

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»**

**16+
ISSN 2071-6168**

**ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 4

**Тула
Издательство ТулГУ
2024**

УДК 623.4

DOI: 10.24412/2071-6168-2024-4-159-160

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ПРОБИТИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ЗАЩИТНЫХ ПЛАСТИН

А.Н. Павлюченко, М.С. Воротилин, С.В. Потоцкий, А.А. Громов, А.С. Ишков

В статье представлено комбинированное экспериментально-численное исследование, в котором проведена оценка баллистических возможностей трех различных типов защитных пластин. Для каждой пластины была измерена скорость до и после проникновения с помощью сверхбыстрой камеры и программного комплекса. Экспериментальные результаты были сравнены с численными, полученными с использованием метода конечных элементов. Были сделаны выводы относительно эффективности каждой из трех рассмотренных многослойных пластин. Валидация численных моделей открывает путь для будущей оценки других типов систем защиты, изготовленных из более легких материалов для обшивки многослойных плит, а именно армированных волокнами композитов.

Ключевые слова: системы баллистической защиты, стрелковое оружие, кинетическая энергия, метод конечных элементов.

Баллистические защитные пластины используются в военных целях для обеспечения успешной защиты от пуль. Поведение этих систем в условиях войны оценивается в основном путем изучения воздействия пули на пластину. В исследовании, предпринята попытка оценить баллистические характеристики трех различных типов защитных пластин путем экспериментальных измерений и численного моделирования. Принимаются во внимание различные параметры, которые могут оценить эффективность этих систем: скорость до проникновения v_i (скорость удара), скорость после проникновения v_r (остаточная скорость), а также диаметр и вид отверстия, сделанного пулей в пластине.

Основной целью исследования была оценка взаимодействия снаряда с пластиной при ударе пулями калибра 7,62x39 мм и пулями НАТО калибра 5,56x45 мм со стальным сердечником. По каждой пластине было произведено три выстрела с расстояния 10 м: два – пулей калибра 7,62 и один – пулей калибра 5,56.

Три различных пакета пластин для баллистической защиты были выбраны следующим образом: P1: стальная обшивка + алюминиевая обшивка – алюминиевый сердечник + алюминиевая обшивка; P2: алюминиевая обшивка – алюминиевая сотовая сердцевина – алюминиевая обшивка; P3: стальная обшивка – алюминиевая медовая сердцевина гребня – стальная обшивка (рис. 1). Плита типа 1 имеет стальную оболочку для прочности и долговечности, за которой следует алюминиевая оболочка для ее легкого веса, алюминиевую сотовую сердцевину для поглощения энергии и еще одну алюминиевую оболочку для дополнительной защиты. Пластина типа 2 состоит из алюминиевой обшивки для придания ей легкости, сотовой сердцевины из алюминия для поглощения энергии и другой обшивки из алюминия для дополнительной защиты. Плита типа 3 имеет стальную оболочку для прочности и долговечности, алюминиевую сотовую сердцевину для поглощения энергии и еще одну стальную оболочку для дополнительного упрочнения. В таблице 1 указаны размеры, масса и поверхностная плотность пластин.

Все пластины были закреплены в специально разработанных рамах, высоту которых можно регулировать и которые можно поворачивать для получения четырех различных углов, а именно 0°, 15°, 30° и 45°.

Съемки проводились сверхбыстрой камерой со скоростью до 21 000 кадров в секунду. Программное устройство позволяет обрабатывать полученные изображения, измерять снятые объекты, а также конвертировать и воспроизводить полученные видеофайлы. Для каждой пластины были измерены скорость до пробития v_i (скорость удара), скорость после пробития v_r (остаточная скорость), а также диаметр и форма отверстия, сделанного в пластине пулей. Кроме того, на основе измеренных величин было рассчитано минимальное расстояние, на которое проникновение больше не происходит. Все полученные результаты использовались для составления выводов об эффективности баллистической защиты каждой пластины.

Изображения пластины P1 спереди и сзади после съемки представлены на рис. 2. Для расчета скорости пули как при входе в пластину, так и после пробития использовалось программное обеспечение для расчета скорости пули как у входа в пластину, так и после проникновения с помощью процедуры, включающей несколько этапов. Сначала расстояние между двумя точками оптического прицела было откалибровано с использованием значения 50 мм. Затем измеряли расстояние между двумя положениями пули с интервалом времени в 1 мс, как показано на рис. 3. Программное обеспечение автоматически измеряет расстояние d между двумя точками, отмеченными на фотографиях, и вычисляет скорость пули. За очень короткое время в 1 мс изменение скорости незначительно, поэтому его можно рассчитать, как отношение между измеренным расстоянием d и временем $t = 1$ мс. Для всех трех рассмотренных защитных пластин использовалась одна и та же технология.

