

УДК 629.7.047-8

Баллистическая стойкость тканевого бронепакета для авиационного бронезилета

Тазетдинов Р.Г.^{1*}, Твердохлеб В.А.^{2}, Тибрин Г.С.^{1***}.**

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

²*Научно-производственное объединение «Динафорс», 1/23, проезд Старый Петровско-Разумовский, Москва, 127287, Россия*

**e-mail: rustem-tazetdinov@yandex.ru*

***e-mail: vtverd@yandex.ru*

****e-mail: 901tibrin@mail.ru*

Аннотация

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование процесса удара стальными шариками – имитаторами вторичных осколков – о тканевый многослойный бронепакет (БП). На основании полученных результатов предложен способ повышения баллистической стойкости БП посредством размещения в нём одного слоя полимерной плёнки, исключающей проскальзывание шарика через частично разрушенные и растянутые слои ткани.

Ключевые слова: тканевый многослойный бронезилет, стальные шарiki, математическая модель, результаты расчетов и экспериментов

Введение

В настоящее время не все кабины военных самолётов имеют бронезащиту. Поэтому создание средства индивидуальной бронезащиты членов экипажа –

авиационного БЖ – является актуальной задачей. Основное назначение авиационного БЖ – защита лётчика от вторичных осколков, образующихся при попадании в кабину средств поражения (СП), – экранирующего оборудования кабины, брони, а также фрагментов пуль. Поражающее действие вторичных осколков существенно меньше, чем самих СП. В связи с этим авиационный БЖ может быть выполнен не с жёсткими бронезементами, как наземный, а облегчённым и гибким – с БП из многих слоёв высокопрочной (баллистической) полимерной ткани типа кевлар, русар, СВМ и др., что значительно повысит эргономичность БЖ. В то же время требования к защитным характеристикам авиационного БЖ выше, чем для наземного, так как первый должен гарантированно обеспечивать сохранение боеспособности лётчика во время полёта, иначе гибель его и самолёта неизбежны. Настоящая работа посвящена исследованию тканевого БП с целью повышения его баллистической стойкости.

БП состоит из помещённых в единый чехол собственно защитного пакета из баллистической ткани и демпфирующего слоя из мягкого материала, предназначенного для ослабления удара о тело. Отдельные БП вкладываются в тканевую основу БЖ и служат для защиты определённых участков тела лётчика. Баллистическая стойкость БП считается тем выше, чем при большей скорости ударника заданной массы происходит пробитие БП. В соответствии с нормативными требованиями, защитные характеристики (число пробитых слоёв и глубина запреградного воздействия (ЗВ), или вмятины на теле) определяются путём обстрела БП установленного на магнитном блоке из пластилина или желатина, имитирующем кожно-мышечную систему человека, имитаторами вторичных

осколков – стальными шариками с определённой массой и скоростью, летящих по нормали к пакету. Таким образом, удар шарика считается приближённо эквивалентным удару осколка.

Многочисленные предварительные эксперименты с БП из различных материалов позволили установить, что в большинстве случаев пробитие пакета происходит не путём разрыва всех слоёв ткани, а вследствие проскальзывания шарика через них [1, 2]. Баллистические ткани, применяемые в БП, обладают высокими модулями упругости как по основе, так и по утку, и в то же время хорошо растяжимы (деформация при разрыве до 10-15 %), что способствует повышению баллистической стойкости пакета. Однако при растяжении силы трения между нитями в перекрестиях ячеек ослабляются, сами ячейки увеличиваются, отдельные волокна и нити вообще могут вытягиваться из плетения и рваться. Вследствие этого нити легко раздвигаются и шарик может проскользнуть через ткань, даже не разрывая её. Таким образом, одной из важных проблем, решаемых при создании авиационного БЖ, является повышение баллистической стойкости БП путём исключения или существенного снижения вероятности проскальзывания ударника через пакет. Однако сначала необходимо расчётным и экспериментальным путём выяснить, действительно ли в отсутствие проскальзывания возможно обеспечить гарантированное непробитие БП из конкретной ткани и каково должно быть при этом число слоёв этой ткани.

