

А.В. Денисов¹, С.Г. Цуриков², А.А. Котосов³,
И.Е. Жуков², К.Н. Демченко¹, И.И. Сабонис¹

Параметры запреградного высту­па при непробитии керамического бронежилета

¹Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург

²5-й Испытательный центр войсковой части 09703, Санкт-Петербург

³Филиал Военной академии материально-технического обеспечения, Пенза

Резюме. Исследуются особенности формирования тыльной деформации бронепанели как основного механизма развития заброневого травм человека, защищённого бронежилетом, при его непробитии с применением современной исследовательской методики – высокоскоростной видеосъёмки. Анализ боевой патологии современных военных конфликтов показал, что попадание поражающего элемента в защищённое бронежилетом тело военнослужащего может приводить к получению им ранения, отличающегося по ряду показателей от «классической» огнестрельной травмы. Эти повреждения в зарубежной литературе принято называть тупой травмой позади брони, в отечественных источниках – заброневого локальной контузионной травмой. Закрывающая травма этой этиологии может проявляться как в виде повреждений кожи и подкожной клетчатки с формированием кровоизлияний, так и в ушибах внутренних органов, сопровождающихся в тяжёлых случаях разрывами печени и легких с развитием жизнеугрожающих осложнений – напряжённого пневмоторакса, внутрибрюшного кровотечения и т.п. Показано, что конструкция современных бронежилетов позволяет эффективно противостоять их пробитию большинством пуль патронов современного стрелкового оружия, однако не может полностью нивелировать величину ударного импульса, переданного через броню на защищаемый объект. Выявлены различия в физических процессах формирования тыльной деформации, которые могут приводить как к прямой деформации бронежилета в случае «мягкой» брони на основе баллистических тканей, так и к деформации с разрушением в «жёсткой» броне, изготовленной из керамической композиции. С помощью высокоскоростной видеосъёмки процесса воздействия поражающего элемента на бронепанель были визуализированы во времени особенности динамики поведения защитной композиции. Проведена оценка основных амплитудно-временных параметров процесса формирования тыльной деформации (выпучины), соответствующего 2-му пику давления в желатиновых блоках и вызывающего локальный удар, характеризующий развитие в объекте защиты временной полости, непосредственно влияющей на степень тяжести именно заброневого локальной контузионной травмы. Доказано, что анализ характеристик последующего процесса движения самой бронеплиты, приводящего к действию на торс «распределённого» удара, позволяет оценить возможную силу удара всей бронепанели по объекту защиты и спрогнозировать его биологические последствия в виде заброневого тупой травмы.

Ключевые слова: бронежилет, керамика, запреградный выступ, высокоскоростная видеосъёмка, заброневого травма, баллистическая ткань, импульс ударного давления, непробитие бронежилета, арамид.

Введение. Конструктивные решения, используемые в современных бронежилетах, позволяют не только эффективно противостоять их пробитию большинством пуль патронов современного стрелкового оружия, но и значительно рассредоточивать энергию, переданную боеприпасом броне для её разрушения и деформации, уменьшая тем самым величину импульса, действующего на защищаемый объект. Физические процессы формирования тыльной деформации могут иметь различную природу и приводить как к прямой деформации бронежилета в случае непробития тканевой («мягкой») брони, так и к деформации с разрушением в «жёсткой» броне (бронепанели) [9]. Однако в некоторых случаях у участка деформации бронематериала (чаще запреградного выступа) сохраняется достаточный потенциал для того, чтобы привести к повреждениям подлежащие ткани и органы груди, которые проявляются преимущественно симптомами закрытой травмы. Эти