Все пластины были пробиты пулями обоих типов. Как видно из таблицы 1, наименьшая скорость после удара (остаточная скорость) и наибольшее замедление пули были получены в конфигурации P3, которая, таким образом, демонстрирует наибольшее поглощение кинетической энергии при соударении со снарядом: снижение начальной (ударной) скорости на 31,71%, что означает, что 53,37% кинетической энергии пули было поглощено защитной пластиной.

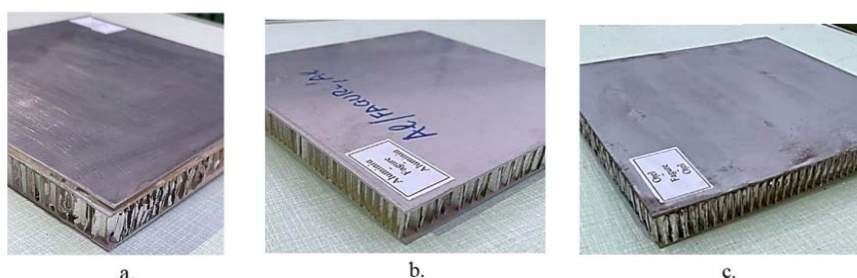


Рис. 1. Изученные защитные пластины: а – P1; б – P2; с – P3

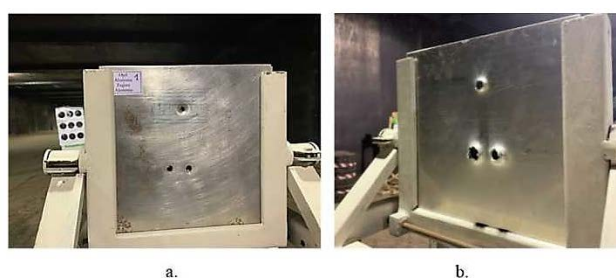


Рис. 2. Пластина P1 после стрельбы: а – вид спереди; б – вид сзади.

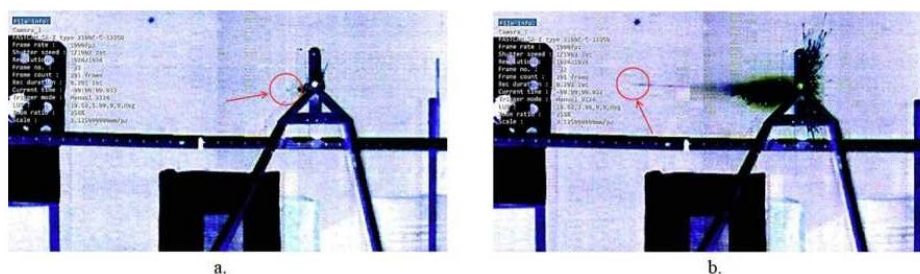


Рис. 3. Стрельба в плиту P1: а – положение пули после удара в момент t ; б – положение пули после удара в момент $t + 1$ мс

Таблица 1

Размер и масса изученных пластин

Характеристики	Тип пластины		
	P1	P2	P3
Длина [мм]	250	250	250
Ширина [мм]	250	250	250
Толщина [мм]	25	23	23
Толщина алюминиевого листа [мм]	2	-	-
Толщина стального листа [мм]	2	-	2
Толщина алюминия сотовым заполнителем [мм]	19	19	19
Масса плиты [кг]	1.835	0.810	2.100
Ареальная плотность [кг/м ²]	29.36	12.96	33.6

Хорошее поглощение энергии можно заметить также для P1 с показателем 49,83%, в то время как пластина P2 имеет самый низкий показатель. Скорости и диаметр отверстия, проделанного пулями, измеренные после выстрела, приведены в таблице 2, где m_b – масса пули.