Теория и расчёт баллистических характеристик БП

При нормативных скоростях стальных шариков до 400-550 м/с удар о БП имеет волновой характер и состоит из четырёх периодов:

1) начальный, или сверхзвуковой, когда между ударником и первым слоем ткани образуется контактная поверхность со скоростью, превышающей скорость продольной упругой волны вдоль нитей основы и утка (рис. 1);

2) дозвуковой, когда волна выходит за пределы контактной поверхности и происходит слой за слоем прогиб пакета, а продольная волна поперёк ткани доходит до поверхности демпфера (рис. 2);

3) сжатие и прогиб демпфера с выходом волны за его пределы;

4) проникновение ударника вместе с частью сжатого БП и демпфера в тело или его имитатор с образованием ЗВ.

Дискретность БП, состоящего из практически несвязанных друг с другом слоёв ткани (стёжка слабая и редкая или вообще отсутствует), которые могут скользить друг относительно друга, не позволяет рассматривать пакет как сплошное

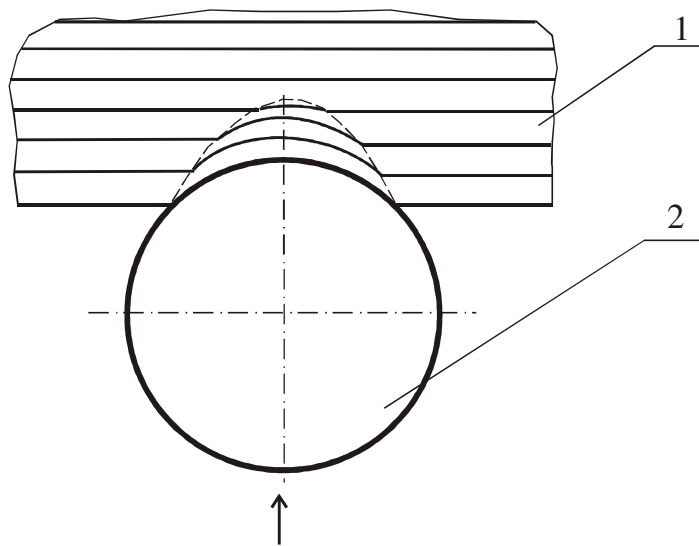


Рис. 1. Деформация пакета и образование контактной поверхности в начальный (сверхзвуковой) период удара; 1 – многослойный тканевый пакет; 2 – сферический ударник

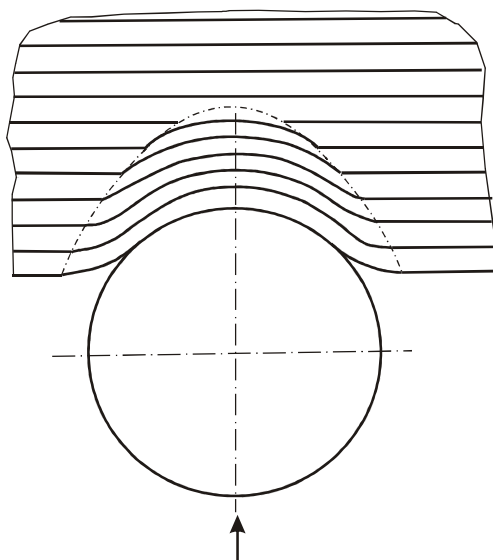


Рис. 2. Деформация пакета во второй (дозвуковой) период удара

анизотропное тело. Целесообразно исследовать динамику каждого слоя в отдельности, представляя его деформированную часть как тонкостенную сферическую оболочку в 1-м периоде удара и состоящей из двух оболочек – сферической и тороидальной – в остальных периодах. При этом размеры оболочек непрерывно изменяются в процессе удара, оболочки деформируются, а степень связи между ними определяется силами давления и трения. При принятии ряда допущений, основное из которых: отсутствие проскальзывания шарика, линейность и одинаковость деформационной характеристики растяжения ткани по всем направлениям, абсолютная жёсткость ударника (шарика), пренебрежение влиянием изменения толщины слоя в процессе удара на его инерционную характеристику, отражённых от поперечных границ пакета волн на продольные (вдоль ткани) деформации и др., можно построить приближённую математическую модель.