повреждения в зарубежной литературе принято называть тупой травмой позади брони (behind-armor blunt trauma – BAVT), в отечественных источниках – заброневого локальной контузионной травмой (ЗЛКТ) [6]. В докладе об испытаниях материалов бронежилетов армией Соединённых Штатов Америки (США) «Фаза II» [11] дается развернутая характеристика использования керамических материалов в бронежилете. «...Керамические материалы успешно использовались в средствах индивидуальной бронезащиты (СИБ) для того, чтобы максимально устранить действие поражающих факторов стрелкового оружия. Они предпочтительнее для СИБ ещё и потому, что они легче, чем более традиционная броня, сделанная из металлических сплавов. Свойства, которые способствуют эффективности керамической брони, включают её высокую твердость, низкую плотность, достаточную эластичность и необходимую прочность на сжатие. Однако как автономный (самостоятельный) элемент

керамика не была бы особенно хороша из-за её низкой прочности при растяжении, лабильной реакции и высокой чувствительности даже к малым дефектам технологического происхождения, таким как поры и трещины. Следовательно, керамику целесообразно использовать в сочетании с другими материалами, такими как полимеры и металлы, для того чтобы сформировать многослойные составные объекты с целью обеспечения их высоких прочностных характеристик для предохранения груди человека от травмы».

Типичная керамическая бронепанель современного композитного бронезилов представляет собой плотный слой карбида бора или карбида кремния, поддерживаемый слоем полимера и/или металла, при этом снаружи она обертывается в плотнотканую баллистическую структуру (например, кевлар). Керамический слой разрушает поражающий элемент (пулю, осколок) и максимально рассеивает его кинетическую энергию. Слой полимерного состава и/или металлического сплава обеспечивает эластичность и герметичность, а также распределяет напряжения деформации от воздействия снаряда на большую область контакта [1].

В 1999 г. в Оксболе «Danish Army Combat School» под эгидой Североатлантического блока были проведены масштабные исследования заброневой травмы груди [12, 13]. В качестве подопытных животных были использованы свиньи. На испытание были представлены бронезиловы, стоящие на вооружении армий Дании, Франции, Соединенного Королевства и США. Так, датские и французские перспективные бронезиловы полностью исключали пробитие 7,62 51-мм пулями, в то время как бронезиловы Великобритании и США выдержали и более высокоскоростные воздействия – 12,7-мм патроны снайперской винтовки. Всего было испытано три фрагмента защитной структуры бронезилов, конфигурации которых показаны на рисунке 1, каждый на группе из восьми свиней. Локализация воздействия находилась в правой боковой области грудной клетки животного в середине восьмого ребра. Приборное обеспечение включало измерение давления и ускорения грудной стенки, а также необходимые физиологические исследования [10] за полчаса до эвтаназии, что предусмотрено требованиями нормативно-правовых документов о порядке проведения экспериментальных работ с применением животных [3].

Данная серия испытаний была разработана для того, чтобы выяснить истинную причину заброневой ранения груди, отделив влияние первичного высокочастотного и краткосрочного пика давления ударной волны (УВ) от воздействия вторичного пикового давления перемещения (сжатия), предположительно вызванного деформацией тыльной поверхности бронезилов. Теоретически первый фрагмент брони (типичный бронезилов) при обстреле должен был вызывать воздействие в виде крутого первого пика давления и более пологого продолжительного второго пика давления перемещения (G1). Второй образец брони должен был иметь только второй пик давления

(G2), а третий должен иметь только первый пик (G3).

Однако на практике характеристики заброневой воздействия оказались не совсем такими, как ожидалось. На рисунке 2 показано, что фрагмент брони G1 снизил второй пик, но также снизился и первый пик давления УВ. Фрагмент брони G2 значительно снижает как первый, так и второй пик давления, но по ходу испытаний не были получены результаты, в которых первый пик был бы меньше второго пика давления. Фрагмент брони G3, обеспечивающий воздействие на объект защиты только первого пика УВ и потребовавший решения сложной инженерной задачи по обеспечению необходимой жесткости (бесконечной ригидности), значительно ограничивал только результирующую деформацию тыльной поверхности.

