаубицы) увеличением метательного разгонного заряда может быть увеличено на 71% без разрушения оболочки снаряда:

$$\frac{3,34 \cdot 960}{2,64 \cdot 710} = 1,71.$$

Теперь, считая движение снаряда в стволе орудия равноускоренным (начальная скорость снаряда при этом пропорциональна корню квадратному из его ускорения в стволе или давления на снаряд) и учитывая, что максимальная начальная скорость (при полном метательном заряде) дальнобойного снаряда Ф-625д составляет 607 м/с [4], найдем максимальную начальную скорость снаряда предлагаемой модификации (при увеличенном весе метательного заряда):

$$v_0 = 607 \cdot \sqrt{1,71} = 794,$$

таким образом, максимальная начальная скорость снаряда при предлагаемой модификации должна составить 794 м/с.

Анализ данных по дальности выстрела из гаубицы Б-4 дальнобойным снарядом Ф-625д показывает практически линейную зависимость дальности S от начальной скорости снаряда V_0 [4] (рис. 1):

$$S = -1583 + 32,02 \cdot V_0.$$

На рис. 1 черными ромбами показаны данные из таблицы стрельбы (двенадцать различных метательных зарядов, включая полный) [4], прерывистой зеленой линией – приведенный выше линейный интерполянт, и синим знаком – прогнозируемые значения для модифицированного боеприпаса.

Подстановка в последнюю формулу $V_0 = 794$ м/с позволяет заключить, что при предлагаемой модификации дальнобойного снаряда Ф-625д и соответствующем увеличении веса метательного заряда дальность выстрела может быть увеличена без потери боевой эффективности на 6 км (с 17,89 км до 23,84 км).

Теперь оценим количество метательного ВВ, необходимое для стрельбы модифицированным снарядом на такую дальность.

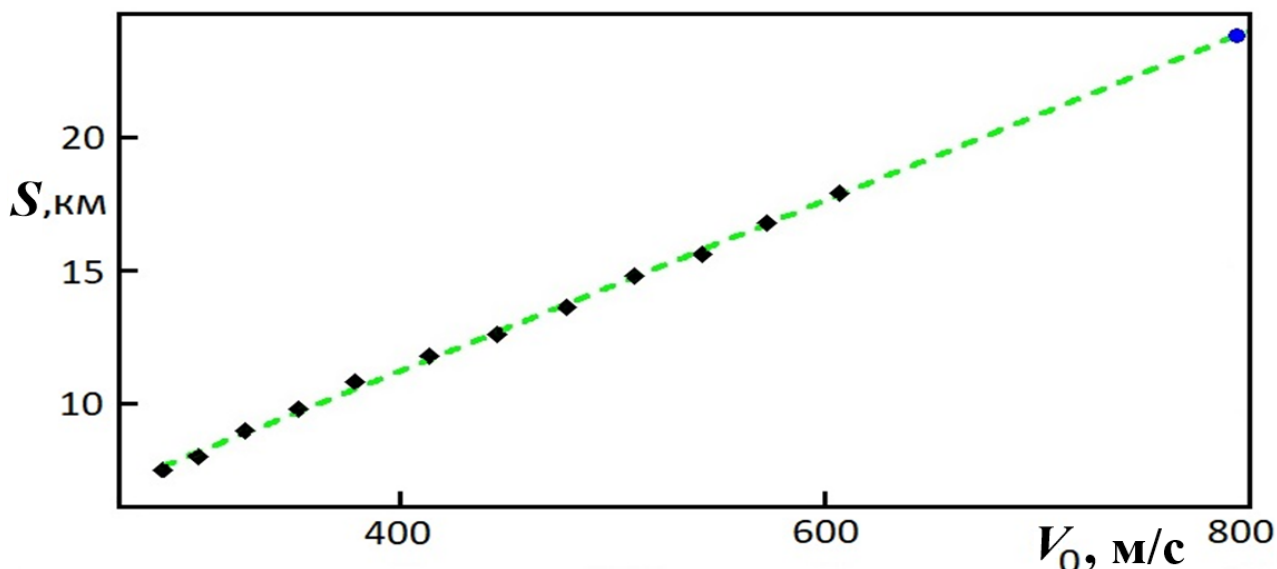


Рис. 1. Зависимость дальности выстрела от начальной скорости снаряда

Анализ данных по зависимости веса метательного ВВ m_V от начальной скорости снаряда V_0 при наличии точки перехода скорости звука в стволе приводит к линейной зависимости (рис. 2):

$$m_V = -4,35 + 0,0321 \cdot V_0.$$

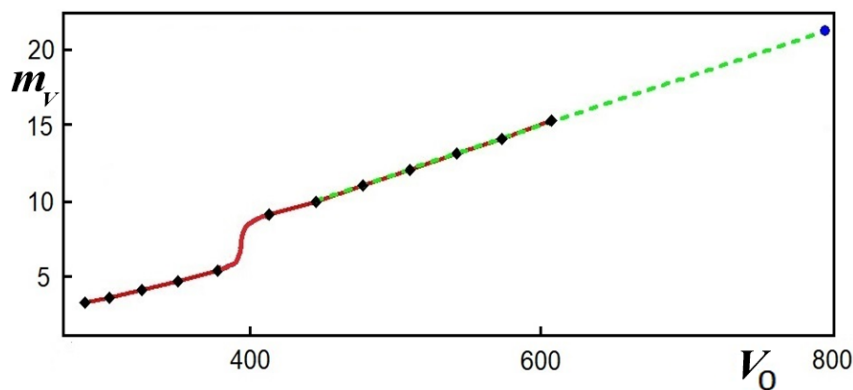


Рис. 2. Зависимость начальной скорости снаряда от веса метательного заряда

На рис. 2 черными ромбами показаны данные из таблицы стрельбы [4], прерывистой зеленой линией – приведенный выше линейный интерполянт, и синим знаком – прогнозируемые значения для модифицированного боеприпаса.

