

Copyright © 2014 by Academic Publishing House *Researcher*



Published in the Russian Federation
Vestnik policii
Has been issued since 1907.
ISSN: 2409-3610
Vol. 1, No. 1, pp. 30-39, 2014

DOI: 10.13187/issn.2409-3610
www.ejournal21.com



Criminalistics

UDC 517.958:52/59

On the Issue of Examination of Penetration of Thin Plates by Low-Speed Penetrators

¹Yuliya V. Ganziy

²Nikolas V. Mitiukov

³Elena L. Busygina

¹⁻³Kamsky Institute of Humanities and Engineering Technology, Russian Federation

¹Master

E-mail: ganziy@list.ru

²Professor

E-mail: nico02@mail.ru

³Dr.

E-mail: bel28@rambler.ru

Abstract

This work illustrates that existing methodologies for calculating the thickness of a barrier to be penetrated do not work for describing the motion of low-speed penetrators in thin plates. The author proposes an approach whereby to be able to describe the penetration of thin plates one should increase the aerodynamic drag coefficient.

Keywords: solid body; penetration; thin-walled shell; low-speed body.

Введение

Проблема изменения баллистических параметров пули при пробивании преграды традиционно решается проведением баллистических экспериментов с конкретными пулями и конкретными преградами, после чего эти данные обрабатываются в виде графиков и номограмм для использования в баллистических экспертизах. Однако в последнее время появилось много нестандартных поражающих элементов, для которых характерны невысокие (дозвуковые), скорости полета. Это шарики от подшипников, гайки, болты и прочие поражающие элементы, снаряжаемые в самодельные взрывные устройства, баллистическая экспертиза пенетрационных свойств которых базируется нередко лишь на мнении экспертов. Использование традиционных аналитических методик расчета также дает неприемлемо большую погрешность [1]. Поэтому целью данной работы является разработка достаточно простого способа расчета пробивания тонких пластин низкоскоростным пенетратором.

Общие соображения

Скорость движения penetrатора (поражающего элемента) в преграде обычно намного меньше скорости распространения волны упругой деформации, а потому в первом приближении можно считать, что преграда сопротивляется движению penetrатора как единое целое. Ударное воздействие осуществляется за счет кинетической энергии поражающего элемента, в момент удара имеющей значение

$$K = \frac{mv^2}{2},$$

где m – масса penetrатора, кг; v – его скорость в момент удара.

В процессе движения penetrатора, его кинетическая энергия снижается, вплоть до нуля, поэтому по значению K можно оценить максимальную толщину пробиваемой преграды, которую способен пробить penetrатор в момент удара. Кинетическая энергия расходуется на совершение работы по движению penetrатора в преграде:

$$W = FL = maL,$$

где F – сила сопротивления преграды движению penetrатора, Н, L – пройденный penetrатором путь в преграде до его полной остановки, м; a – ускорение торможения, м/с². Если в уравнении работы подставить полную толщину преграды T , это уравнение даст такую кинетическую энергию, которой должен обладать penetrатор, чтобы ее пробить (по терминологии Н. Окуна [2] – "Морской баллистический предел"), при условии, что удар осуществляется по нормали к поверхности.

С другой стороны, сила сопротивления F будет также пропорциональна толщине пробиваемой преграды:

$$W = k T^2,$$

где k – коэффициент пропорциональности, имеющий физический смысл, как своего рода коэффициент "качества" преграды. Поэтому в случае нормального удара можно найти толщину пробиваемой преграды в идеальном случае:

$$T = \sqrt{\frac{m}{2k}} v.$$

Для преобразования полученного уравнения к безразмерному виду необходимо от значения пробиваемой преграды перейти к безразмерному комплексу T/D , где D – калибр penetrатора. И, наконец, для учета косоугольного удара необходимо умножить правую часть уравнения на $\cos \alpha$, где α – угол встречи penetrатора с преградой.