Система уравнений движения i -й оболочки в первом периоде для первой (контактной) зоны, полученная на основе теории мягких оболочек [3, 4] с учётом трения между ними, выраженная в перемещениях, имеет вид

$$\begin{aligned} \cos^2 \frac{\varphi_0}{2} \cdot \frac{\rho_i r^2}{E_i} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial \tau^2} - (\sin \varphi - f \cos \varphi) \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \tau^2} \Big|_{\tau=ih/a} \right) = \frac{1}{1-v^2} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial \varphi^2} + \\ + \frac{1}{1-v^2} \left(\frac{\cos \varphi}{1+v} - f \right) \frac{\partial v}{\partial \varphi} - \frac{v}{1+v} \left(\frac{v}{(1-v) \sin^2 \varphi} + \operatorname{ctg}^2 \varphi + \frac{1+v}{1-v} f \cdot \operatorname{tg} \varphi \right); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\cos^2 \frac{\varphi_0}{2} \cdot \rho_i \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \tau^2} \Big|_{\tau=ih/a} \cdot \cos \varphi = \ddot{\alpha}_1 - \ddot{\alpha}_2 - \frac{\dot{A}_i}{(1-v)r^2} \left(\frac{\partial v}{\partial \varphi} + v \right); \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} v(0, \varphi) = 0; \quad \frac{\partial v}{\partial \tau} \Big|_{\varphi=0} = 0, \\ v(\tau, 0) = 0; \quad v(\tau, \varphi_0) = r(\varphi_0 - \sin \varphi_0) \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где ρ_n , E_n – поверхностная плотность и погонный модуль упругости ткани на растяжение; r – радиус срединной поверхности оболочки; v – перемещение элемента в меридианном (φ) направлении относительно центра масс (по дуге контакта); τ – время; α – перемещение ударника; φ – текущий меридианный угол, отсчитываемый от нормали к оболочке в первой точке удара; ν – коэффициент Пуассона при растяжении ткани; p_1 , p_2 – давления на оболочку с вогнутой и выпуклой стороны; f – коэффициент трения между слоями; i – номер слоя, отсчитываемый от границы с шариком; a – скорость звука поперёк ткани; φ_0 – меридианный угол контакта; h – текущая толщина оболочки.

Перемещение ударника α , его скорость $\dot{\alpha}$, ускорение $\ddot{\alpha}$ и контактную силу P можно рассчитать из уравнения движения ударника:

$$\left. \begin{aligned} \delta \ddot{\alpha} + 2\pi R^2 b_1 \int_{1-\alpha/R}^1 \left(\frac{\cos \varphi}{a(\dot{\alpha}^{-1} - \cos \varphi)} \right)^{b_2} (\cos \varphi + f_1 \sqrt{1 - \cos \varphi}) d\varphi = 0, \\ \alpha(0) = 0, \quad \dot{\alpha}(0) = V_0 \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где m , R , V_0 – масса, радиус, начальная скорость шарика; f_1 – коэффициент трения между шариком и 1-м слоем ткани; b_1 , b_2 – коэффициенты деформационной характеристики ткани на поперечное сжатие, принятой в виде степенной функции $\delta = b_1 (-\varepsilon / (1 + \varepsilon))^{b_2}$ ($\varepsilon < 0$ – деформация сжатия). Второй член в левой части (4) выражает контактную (ударную) силу P .

Для 2-го и 3-го периодов соответственно в 1-й и 2-й (свободной) зоне также получены подобные системы уравнений. Решение этих систем уравнений позволяет получить численные зависимости от времени кинематических ($\alpha, \dot{\alpha}, \ddot{\alpha}$), динамических (P распределения давлений между слоями), характеристик удара, распределения напряжений (погонных сил) и деформаций в слоях, а также баллистическую характеристику БП – число пробитых слоёв в течение первых 3-х периодов, когда удар ещё не ощущается телом или его имитатором.