Все участвовавшие в испытании животные получили ранения, однако нормировать последние оказалось достаточно трудно. Типичный критерий травмы, используемый при автомобильной травме согласно сокращенной шкале травм (Abbreviated Injury Scale-AIS), не оказался достаточно конкретным, чтобы четко разграничить ранения в каждой серии опытов, проведенных в Оксболе. Испытуемые животные имели травмы 2–3 уровней по AIS [2], однако методика измерения посмертной массы легких животных, используемой И.Е. Жуковым [5] и J.C. Sarron, C. Destombe [12], оказалась более точной мерой определения степени тяжести ранений для данных экспериментов.

Таким образом, результаты проведенных испытаний в Оксболе показали более высокую летальность для большинства исследованных групп животных из-за наличия серьезных травм грудной клетки и легких по причине жесткой керамической брони, имеющей поверхностную плотность 24 кг/м² даже при наличии подушки из пены (амбушюра). Хотя записи давления и ускорения были неполными, достоверно установлено, что величина первого пика давления в тканях объекта защиты превышала 30 МПа при длительности фазы от 0,3 до 0,4 мс.

Цель исследования. Изучить механизмы развития заброневой травмы груди человека, защищенного бронезиловом, при его непробитии с использованием современных исследовательских технологий.

Материалы и методы. Для выяснения механизма формирования заброневой травмы при непробитии керамической брони нами проведен следующий эксперимент. Производился обстрел подвешенной на резиновых стропах керамической панели (грудной секции) из 7,62-мм снайперской винтовки Драгунова (СВД) патроном с легкой пулей со стальным сердечником (ЛПС) со скоростью контакта около 828 м/с. Съёмка процесса воздействия поражающего элемента (ПЭ) на бронепанель была реализована с помощью комплекса высокоскоростной видеосъёмки «Phantom Micro M310» фирмы «Ametek» (США). Обработка видеоматериалов осуществлялась с использованием прикладного программного обеспечения Phantom Camera Control v. 2.5 [4].

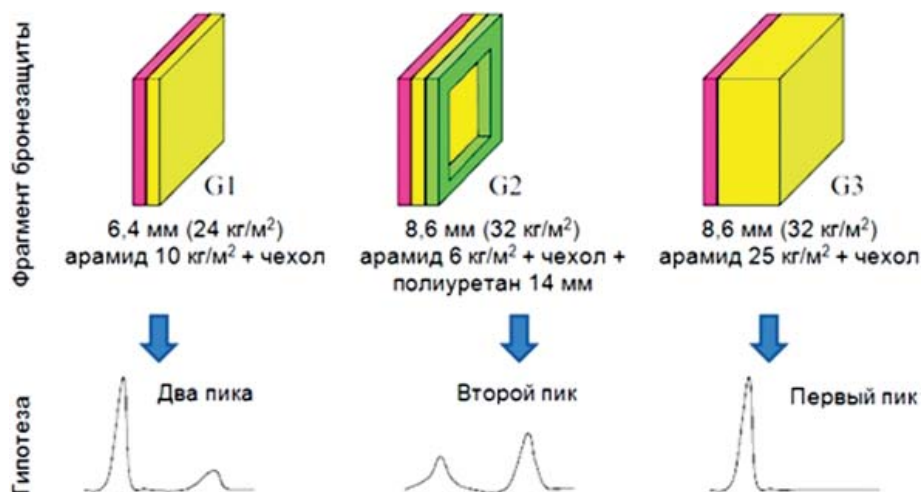


Рис. 1. Три фрагмента бронежилета (G1, G2, G3), используемые для испытаний по проверке гипотезы пиковой ударной нагрузки грудной клетки животных [12]