Поэтому формулу пробивания для определения необходимой скорости penetrатора, достаточной для пробивания преграды, можно записать окончательно как:

$$v = KC \frac{T^t D^d}{M^m \cos^a \alpha},$$

где K – постоянная; C – коэффициент "качества" преграды (зависит от применяемого материала: дерево, броня, кевлар и т.д., а также от качества выделки этого материала, например, сорта брони); t , d , m и a – показатели степеней, которые будут отличать одну эмпирическую формулу от другой. Как видно, для идеального случая, эти коэффициенты равны: $t = 1$; $d = 0$; $m = 0,5$; $a = 1$.

В результате информационного поиска нами было обнаружено свыше полутора десятков различных эмпирических формул для расчета пробивания различных сортов брони артиллерийским снарядом [3]. Однако в них решалась обратная задача – определение толщины пробиваемой брони снарядом с заданными свойствами, в связи с этим универсальная эмпирическая зависимость принимает вид:

$$\frac{T}{D} = K \frac{v^w M^m \cos^a \alpha}{C D^d},$$

Как видно, для идеального случая, эти коэффициенты равны: $w = 1$; $d = 1$; $m = 0,5$; $a = 1$. Данные информационного поиска сведены в табл. 1. В указанную формулу не вписываются два случая – формула, принятая для флота Великобритании конца XIX в:

$$\frac{T}{D} = 0,001644 \left(v^2 \frac{M}{D^3} - 0,14v^2 \right)^{0,5};$$

и формула Brainard, полученная для конструкционной стали:

$$\frac{T}{D} = 0,0025 \left(v \frac{M}{D^3} \right) - 1,5 D^{-1}.$$

Таблица 1.

Эмпирические формулы бронепробивания

Автор	Страна, год	K	C	w	m	a	d
Броня из кованной стали							
Fairbairn	Англия, приблизительно 1865 г.	0,00076920	–	1,00	0,50	–	1,50
Tressider	Англия, начало 1870-х гг.	0,00003798	–	1,50	0,50	–	1,50
Крупп	Германия, начало 1870-х гг.	0,00004643	–	1,50	0,75	–	2,25
Де Марр	Франция, конец 1870-х гг.	0,00002778	–	1,54	0,77	–	2,15
Гаврская формула	Франция, 1870-е гг.	0,00002887	–	1,43	0,71	–	1,71
Noble	?	0,00016340	–	1,25	0,62	–	1,62
Флот США	Конец XIX в.	0,00180000	–	0,98	0,49	–	1,47
Фролов	Россия, конец XIX в.	0,00173600	–	1,00	1,00	–	3,00
Maitland	?	0,00000187	–	2,00	1,00	–	3,00
Цементированная сталь							
Гарвей	США, приблизительно 1895 г.	0,00003466	–	1,33	0,67	–	1,67
Крупп	Германия, примерно 1895 г.	0,00066590	–	1,00	0,50	–	1,50
Гарвеезированная сталь, пробиваемая снарядом с "макаровским колпачком"		0,00008582	–	1,25	0,62	–	1,62
Универсальные формулы бронепробиваемости							
Де Марр	Франция, примерно 1890 г.	0,00005021	1,43	1,43	0,71	2,14	2,07
Крупп	Германия, 1930-е гг.	0,30386000	1,25	1,25	0,62	–	1,62
Томпсон	США, 1930-е гг.	1728,04000	2,00	2,00	1,00	2,00	3,00

Примечание: все формулы приведены к британской системе мер и весов

В Советском Союзе и России наибольшее распространение получила формула Якоба де Марра. Применительно для нее в системе Си: $t = 0,7$; $d = 0,75$; $m = 0,5$; $a = 1$. В ряде формул C

и $\cos^a \alpha$ объединяются, чтобы определить качество брони при косом ударе, из-за чего в таких формулах отсутствует угол [2].

Проблема учета угла встречи пенетратора с преградой не настолько очевидная, как это кажется на первый взгляд. Во-первых, следует брать не угол наклона траектории пенетратора, а угол наклона продольной оси пенетратора, поскольку пуля и снаряд в полете обычно имеет некоторую прецессию и, как следствие, угол рысканья в момент встречи. Хотя значения угла рысканья для хороших орудий и стрелкового оружия небольшое, оно будет иметь место любом случае и фактически является следствием вращения снаряда или пули, поскольку в основном они стабилизируются вращением (за исключением пушечных ядер, для ранних гладкоствольных систем или современных гладкоствольных систем, стабилизация которых осуществляется за счет большой скорости, как например, на появившихся после Второй мировой войны американских снарядов класса APFSDS [2]).