Составлены методика, алгоритм расчёта по данной модели и проведены расчёты для БП из баллистической ткани СВМ, арт. 56319, с демпфером из объёмной ткани, арт. 5754, с содержанием воздуха в ней около 90 %, выбранных в качестве материалов авиационного БЖ по результатам предварительных испытаний [1]. Экспериментально определённые механические характеристики материала следующие [2]: $E_{\text{п}} = 10^6$ Н/м; $\rho_{\text{п}} = 0,12$ кг/м²; $b_1 = 5000$ МПа; $b_2 = 3,5$; $f = f_1 \approx 0,3$; $\nu = 0,3$. В качестве имитатора тела предполагается пластилин. Расчёты были

проведены в диапазоне масс шарика $m = 0,5 \dots 8,0$ г; скоростей $V_0 = 150 - 550$ м/с, характерных для осколков.

Из полученного огромного массива расчётных результатов приведём только наиболее важные:

1. Максимальная сила удара о БП достигается ещё в конце 1-го периода, который длится порядка 1 мкс (рис. 3). Затем она плавно уменьшается, также как и скорость и ускорение ударника. Длительность всех 3-х периодов колеблется в пределах 10-20 мкс.

2. Чем больше начальная скорость шарика при данной массе, тем быстрее она уменьшается (рис. 4). Это означает, что БП благодаря хорошей растяжимости ткани (до 14,5 %) сам тканевый пакет обладает высокой демпфирующей способностью. При этом остаточная кинетическая энергия в конце 3-го периода для различных V_0 также нивелируется (рис. 5). В то же время в зависимостях остаточных характеристик шарика от его массы такого сильного нивелирования не происходит – с увеличением m остаточная скорость, энергия, импульс возрастают, хотя и не пропорционально m , из-за увеличения при этом радиуса шарика и, соответственно большему его торможению.

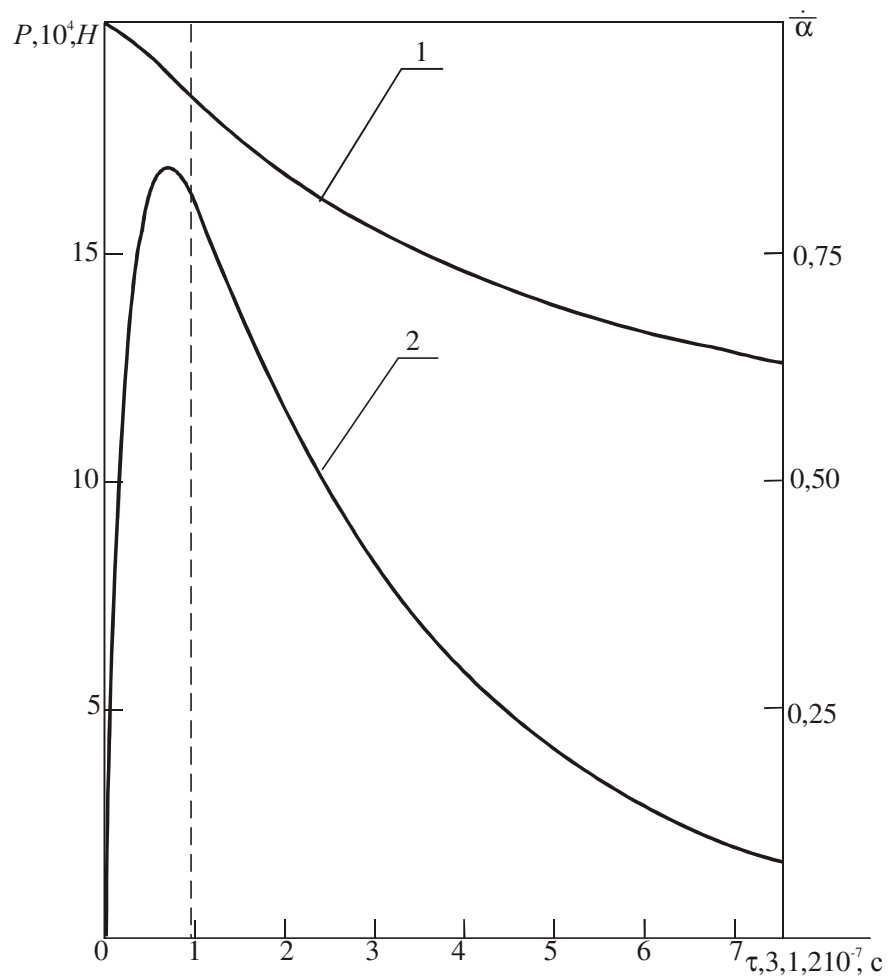


Рис. 3. Зависимости безразмерной скорости ударника (1) и силы удара (2) от времени в начальном периоде удара ($V_0 = 500$ мс; $m = 1$ г) — — — момент перехода ко второму периоду удара для 1-го слоя БП*