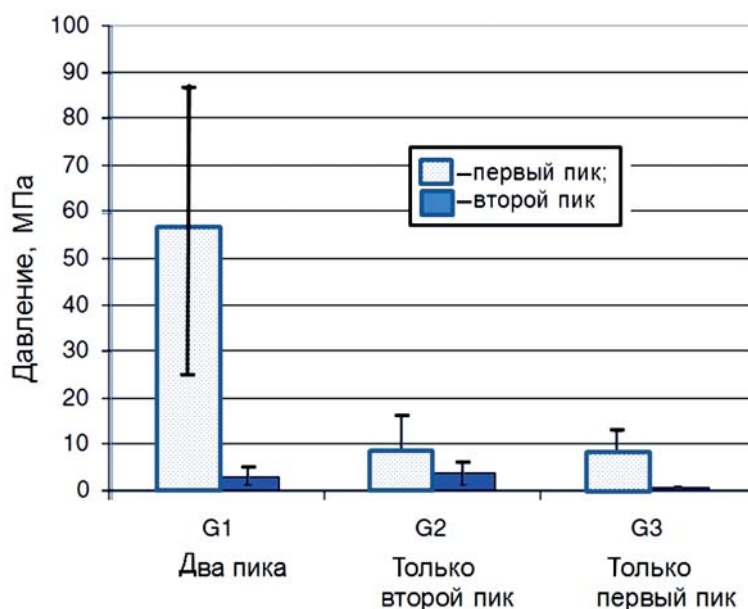


Рис. 2. Средние значения первого и второго пикового давления для каждого из трёх фрагментов брони G1, G2, G3 [12]

Результаты и их обсуждение. Установлено, что нарастание запреградного выступа (тыльной деформации) до максимального значения происходит за 0,5 мс, а спад выступа – за 1,3 мс (рис. 3). В целом на процесс удара запреградного выступа по объекту защиты может быть затрачено не более 2 мс. При этом следует ожидать, что пиковое значение давления в объекте защиты будет иметь продолжительность фазы сжатия от 0,3 до 0,4 мс.

Последующее за «ударом выступа» перемещение всей керамической бронепанели в пространстве в направлении удара наблюдалось в период времени от 2 до 22 мс от момента удара пули по бронепанели (рис. 4).

Формируемый запреградный выступ (рис. 5) при непробитии керамической бронепанели (кривая 1) ПЭ боеприпаса имеет при относительно небольшой высоте большую площадь поверхности по сравнению с тканевой бронёй, усиленной стальной вставкой (кривая 2), так и с арамиднокомпозитным бронематериалом (кривая 3).

Кроме того, формируемый запреградный выступ (рис. 6) при непробитии керамической бронепанели (кривая 1) имеет относительно невысокую скорость и меньшее промежуточное значение объёма, чем образуемый в арамиднокомпозитном бронешлеме (кривая 3), но большее значение, чем в тканевом бронешлеме, усиленном стальной пластиной (кривая 2).

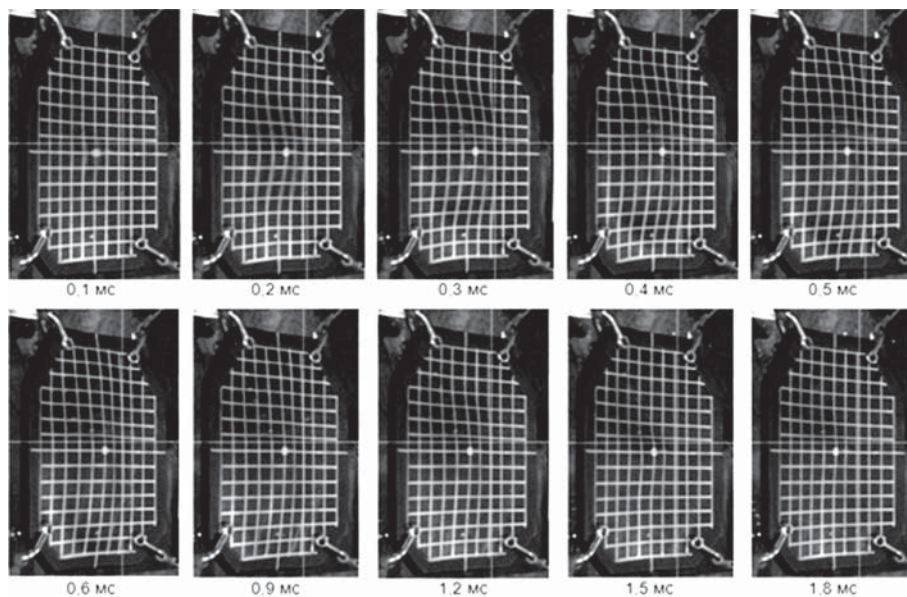


Рис. 3. Фрагменты видеосъемки нарастания и убывания запреградного выступа (деформации) в бронепанели