Факторы, определяющие бронепробиваемость снаряда, изменяются довольно быстро при его движении в плите. Так головная часть снаряда постепенно разрушается, а подрезы-локализаторы ограничивают распространение разрушения к дну снаряда. Поэтому реально в ударе участвует не масса M , а значительно меньшая. Этот эффект следует учесть показателем степени m меньшим 0,5 (в формуле Якоба де Марра $m = 0,5$, что лишний раз свидетельствует о том, что она описывает идеальный случай).

Так по формулам Н. Окуна для цементированной броневой плиты (типа компаунд, Гарвей или Крупп) показатель степени для массы m только 0,2, притом, что показатель степени для скорости 12,1 (в шесть раз больше, чем может дать уравнение кинетической энергии). Причина тут единственная – кинетическая энергия идет на деформацию самого снаряда: металл на кончике снаряда тормозится и теперь уже кинетическая энергия снаряда направлена не на пробитие плиты, а на проталкивание металла кончика. Если не учитывать сминание кончика, показатель степени у массы снаряда был бы около нуля и такие снаряды бы были минимальной массы – много меньше, чем масса всех реальных снарядов.

Следующая сложность при использовании вышеприведенной формулы, состоит в учете коэффициента пропорциональности K , стоящем в правой части. Если справедлива гипотеза о равенстве кинетической энергии и работы, то, как показано $K = 0,5$. Фактически же значения K лежат в интервале от 0,5 до 1,0.

При $K = 0,5$ механизм пробивания преграды заключается в следующем: преграда состоит из множества элементарных слоев и каждый слой сопротивляется по отдельности. Параметры пенетратора на выходе из очередного слоя являются параметрами входа для следующего. Это как раз и будет тот идеальный случай, при котором соблюдается равенство работы и кинетической энергии. Поэтому общая сила сопротивления определяется как сумма элементарных сил сопротивления каждого слоя. Отверстие от пенетратора в этом случае будет иметь идеально круглую форму.

С другой стороны, когда $K = 1,0$ пробивание преграды будет аналогично, действию подкалиберного бронебойного снаряда. Пробивая броню, сердечник находится под всесторонним сжатием, из-за этого происходит "выдавливание" материала плиты с задней кромки, подобно выдавливанию пробки из бутылки. В этом случае с самого первого мгновения соударения в ударе участвует вся толщина преграды. Форма отверстия при этом будет сопровождаться характерными лепестками на внутренней поверхности.

Если для поверхностноуплотненной (цементированной) брони наиболее характерен второй случай, то для пластичной плиты картина пробивания в значительной степени определяется толщиной. Так при малых толщинах пластичная броня дает характерную воронку или вмятину в области удара. Причем, с увеличением площади воронки растет и доля кинетической энергии, направленная на деформацию соседних слоев. Это аналогично локальному увеличению твердости, что равносильно выходу коэффициента K за интервалы 0,5...1,0. При средних толщинах на тыльной стороне плит появляются характерные лепестки, что указывает на реализацию второго механизма пробивания, а пластичные плиты большой толщины пробиваются подобно движению снаряда в грунте [4, 5], что указывает на первый механизм. То есть, коэффициент K зависит от толщины преграды и с ее увеличением снижается. Таким образом, картина пробивания зависит, в том числе и от толщины преграды.