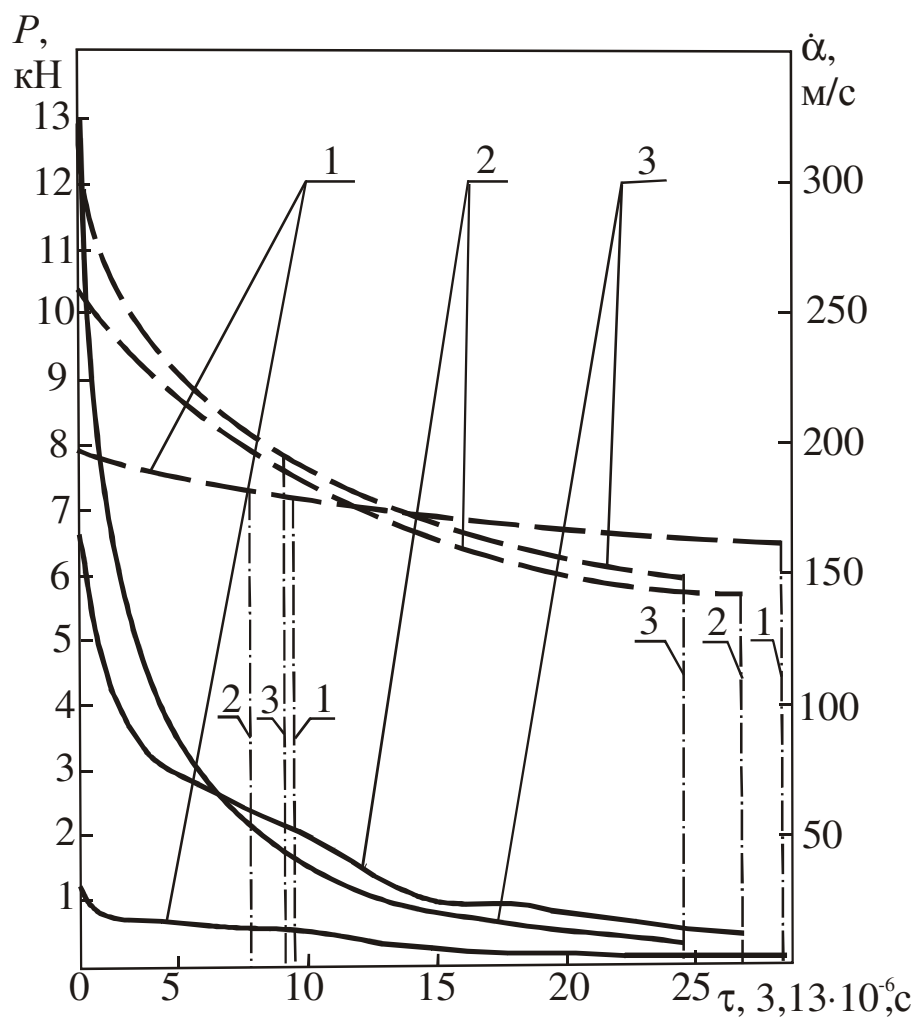


Рис. 4. Зависимости силы удара (—) и скорости шарика (---) от времени при разных начальных скоростях ($m=1$ г): 1 – $V_0=200$ м/с; 2 – $V_0= 300$ м/с; 3 – $V_0=500$ м/с; - · - · - моменты окончания 3-го периода для 1-го (меньшее время) и 2-го варианта БЖ