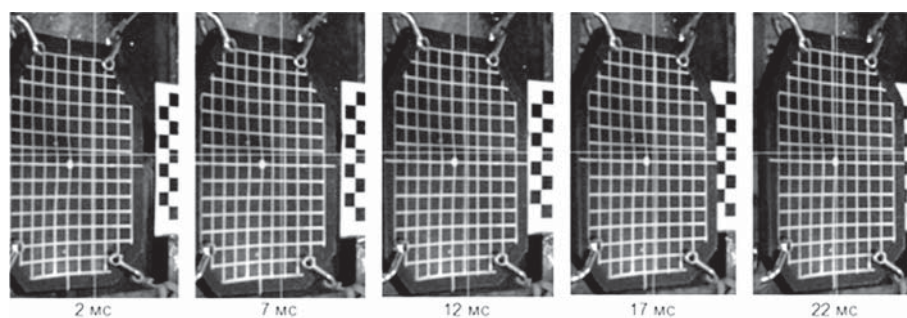
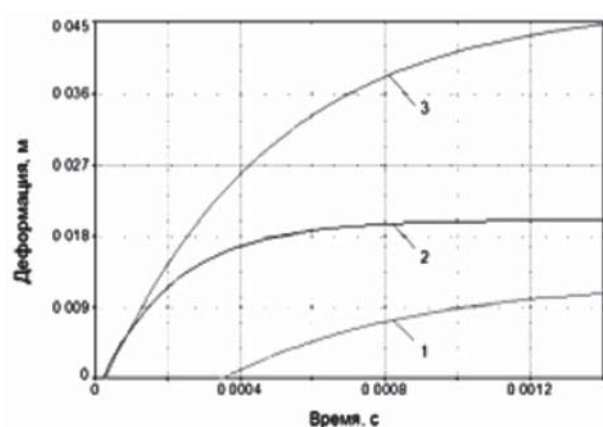
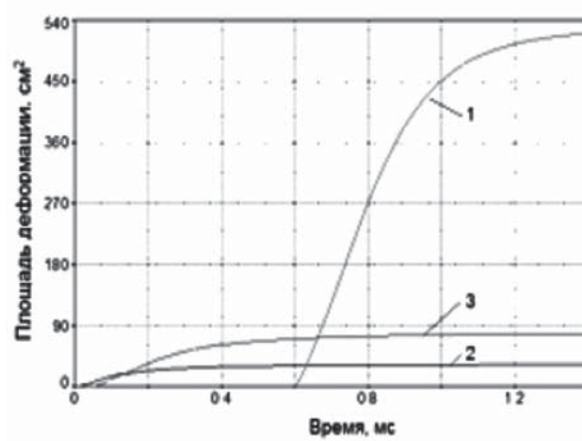


Рис. 4. Перемещение керамической бронепанели в направлении удара после убывания запреградного выступа, при выстреле из СВД