Особенности пенетрации тонких пластин

Наибольшей практической ценностью рассмотренных выше методик по пробиванию брони артиллерийским снарядом обладает определение критических скоростей [3]. При этом существует два баллистических предела, условно называемые Н. Окуном "морским" и "сухопутным" [2]. В первом случае необходимо, чтобы при прохождении преграды снаряд обладал хотя бы минимальной скоростью для выполнения своей задачи в заброневом пространстве (поражение корабля противника). Во втором случае, при поражении танков противника, достаточно достижение носика снаряда задней кромки брони. В этом случае, как правило, создаются осколки, выводящие из строя личный состав и вооружение танка. В случае же пробивания тонкостенных оболочек, когда толщина пластины мала по сравнению с диаметром пенетратора, требуется создание новых методик расчета. Кроме того, во всех случаях рассматриваются высокоскоростные пенетраторы, тогда, как поражающие элементы кустарных взрывных устройств имеют дозвуковые скорости полета.

В соответствии с рассмотренными аналитическими моделями пробивания плит [3] под данный случай подходит случай пенетрации мягкой конструкционной стали. Поскольку в конце XIX – начале XX вв. производство броневых плит малой толщины сопровождалось непреодолимыми технологическими трудностями, на их изготовление шла обычная конструкционная сталь, по терминологии того времени "броня Сименс-Мартин" (мартеновская сталь) [1]. Для оценки пробиваемых конструкций толщиной менее 2,5" Брайнард [7] рекомендует следующую зависимость:

$$T = \frac{M v}{400 D^2} - 1,5.$$

Видно, что в данной формуле нарушается соотношение между пробиваемой броней и кинетической энергией (скорость в первой степени), что можно объяснить сильным торможением снаряда в вязкой преграде, а также небольшой толщиной плит, которые пробиваются навывлет в большинстве случаев. Поэтому здесь стоял вопрос в оценке не возможных пенетрационных свойств снаряда, а насколько уменьшается скорость снаряда при пробитии. Обращает на себя внимание постоянный член, вероятнее всего взятый как систематическая погрешность при необходимости приспособить уже известные формулы пробивания толстых плит к конструкционной стали.

В качестве примера рассмотрим процесс пробивания тонкого листа толщиной 2,5 мм стальным шариком диаметром 72 мм, массой 1,55 кг. Преобразуя исходные данные к американской системе мер и весов получается: $M = 3,417$ фунт, $D = 2,8$ ", $T = 0,1$ ". В результате критическая скорость для пробития заявленной толщины получается 459 м/с (1505 фт/с), что явно противоречит здравому смыслу. Отсюда можно сделать вывод, что рассмотренные методики не подходят для низкоскоростных пенетраторов.

Использование пакета ANSYS для решения задачи пробивания тонких пластин

Эта задача была решена с использованием программного пакета ANSYS (процедура LS-Dyna), ранее уже использовавшаяся для решения подобного рода задач [6]. В качестве модели была рассмотрена плоская бесконечная пластина толщиной 2,5 мм. Пластина пробивалась шаром из абсолютно твердого материала (RIGID – "жесткий", 020 модель базы данных LS-Dyna) радиусом 36 мм. Для описания поведения оболочки выбрана модель частично-линейно-пластичного материала (PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY – 024 модель базы данных LS-Dyna).

В основе моделирования процесса удара в LS-Dyna лежит лангранжев подход, базирующийся на уравнении сохранения массы, количества движения и внутренней энергии:

$$\dot{\rho} + \rho \operatorname{div}(v) = 0,$$

$$\rho \ddot{x} = \rho g + \operatorname{div}(\sigma)$$

и

$$\rho \dot{u} = \sigma : D + pr - \nabla \cdot q.$$

где: ρ – плотность; v – скорость, \ddot{x} – ускорение; σ – тензор напряжений Коши; g – ускорение свободного падения, \dot{u} – скорость изменения внутренней энергии; D – тензор деформации скорости; r – интенсивность объемного теплового источника; q – тепловой поток; ∇ – оператор Гамильтона; « \cdot » – скалярное произведение; « $:$ » – двойное скалярное произведение.

При ударе самое неблагоприятное воздействие происходит при прямом ударе, когда траектория пенетратора и поверхность взаимно перпендикулярны. Так как воздействие на пластину точечное, был рассмотрен квадратный фрагмент поверхности шириной 300 мм, в зоне которого происходят все упругопластические изменения, и анализировался процесс пробивания шаром лишь этого участка.