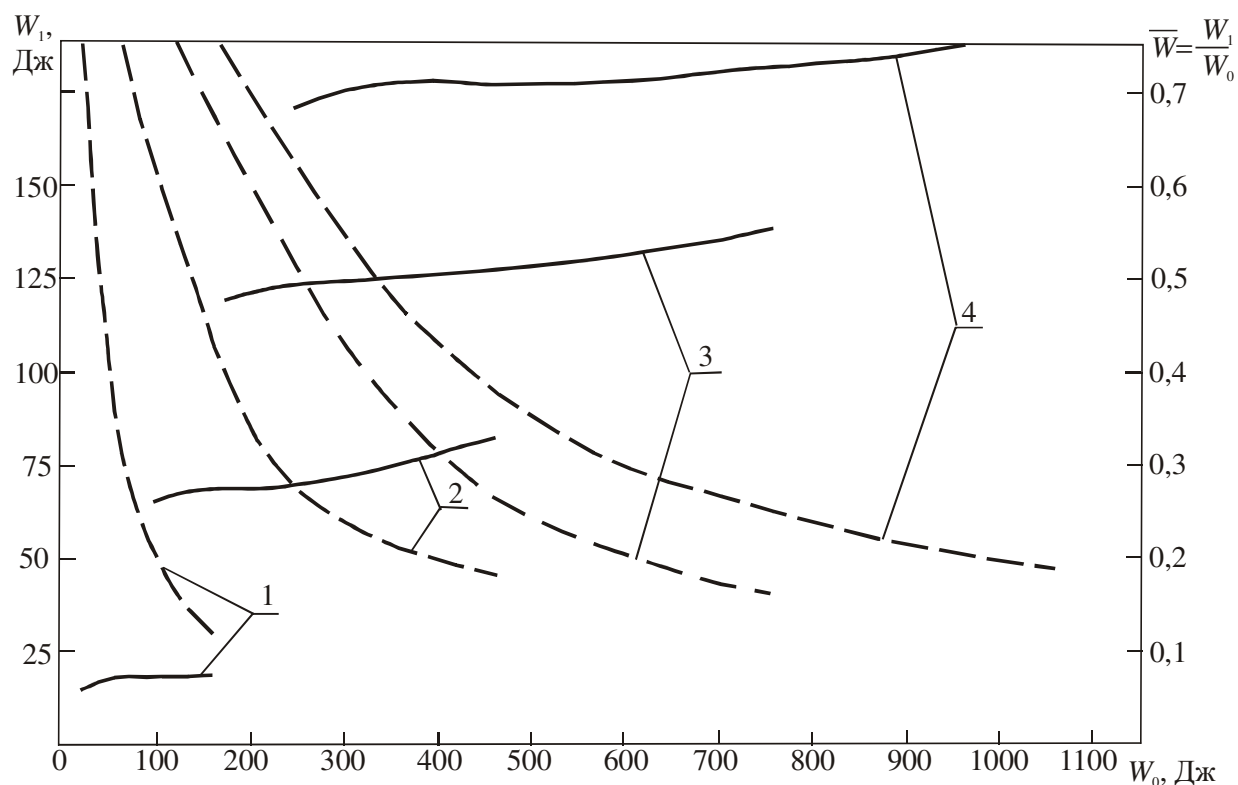


Рис. 5. Зависимости остаточной в конце 3-го периода абсолютной (—) и относительной (---) энергии шарика от его начальной энергии при различных его массах: 1 – $m=1$ г; 2 – $m=3$ г; 3 – $m=5$ г; 4 – $m=7$ г (1-ый вариант БЖ)

3. Максимальные растягивающие погонные меридианная N_φ и окружная N_θ силы возникают в первой зоне, т.е. под шариком, а во второй зоне они быстро убывают в направлении к основанию «лунки». Как видно из рис. 6, зависимости N_φ , N_θ от времени имеют колебательный характер, что связано с сильной нестационарностью процесса и сильным влиянием в связи с этим на деформацию инерционных сил.