Подстановка в последнее выражение значения начальной скорости модифицированного боеприпаса $V_0 = 794$ м/с дает требуемый для ее достижения вес метательного заряда $m_V = 21,2$ кг. Четко видный излом на рис. 2 связан с переходом скорости движения снаряда через скорость звука при движении его в стволе гаубицы.

Обсуждение

В данной работе никоим образом не обсуждаются вопросы модификации ствола орудия, связанные со стрельбой дальнобойным снарядом с увеличенным весом металлического заряда. Как показывают простые оценки, при стрельбе полным зарядом давление в стволе имеет порядок 300 атм. Увеличение давления пороховых газов в стволе на 71% (до 510 атм.) должно сопровождаться пропорциональным увеличением толщины стенки ствола гаубицы, и, кроме того, увеличение давления пороховых газов в стволе приведет к ускоренному прогару ствола.

Не обсуждаются также вопросы, связанные с технологией изготовления снаряда. Здесь проблема в том, что сталь Гадфильда очень плохо обрабатывается, и, как правило, детали из нее изготавливаются литьем.

Альтернативным подходом к вышеизложенному является численное моделирование на основе математических моделей [13–15].

Заключение

Путем теоретического рассмотрения показана возможность повышения дальнобойности снаряда Ф-625д при стрельбе полным зарядом из гаубицы Б-4. Для изготовления оболочки модифицированного снаряда предлагается вместо стандартной снарядной стали С-60 использовать сталь Гадфильда 110Г13Л.

В контексте данной работы, главным достоинством аустенитной марганцевистой стали 110Г13Л Гадфильда является повышенная скорость разлета осколков, причем, это повышение может достигать 20%. Это обстоятельство связано с более высоким значением предела текучести стали Гадфильда, это обеспечивает более высокое давление внутри боеприпаса при его разрыве и, как следствие, повышение действующей на осколки силы при разрыве боеприпаса и увеличение скорости разлета осколков.

Повышение скорости разлета осколков позволяет без потери боевой эффективности и с сохранением веса боеприпаса уменьшить массу разрывного ВВ с одновременным увеличением прочности оболочки путем увеличения толщины ее стенки, что, в свою очередь, делает возможным увеличить массу металлического заряда и дальнобойность выстрела. Выполненные оценки показывают увеличение дальности выстрела на величину до 6 км.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Селиванов В.В. и др. Средства поражения и боеприпасы: учебник для технических вузов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 984 с.
2. Селиванов В.В. и др. Боеприпасы: учебник для технических вузов в двух томах. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – Т.2. – 551 с.
3. Балаганский И. А., Мержиевский Л. А. Действие средств поражения и боеприпасов: учебное пособие. – Новосибирск: НГТУ, 2017. – 408 с.
4. Тяжелая артиллерия Советского периода. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.xliby.ru/transport_i_aviacija/tehnika_i_vooruzhenie_1999_01/p10.php (дата обращения 02.04.2024).
5. Боеприпасник – 203 – F – 625d. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://soviet-ammo.usoz.ru/index/203_f_625d/0-219 (дата обращения 02.04.2024).

6. Палымский И.Б. Оценка эффективности осколочно-фугасных боеприпасов // Сб. материалов Межд. Научного конгресса «Гео-Сибирь-2023». – Т.8, №2. – Новосибирск: СГУГиТ, 2023. – С. 164–176.
7. Манзон Б.М. MAPLE V Power Edition: монография. – М.: Информационно-издательский дом «Филинь», 1998. – 240 с.
8. Дьяконов В.П. Математическая система MAPLE V R3/R4/R5: монография. – М.: Солон, 1998. – 399 с.
9. Дьяконов В.П. Справочник по MathCAD Plus 7.0 PRO: монография. – М.: СК ПРЕСС, 1998. – 345 с.
10. Дьяконов В.П. Справочник по MathCAD Plus 6.0 PRO: монография. – М.: СК ПРЕСС, 1997. – 336 с.
11. Сталь Гадфильда. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Сталь_Гадфильда (дата обращения 02.04.2024).
12. Расчет прочности цилиндрической оболочки. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://nomogramka.info/beam/thickness%20cylindrical%20wall/thickness%20cylindrical%20wall.htm> (дата обращения 02.04.2024).
13. Мержиевский Л. А. Численное моделирование пробивания преград цилиндрическим ударником: сборник научных трудов. – Новосибирск: ИГ СО РАН СССР, 1984. – С. 86–91.
14. Merzhievsky L.A., Resnynsky A.D. The role of numerical simulation in the study of high-velocity impact // Inter. Journal of Impact Engineering. – 1995. – V.17. – P. 559–570.
15. Агурейкин В.А., Крюков Б.П. Метод индивидуальных частиц для расчета течений многокомпонентных сред с большими деформациями // Численные методы механики сплошной среды. – Новосибирск. – 1986. – Т.17. – № 1. – С.17–31.

© И. Б. Палымский, 2024