Были рассмотрены несколько начальных скоростей до 90 м/с. Учитывая возможность действия воздуха вокруг шара, процесс пробития начинал моделироваться с удаления шара на 1 мм от оболочки. Результаты математического моделирования процесса пробивания (проникновения) шара в поверхность оболочки представлены на рис. 1.

Как показали численные эксперименты, в модельном случае частичная пенетрация ("сухопутный баллистический предел" по Н. Окуну), сопровождающаяся пластическими деформациями оболочки наступает при скоростях свыше 10 м/с, а полная ("морской баллистический предел" по Н. Окуну) – при скоростях шарика свыше 89 м/с.

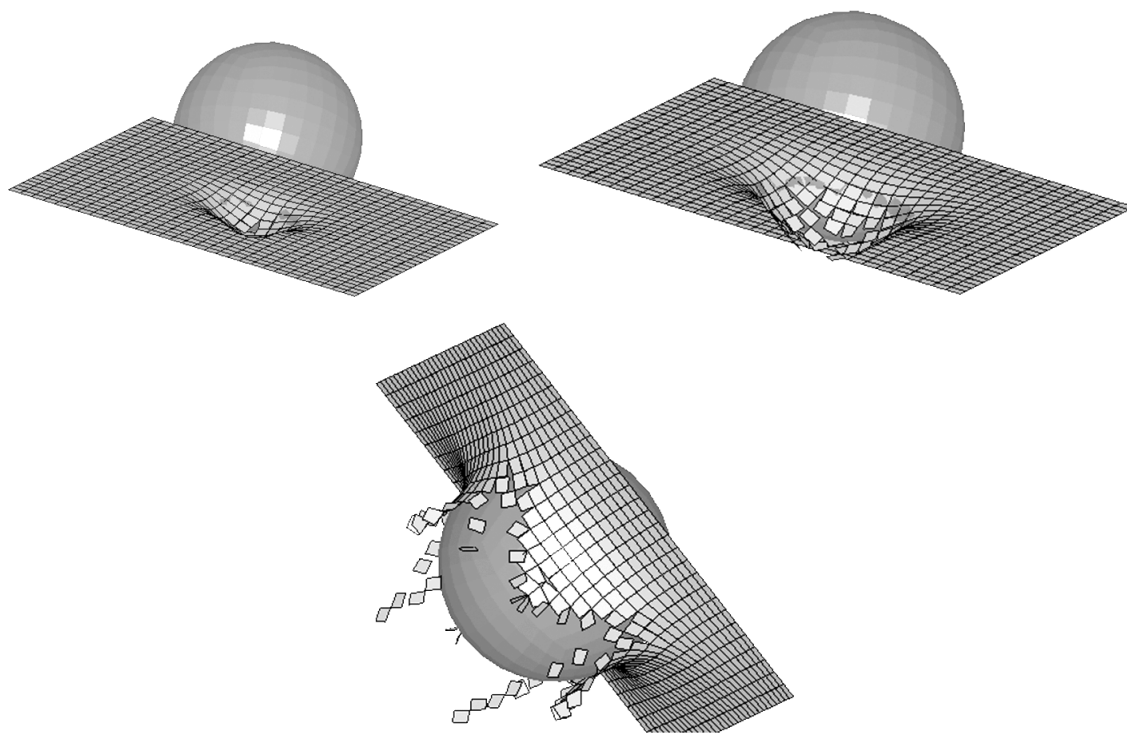


Рис. 1. Процесс пенетрации оболочки в различные моменты времени при начальной скорости 89 м/с

На рис. 2. предоставлены графики изменения кинетической энергии пенетратора при разных скоростях. Видно, что условие пробития или непробития можно определить уже на первых секундах удара. В случае пробития зависимость кинетической энергии имеет вогнутый вид с выходом на горизонтальную асимптоту, равную кинетической энергии после пробития (рис. 2, а). В случае непробития зависимость имеет выгнутый вид с выходом в ноль во время, когда пенетратор прекращает свое движение (рис. 2, б). Поскольку масса в ходе пенетрации остается без изменения, зависимости для изменения скорости качественно повторяют вид функций, изображенных на рис. 2 – вогнутый при пробитии, выгнутый при непробитии. На рис. 3 представлены графики изменения внутренней энергии. И снова при