Таблица 2

Результаты эксперимента

Пластина	Скорость пули [м / с]		Уменьшение скорости	Поглощение кинетической энергии	Диаметр перфорированного отверстия [мм]
	Скорость удара V_i	Остаточная скорость V_r			
P1	737	522	$\frac{v_i - v_r}{v_i} \cdot 100[\%]$ 29.17	$\frac{m_b v_i^2}{2} - \frac{m_b v_r^2}{2}$ 49.83	8.7
P2	740	665	10.14	19.24	8.4
P3	741	506	31.71	53.37	8.8

Исходя из конфигураций, использованных в экспериментальных измерениях, было выполнено численное моделирование с использованием метода конечных элементов. Модели кинематических материалов использовались из библиотеки программного обеспечения Ansys/LS Dyna, поскольку они могут описать ударную нагрузку и оценить

разрушение материала на границе раздела снаряд-пластина. Геометрическая модель для каждой из рассматриваемых пластин была разработана при их реальных размерах 250х250 мм при нормальном ударе с использованием экспериментально полученных скоростей удара v_i перечисленных в таблице 2.

Все степени свободы узлов по бокам пластин были ограничены. Ячейки сотовой сердцевины моделировались со стороной 5 мм и толщиной стенки 0,5 мм. Конечно-элементная модель пластины РЗ показана на рис. 4.

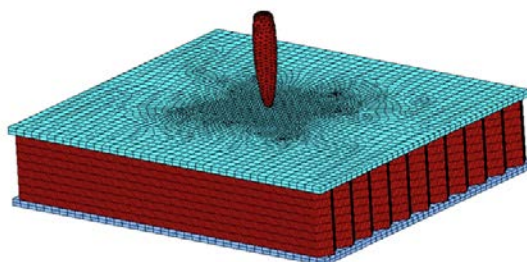


Рис. 4. Конечно-элементарная модель

Временная эволюция столкновения пули с пластиной РЗ показана на рис. 5. На этом рисунке можно заметить перфорацию пластины и появление возрастных пятен в определенных направлениях. На рис. 6 показано поле напряжений по Мизесу в момент времени $t = 80 \mu\text{с}$ для той же пластины.

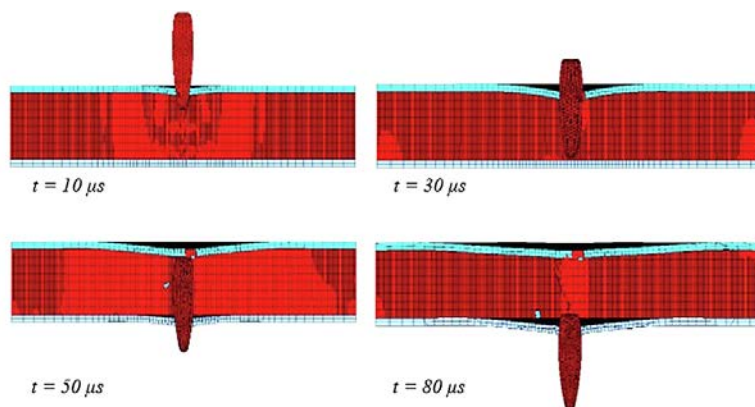


Рис. 5. Соударение пластины РЗ с пулей во времени

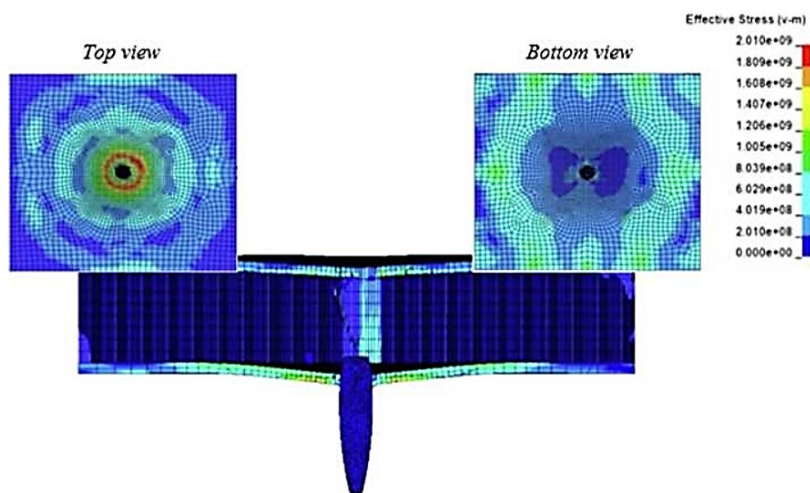


Рис. 6. Поле напряжений по Фон Мизесу при ударе при $t = 80 \mu\text{с}$

При численном моделировании программное обеспечение вычисляет кинетическую энергию пули. Когда пуля ударяется о броневую пластину, ее кинетическая энергия передается пластине, поскольку она деформируется и сопротивляется удару. Это приводит к потере пулей кинетической энергии, что приводит к снижению ее скорости. Программное обеспечение вычисляет это изменение кинетической энергии и использует его для определения новой скорости пули на выходе из пластины. Определены численные значения диаметра отверстия после обработки. Для обоих параметров сравнение результатов численного эксперимента приведено в таблице 3, где также подчеркивается относительная погрешность по отношению к экспериментальным значениям для проверки численных моделей.