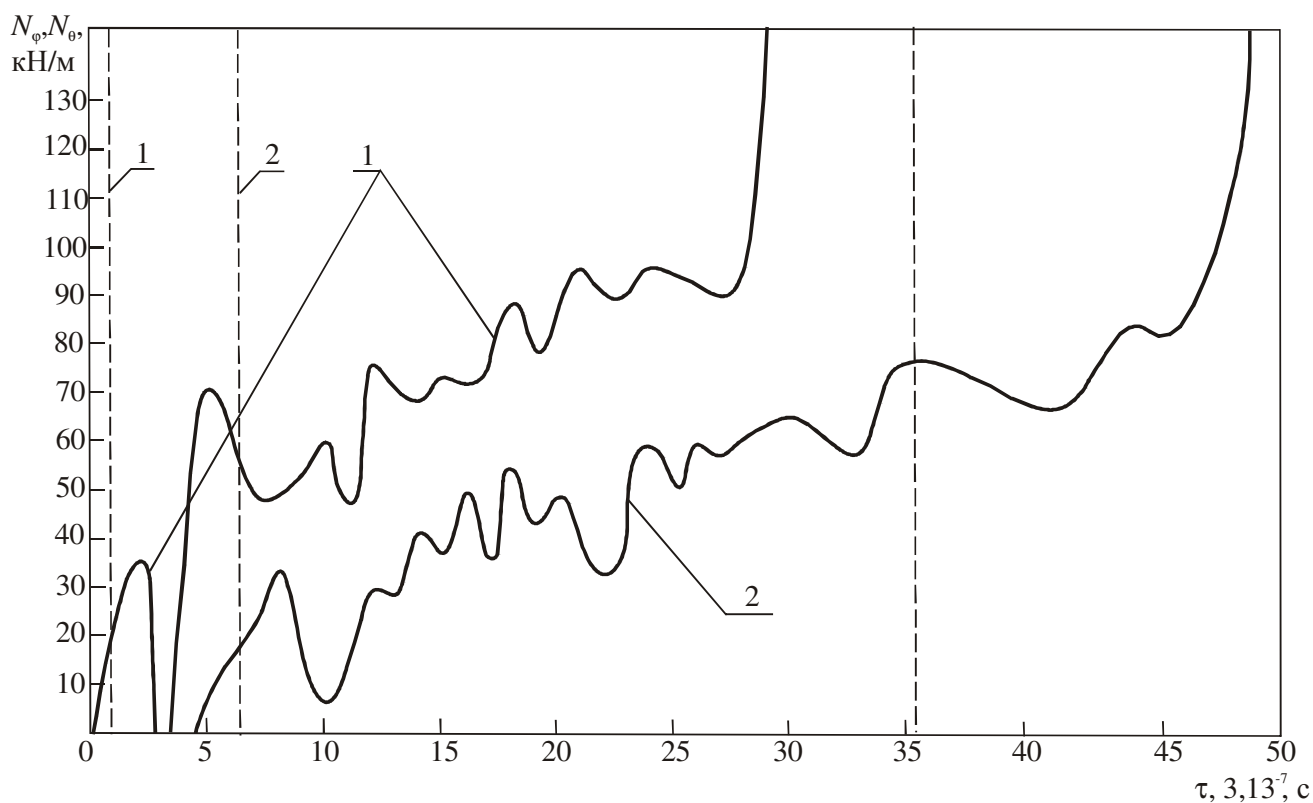


Рис. 6. Зависимости погонных сил N_φ, N_θ в слоях ткани БП при $\varphi = 0$

$N_\varphi = N_\theta$ от времени до момента разрыва: 1 – 1-й слой; 2 – 5-й слой ($V_0 = 500$ м/с; $m = 1$ г); --- – время начала 2-го периода; - · - · - время начала 3-го периода

4. Пробитие 1-го слоя ткани происходит во втором периоде удара, чаще всего вблизи вершины ударника ($\varphi \sim 0$) при превышении его начальной скоростью значений 150 – 185 м/с в зависимости от массы. Максимальное значение числа пробитых слоёв n_p в конце 3-го периода приходится на диапазон скоростей 300 – 400 м/с (рис. 7).