условии пробития или непробития функции различаются качественно: при пробитии энергия имеет выгнутый вид и выходит на горизонтальную асимптоту, соответствующую уровню энергии при преодолении преграды, а при непробитии энергия имеет вогнутый вид и стремится к бесконечности. Полная энергия, представляющая собой сумму кинетической и внутренней, по функциональному виду напоминает характер кинетической энергии (рис. 4).

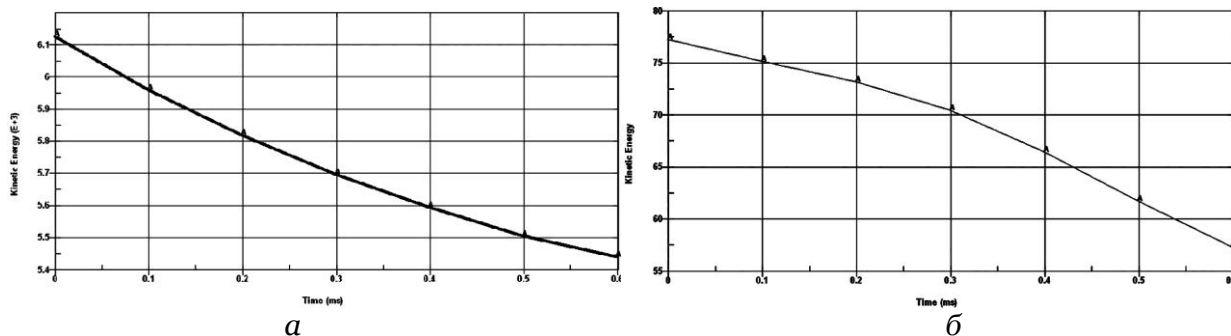


Рис. 2. График изменения кинетической энергии шара от времени при начальной скорости $v_0 = 89$ м/с (а) и $v_0 = 10$ м/с (б)

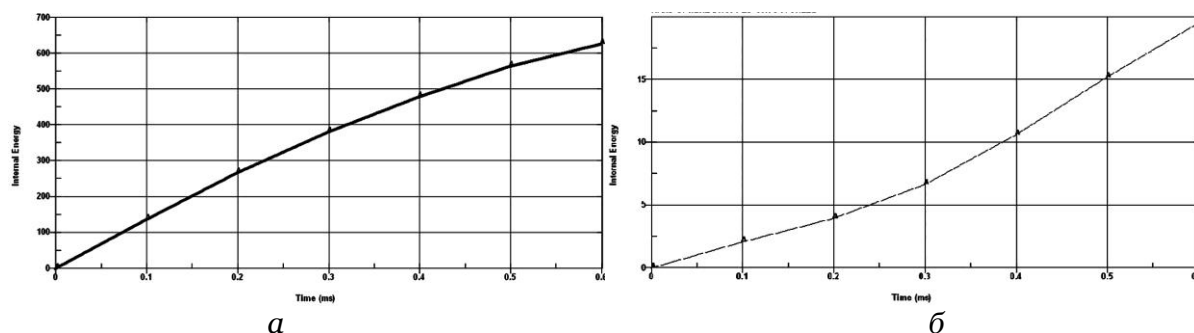


Рис. 3. График изменения внутренней энергии шара от времени при начальной скорости $v_0 = 89$ м/с (а) и $v_0 = 10$ м/с (б)