Можно заметить очень хорошее соответствие между численными и экспериментальными результатами с разницей менее 5%. Можно сделать вывод, что численные модели проверены и могут быть в дальнейшем использованы для тестирования других конфигураций без дорогостоящих экспериментальных измерений.

Таблица 3

Сравнение результатов численного эксперимента

	Скорость	Скорость удара о пластину [м/с]	Остаточная скорость V_r [м/с]	Диаметр отверстия [мм]
P1	Экспериментальный	737	522	8.7
	Числовой		514	8.5
	Разница [%]	-	1.53	2.30
P2	Экспериментальный	740	665	8.4
	Числовой		653	8.1
	Разница [%]	-	1.80	3.57
P3	Экспериментальный	741	506	8.8
	Численный		495	8.4
	Разница [%]	-	2.17	4.55

Поскольку все рассмотренные пластины были пробиты пулями, оценка степени защиты, обеспечиваемой каждой пластиной, может быть произведена путем расчета минимального расстояния выстрела, с которого пуля больше не пробивает пластину полностью. Для этой цели необходимы другие численные анализы с различными уменьшающимися скоростями удара до тех пор, пока не произойдет полного проникновения.

Таким образом, для разработки новой системы баллистической защиты были проведены экспериментальные испытания трех различных защитных пластин. Также были разработаны и подтверждены численные модели рассматриваемых пластин путем сравнения с экспериментальными измерениями. Для каждой пластины были определены моменты удара, поле напряжений во время удара, изменение кинетической энергии и скорости пули во времени. Также были изучены внешний вид и размеры отверстий, сделанных пулями.

После экспериментальных измерений и численного анализа был сделан вывод, что пластина P3 (стальная оболочка с алюминиевой сотовой сердцевинкой) обеспечивает наибольшее поглощение кинетической энергии пули (53,37%) и, следовательно, наибольшее снижение скорости после пробития, а именно 31,7%. Следует также иметь в виду, что масса этой пластины и, следовательно, поверхностная плотность примерно на 13% выше, чем у пластины P1, что является недостатком.

Список литературы

1. П.Дж. Хейзелл, Г.Дж. Эпплби-Томас, Г. Кистер, Удар, проникновение и перфорация скрепленной пластиковой композитной панели, армированной углеродным волокном, высокоскоростной стальной сферой: экспериментальное исследование, J. Strain Anal. Eng. Des. 45 (2010). С. 439-450.
2. П.Дж. Хейзелл, Г. Кистер, К. Стеннетт, П. Бурк, Г. Купер, Нормальное и наклонное проникновение тканых углепластиковых пластин высокоскоростным стальным шаром, Состав. Научное приложение. 39 (5) (2008). С. 866-874.
3. Г. Чжу, У. Голдсмит, К.К.Х. Дхаран, Проникновение многослойного кевлара снарядами I. Экспериментальное исследование, Int. J. Структура твердых тел. 29 (1992). С. 399-420.
4. У. Хоу, Ф. Чжу, Г. Лу, Д.Н. Фанг, Эксперименты по баллистическому удару металлических сэндвич-панелей с сердцевинкой из вспененного алюминия, Int. J. Impact Eng 37 (2010). С. 1045-1055.
5. В.Л. Ченг, С. Лэнгли, С. Ито, Высокоскоростное воздействие толстых композитов // Инт. Дж. Impact Eng 29(2003). С. 167-184.