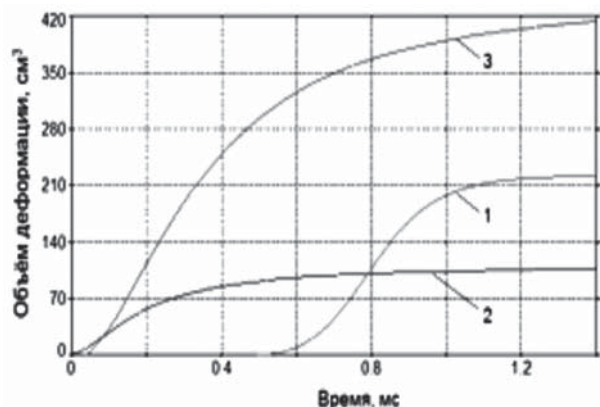


а

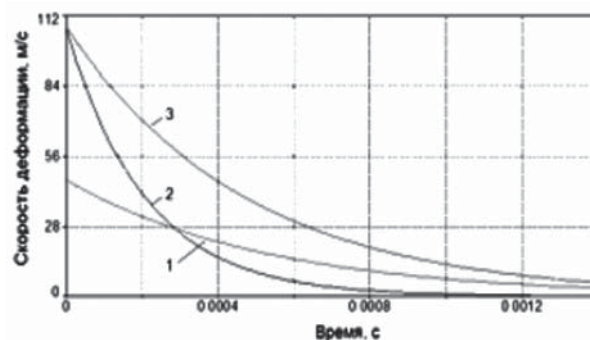


б

Рис. 5. Параметры формирования запреградного выступа во времени: а – кривые деформации; б – кривые площади деформации. 1 – нарастание запреградного выступа при непробитии керамической бронепанели; 2 – нарастание запреградного выступа при непробитии бронешлема, усиленного стальной пластиной, выстрел из 9-мм пистолета Макарова (ПМ) в лоб; 3 – нарастание запреградного выступа при непробитии арамиднокомпозитного бронешлема, выстрел из ПМ в лоб



а



б

Рис. 6. Параметры формирования запреградного выступа во времени: а – кривые объема; б – кривые скорости деформации. 1 – нарастание запреградного выступа при непробитии керамической бронепанели; 2 – нарастание запреградного выступа при непробитии бронешлема, усиленного стальной пластиной, выстрел из ПМ в лоб; 3 – нарастание запреградного выступа при непробитии арамиднокомпозитного бронешлема, выстрел из ПМ в лоб

Скорость перемещения керамической бронепанели в направлении удара при выстреле из СВД изменялась в пределах от 1,25 до 2,25 м/с (рис. 7). В свою очередь расчетное ускорение торможения будет изменяться в пределах от 40 до 20 м/с². Зная массу керамической бронепанели, несложно рассчитать возможную силу удара бронепанели по объекту защиты при отсутствии амортизационного подпора.

Для сравнения полученных нами результатов приведем данные, представленные в работе В.И. Байдака [1], посвященной регистрации параметров удара в желатиновых блоках, защищенных фрагментом бронезилов 2 класса защиты, при выстрелах по нему из ПМ. Для изучения образующихся волн давления проводилось исследование на имитаторах мягких тканей – 20% желатиновых блоках размерами 20 20 28 см, на фронтальной поверхности которых устанавливалось 30 слоев баллистической ткани на основе арамидных волокон. Ударная скорость пули 9-мм патрона ПМ составляла 315–319 м/с. Сферические пьезоэлектрические преобразователи давления устанавливались на расстояниях от 4 до 10 см.

Показано, что в момент удара пули о бронезилов в подлежащих мягких тканях возникают два пика ударного давления: P_1 , имеющий ударно-волновую природу, и P_2 , имеющий гидродинамическую природу. Для первого пика характерна большая максимальная амплитуда – 7288 кПа, практически мгновенное (~4 мкс) нарастание давления и чрезвычайно малая продолжительность во времени, составляющая 0,05–0,2 мс. По данным М.В. Тюрина [8], В.П. Панова [7], в это время развития временной полости (вмятины) в подлежащих мягких тканях еще не происходит.