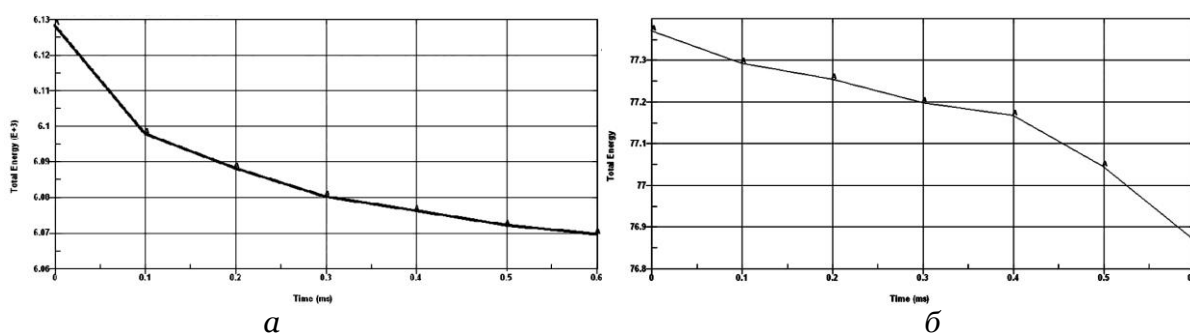


Рис. 4. График изменения полной энергии шара от времени при начальной скорости $v_0 = 89$ м/с (а) и $v_0 = 10$ м/с (б)

Поскольку величина уменьшения полной энергии в процессе пенетрации равна работе сил сопротивления, появляется возможность оценить коэффициент сопротивления. В этом случае, зная зависимость кинетической энергии K от перемещения x , появляется возможность определить текущую скорость v , и значит оценить коэффициент сопротивления при пробивании пластины, аналогичный коэффициенту аэродинамического сопротивления c_x по известной зависимости [8]:

$$c_x = \frac{4m}{\rho S_m (x_2 - x_1)} \frac{v_1 - v_2}{v_1 + v_2},$$

где ρ – плотность среды, S_m – площадь мишеля, m – масса пенетратора; v_1 – скорость в точке x_1 , v_2 – скорость в точке x_2 .

Результаты расчетов представлены в таблице 2 на рис. 5.

Таблица 2

Значения коэффициента сопротивления при движении пенетратора в преграде

Номер точки	K_i , Дж	x_i , м	$\bar{x} = \frac{x_i}{R}$	v_i , м/с	c_x
0	6130	0,0000	0,0000	88,93637	–
1	5950	0,0067	0,1861	87,62088	1411,889
2	5825	0,0130	0,3611	86,69561	1069,711
3	5690	0,0210	0,5833	85,68509	930,337
4	5598	0,0280	0,7778	84,98956	739,138
5	5500	0,0340	0,9444	84,24235	934,295
6	5450	0,0410	1,1389	83,85856	414,101
					–

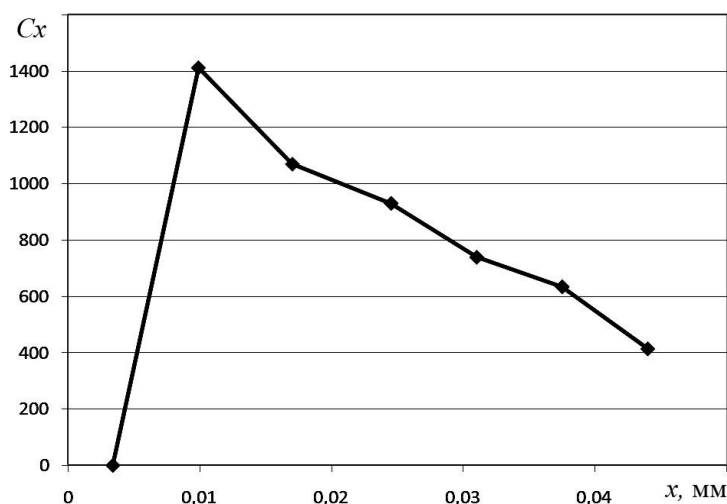


Рис. 5. Значения локального коэффициента сопротивления при пробивании тонкой пластины

Как видно из рисунка 5, при внедрении пенетратора в пластину, локальный коэффициент сопротивления резко возрастает до значения x порядка полутора-двух радиусов пенетратора, после чего плавно снижается.