Павлюченко Алина Николаевна, младший научный сотрудник, alo.alina@bk.ru, Россия, Москва, 27 ЦНИИ МО РФ,

Воротилин Михаил Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, проректор, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Потоцкий Станислав Валерьевич, преподаватель, retvb@gmail.com, Россия, Пенза, Филиал ВА МТО,

Громов Алексей Александрович, курсовой офицер – преподаватель (соискатель), darkzgrom@gmail.com, Россия, Пенза, Филиал ВА МТО,

Ишков Антон Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, asihkov@mail.ru, Россия, Пенза, Пензенский государственный университет

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDIES TO ASSESS THE PENETRATION OF BALLISTIC PROTECTIVE PLATES

A.N. Pavlyuchenko, M.S. Vorotilin, S.V. Potocki, A.A. Gromov, A.S. Ishkov

The article presents a combined experimental and numerical study in which the ballistic capabilities of three different types of protective plates are evaluated. For each plate, the velocity before and after penetration was measured using an ultrafast camera and a software package. The experimental results were compared with the numerical results obtained using the finite element method. Conclusions were drawn regarding the effectiveness of each of the three multilayer plates considered. Validation of numerical models opens the way for future evaluation of other types of protection systems made of lighter materials for cladding multilayer plates, namely fiber-reinforced composites.

Key words: ballistic protection systems, small arms, kinetic energy, finite element method.

Pavlyuchenko Alyona Nikolaevna, junior researcher, alo.alina@bk.ru, Russia, Moscow, 27 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation,

Vorotilin Mikhail Sergeevich, doctor of technical sciences, professor, vice-rector, Russia, Tula, Tula State University,

Potocki Stanislav Valerievich, teacher, retvb@gmail.com, Russia, Penza, Branch of the VA MTO,

Gromov Alexey Alexandrovich, course officer – teacher (applicant), darkzgrom@gmail.com, Russia, Penza, Branch of the VA MTO,

Ishkov Anton Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, asihkov@mail.ru, Russia, Penza, Penza State University

УДК 621.396.41

DOI: 10.24412/2071-6168-2024-4-163-164

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛИНИЙ РАДИОСВЯЗИ ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН ПРИ ВЫБОРЕ ЧАСТОТ С УЧЕТОМ ИНФОРМАЦИИ О СОВОКУПНОСТИ ПАРАМЕТРОВ РАДИОСИГНАЛОВ И РАДИОПОМЕХ

А.Д. Лунёв, Д.Ю. Риконен, И.С. Стрелков, А.Г. Чернышов

Одним из путей, позволяющих повысить качество радиосвязи, является построения частотно-адаптивных радиолиний, отличительной особенностью которых является способность адаптации параметров радиолинии к условиям радиоэлектронной обстановки. При этом в процессе анализа и выбора рабочих частот учитывается информация только о текущем уровне помех, и исходя из нее принимается решение на адаптацию. Одним из способов повышения эффективности радиосвязи является учет при выборе частот информации о совокупности параметров радиосигналов и радиопомех. В данной статье описаны статистические модели сигналов и помех в декаметровом диапазоне волн. Проведен анализ влияния параметров сигналов и помех на вероятность ошибки при приеме элемента сигнала и вероятность связи с достоверностью не хуже заданной.

Ключевые слова: декаметровая радиосвязь, амплитуда радиосигнала, распределение Накагами, распределением Релея.

Радиосвязь в декаметровом диапазоне волн на расстояния больше 100-150 км использует механизм ионосферного распространения радиоволн. Вследствие флуктуации параметров ионосферы в радиоканале происходят замирания радиосигнала, которые выражаются в непрерывных случайных изменениях амплитуды и уровня радиосигнала в точке приема. Замирания радиосигнала разделяются на быстрые и медленные. Медленные замирания возникают в результате изменения поглощающих свойств ионосферы. Быстрые замирания возникают из-за многолучевого характера распространения радиоволн, что приводит к интерференции в точке приема большого числа лучей со случайными амплитудами и фазами.

Как известно из [2], амплитуды радиосигналов в канале с замираниями в большинстве случаев описываются распределением Релея с плотностью вероятностей вида:

$$\omega(U_c) = \frac{2U_c}{U_{c\text{эф}}^2} \exp\left(-\frac{U_c^2}{U_{c\text{эф}}^2}\right), \quad (1)$$

где U_c – амплитуда радиосигнала; $U_{c\text{эф}} = \sqrt{U_c^2}$ – эффективное значение амплитуды сигнала. Также известно, что при наличии в суммарном радиосигнале регулярной составляющей амплитуда радиосигналов описывается обобщенным распределением Релея (распределением Райса) с плотностью вероятностей вида:

$$\omega(U_c) = \frac{2U_c}{U_{c\text{эф}}^2} \exp\left(-\frac{U_c^2 + U_{cp}^2}{U_{c\text{эф}}^2}\right) I_0\left(\frac{2U_c U_{cp}}{U_{c\text{эф}}^2}\right), \quad (2)$$

где U_{cp} – амплитуда регулярной составляющей радиосигнала; $I_0(x)$ – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.