Практически сразу же после затухания первого пика имеет место развитие второго импульса ударного давления. Последний импульс более низкочастотный с существенно меньшей амплитудой (798

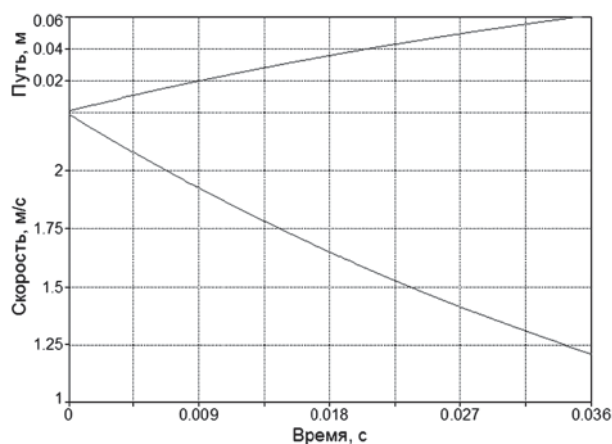


Рис. 7. Перемещение и скорость керамической бронепанели в направлении выстрела из СВД при условии её непробития

кПа) и более длительный (15 мс и более). Характер развития второго пика давления зависит от вида применяемого бронезилов и от величины энергии пули в момент соударения с преградой. В случае контакта пули с тканевым бронезилов развитие этого низкочастотного импульса ударного давления начинается практически сразу же после высокочастотного и имеет длительность до 10 мс при расстоянии 4 см. При ударе пули в бронезилов с титановыми или керамическими бронепанелями развитие второй фазы кривой давления запаздывает на 5–6 мс. Снижение скорости пули и, соответственно, энергии ударного взаимодействия ее с бронезилов приводит к увеличению этой задержки еще на 3–4 мс.

Заключение. Эксперимент по изучению механизма формирования заброневого локальной контузии

онной травмы при непробитии керамической брони, проведённый с помощью высокоскоростной видеосъёмки воздействия ПЭ на бронепанель, позволил визуализировать во времени особенности динамики поведения защитной композиции. Оценены амплитудно-временные параметры процесса формирования тыльной деформации (выпучины), соответствующего 2-му пику давления в желатиновых блоках и вызывающего локальный удар, характеризующий развитие в объекте защиты временной полости, непосредственно влияющей на степень тяжести ЗЛКТ. Кроме того, анализ последующего процесса движения самой бронеплиты, приводящего к «распределённому» удару по торсу, позволяет оценить возможную силу удара бронепанели по объекту защиты при отсутствии амортизационного подпора.

Литература

1. Байдак, В.И. Концептуальные основы создания средств индивидуальной защиты. Ч. 1. Бронежилеты / В.И. Байдак [и др.]. – М.: Межакад. издание «Вооружение. Политика. Конверсия», 2003. – С. 180–218.
2. Грачёв, И.И. Разработка стенда для оценки контузионной травмы головы при непробитии общевойскового шлема / И.И. Грачёв, А.А. Котосов [и др.]. – П.: Изд-во ПАИИ, 2013. – 306 с.
3. Директива 2010/63/EU Европейского парламента и совета Европейского союза по охране животных, используемых в научных целях. – СПб.: Rus-LASA «НП объединение специалистов по работе с лабораторными животными», рабочая группа по переводам и изданию тематической литературы, 2012. – 12 с.
4. Жуков, И.Е. Использование высокоскоростной видеорегистрации для оценки параметров тыльной деформации при непробитии шлема поражающим элементом / И.Е. Жуков, А.А. Котосов, А.В. Милев // Сб. докл. XIV междунар. науч. конф. «Новейшие тенденции в области конструирования и применения баллистических материалов и средств защиты». – Ялта, 2015. – С. 20–24.
5. Жуков, И.Е. Об использовании модели Т. Лобделла в инженерных расчётах / И.Е. Жуков [и др.] // Вопросы оборонной техники. – 2015. – Серия 16, вып. 3–4. – С. 72–78.
6. Озерецковский, Л.Б. Раневая баллистика: история и современное состояние огнестрельного оружия и средств индивидуальной бронезащиты / Л.Б. Озерецковский, Е.К. Гуманенко, В.В. Бояринцев. – СПб.: Калашников, 2006. – С. 209–217.
7. Панов, В.П. Оптимизация конструкции бронежилета для обеспечения безопасности личного состава: дис. ... канд. мед. наук. / В.П. Панов. – СПб., 2001. – 127 с.
8. Тюрин, М.В. Морфофункциональная характеристика тупой травмы грудной клетки, защищенной бронежилетом: дис. ... канд. мед. наук / М.В. Тюрин. – Л., 1987. – 146 с.
9. ATC (U.S. Army Aberdeen Test Center). 2008. Test operations procedure (TOP) 10-2-210: Ballistic testing of hard body armor using clay backing. Aberdeen Proving Ground, Md.: Aberdeen Test Center.
10. Mayorga, M. Thoracic Response to Undeclared Body Armor / M. Mayorga [et. al.] // 1 Neuilly-sur-Seine. «North Atlantic treaty organization, research and technology organisation». – France, 2010. – P.
11. NRC (National Research Council). Phase II report on review of the testing of body armor materials for use by the U.S. Army. – Washington, D.C.: National Academies Press, 2010. – P.
12. Sarron, J.C. Physiological results of NATO BABT experiments / J.C. Sarron [et. al.] // Personal Armour Systems Symposium. – Colchester, U.K., 2000. – P.
13. Sarron, J.C. Displacements of thoracic wall after 7.62 non penetrating impact / J.C. Sarron [et al.] // Presentation to the NATO BABT Task Group. – Copenhagen, Sarron, 2001. – P.