Выводы

1. Существующие аналитические методики расчета толщины пробиваемой преграды не годятся для низкоскоростных пенетраторов и тонких пластин;
2. В соответствии с предложенной методикой, по которой тонкая пластина заменяется эквивалентным повышением сопротивления среды, коэффициент аэродинамического

сопротивления при пробивании стальной пластины достигает 1412 в начальный момент времени, снижаясь до 414 при вылете penetrатора в пространство за пластиной.

Примечания:

1. Митюков Н.В. Математические модели и программные средства для реконструкции военно-исторических данных: Дисс. ... д-ра техн. наук. Ижевск, 2010. 373 с.
2. Okun N. Major Historical Naval Armor Penetration Formulae. URL: <http://www.warships1.com>.
3. Митюков Н.В. Методики определения бронепробиваемости // Морской сборник. 2008. № 1. С. 37–41.
4. Коробейников А.В., Мингалев В.В., Митюков Н.В. О возможностях динамического зондирования в археологии // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия "История, Политология, Экономика, Информатика". 2008. Выпуск 7. № 13 (53). С. 59–66.
5. Митюков Н.В., Ганзий Ю.В. К вопросу о применимости ANSYS LS-DYNE для расчета движения в грунтах // Вестник ИЖГТУ. 2010. № 1. С. 121–122.
6. Муйземнек, А.Ю. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA / А.Ю. Муйземнек, А.А. Богач. Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2005. 106 с.
7. Brainard F.R. Blindaje Moderno // Revista General de la Marina. 1891. № 29. Julio. P. 47–62.
8. Шапиро Я.М. Внешняя баллистика. М.: Оборонгиз, 1946. 408 с.

References:

1. Mityukov N.V. Matematicheskie modeli i programmnye sredstva dlya rekonstruktsii voenno-istoricheskikh dannyykh: Diss. ... d-ra tekhn. nauk. Izhevsk, 2010. 373 s.
2. Okun N. Major Historical Naval Armor Penetration Formulae. URL: <http://www.warships1.com>.
3. Mityukov N.V. Metodiki opredeleniya broneprobivaemosti // Morskoi sbornik. 2008. № 1. S. 37–41.
4. Korobeinikov A.V., Mingalev V.V., Mityukov N.V. O vozmozhnostyakh dinamicheskogo zondirovanie v arkheologii // Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Istoriya, Politologiya, Ekonomika, Informatika". 2008. Vypusk 7. № 13 (53). С. 59–66.
5. Mityukov N.V., Ganzii Yu.V. K voprosu o primenimosti ANSYS LS-DYNE dlya rascheta dvizheniya v gruntakh // Vestnik IzhGTU. 2010. № 1. S. 121–122.
6. Muizemnek, A.Yu. Matematicheskoe modelirovanie protsessov udara i vzryva v programme LS-DYNA / A.Yu. Muizemnek, A.A. Bogach. Penza: Informatsionno-izdatel'skii tsentr PGU, 2005. 106 s.
7. Brainard F.R. Blindaje Moderno // Revista General de la Marina. 1891. № 29. Julio. P. 47–62.
8. Shapiro Ya.M. Vneshnyaya ballistika. M.: Oborongiz, 1946. 408 s.

УДК 517.958:52/59

К вопросу об экспертизе пробивания тонких пластин низкоскоростным penetrатором

¹ Юлия Валентиновна Ганзий

² Николай Витальевич Митюков

³ Елена Леонидовна Бусыгина

¹⁻³ Камский институт гуманитарных и инженерных технологий, Российская Федерация

¹ магистр техники и технологий

E-mail: ganziy@list.ru

² д-р техн. наук, доцент

E-mail: nico02@mail.ru

³ канд. физ-мат. наук, доцент

E-mail: bel28@rambler.ru

Аннотация. В работе показано, что существующие аналитические методики расчета толщины пробиваемой преграды не подходят для описания движения низкоскоростных пенетраторов в тонких пластинах. Предложен подход, в соответствии с которым, для описания пробивания тонких пластин предложено увеличивать коэффициент аэродинамического сопротивления.

Ключевые слова: твердое тело; пенетрация; тонкостенная оболочка; низкоскоростное тело.