A.V. Denisov, S.G. Tsurikov, A.A. Kotosov, I.E. Zhukov, K.N. Demchenko, I.I. Sabonis

Parameters of the behind armor protrusion in the not penetrating of a ceramic body armor

Abstract. The features of the formation of the rear deformation of the armored panel as the main mechanism for the development of an armored person's armor injury protected by a bullet-proof vest during non-penetration using the modern research method - high-speed video filming are investigated. An analysis of the combat pathology of modern military conflicts has shown that a hit of an injuring element in a body of a serviceman protected by body armor can lead to injury to him, which differs in a number of indicators from a «classic» gunshot injury. These injuries are commonly referred to as behind armor blunt trauma in foreign literature or closed localized contusion injury in domestic sources. Closed injury of this etiology can manifest itself in the form of injuries of the skin and subcutaneous tissue with the formation of hemorrhages, and in injuries of internal organs, accompanied in severe cases by ruptures of the liver and lungs with the development of life-threatening complications – intense pneumothorax, intraperitoneal bleeding, etc. In the course of conducting experimental research, it was shown that the design of modern body armor allows effectively countering their penetration by most of the bullets of modern small arms ammunition, but does not completely level the magnitude of the impact pulse transmitted through armor to the protected object. The differences in the physical processes of the formation of rear deformation, which can lead to a direct deformation of a bulletproof vest in the case of «soft» armor based on ballistic fabrics, and to deformation with destruction in «hard» armor made of a ceramic composition are revealed. With the help of high-speed video filming of the impact of the striking element on the armor panel, the features of the behavior of the protective composition were visualized in time. The main amplitude – time parameters of the process of formation of the rear deformation (bulge) corresponding to the 2nd pressure peak in gelatin blocks and causing a local impact, characterizing the development of the temporary cavity that directly influences the severity of closed localized contusion injury, were evaluated. It is proved that the analysis of the characteristics of the subsequent process of movement of the armor plate itself, which leads to the action of a «distributed» impact on the torso, allows us to estimate the possible impact force of the entire armor panel on the object of protection and predict its biological consequences in the form of a blunt-injury blunt injury.

Key words: body armor, ceramics, behind armor protrusion, high-speed video, behind armor blunt trauma, ballistic cloth, impulse shock pressure, not penetrated armor, aramid.

Контактный телефон: 8 (812) 292-32-80; e-mail: vmeda-nio@mil.ru