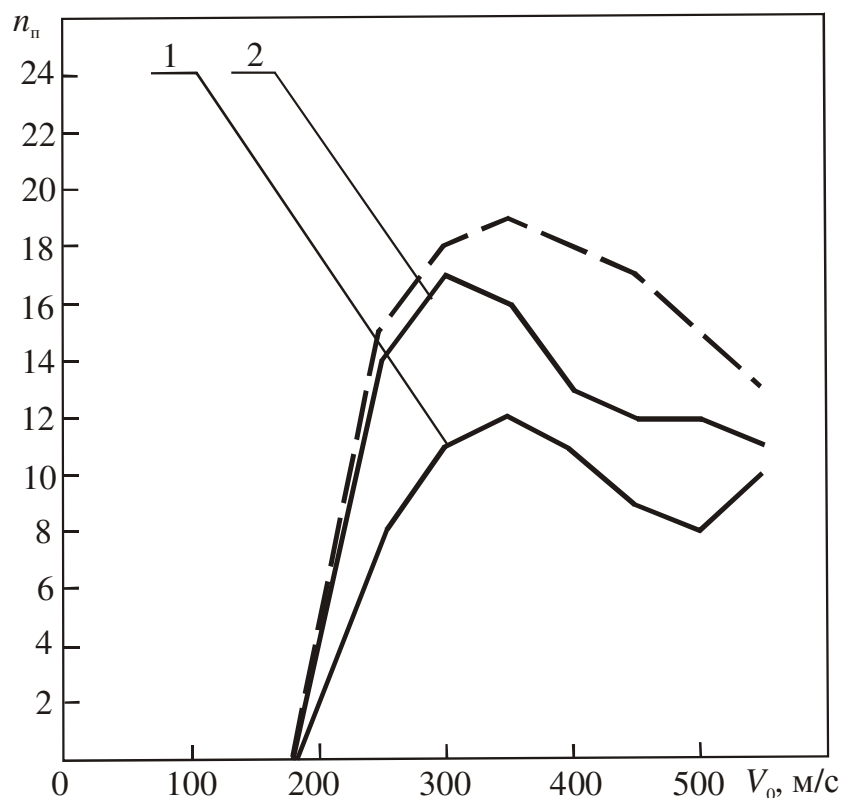


Рис. 7. Зависимости числа пробитых слоёв БП от начальной скорости ударника для первого (1) и второго (2) вариантов БЖ ($m = 1$ г); — — — максимально возможное число пробитых слоёв

В исследованном диапазоне V_0 и m , оно составляет 13 для БЖ первого варианта с демпфером толщиной 5 мм (для общей круговой защиты тела), 25 для БЖ второго варианта, с дополнительным демпфером толщиной 10 мм (для дополнительной защиты жизненно-важных органов (ЖВО)), т.е. $n_p < n$ (n – полное число слоёв БП; как базовое для расчёта взято $n = 30$). Наличие максимума в зависимости $n_p(V_0)$ объясняется увеличением контактного угла φ_0 с ростом V_0 и связанным с этим уменьшением проекции ударной силы на меридианное направление φ . Из-за этого при превышении некоторого критического значения V_0 максимальные растягивающие погонные силы N_φ начинают убывать, хотя сила

удара продолжает расти. Однако при дальнейшем увеличении V_0 влияние указанного фактора на число разрушенных слоёв ослабевает, и оно вновь может возрастать. Аналогичные экстремумы имеются и в зависимости $n_p(m)$. То, что для БЖ 2-го варианта n_p больше, чем для 1-го, связано с тем, что в первом случае ударник до конца 3-го периода проходит больший путь, чем во втором, сжимая более толстый демпфер, который практически не сопротивляется до тех пор, пока давление воздуха в нём не станет равным напряжению текучести пластилина.

В конце 3-го периода у ударника остаётся ещё кинетическая энергия, достаточная для пробития ещё нескольких слоёв, т.е. максимально возможное без учёта дополнительного сопротивления тела (имитатора) значение n_p выше, чем в конце 3-го периода (максимальное $n_p = 30$). Однако известно, что кожно-мышечная ткань тела человека обладает значительной демпфирующей способностью. В случае пластилина, как имитатора, демпфирующую роль выполняет его вязкое сопротивление. Поэтому действительное значение n_p будет меньше максимального.

Таким образом, приведённая математическая модель позволяет установить: 1) число слоёв ткани в БП, необходимое для обеспечения его баллистической стойкости в отсутствие проскальзывания ударника (для ткани СВМ арт. 56319 $n \approx 30$); 2) максимально возможное и минимальное значение числа пробитых слоёв ткани при заданных V_0 , m и механических характеристик ткани.

Экспериментальное исследование характеристик тканевого БП

Исследование защитных характеристик БП (рис. 8) на основе ткани СВМ арт. 56319 с демпфером из объёмной ткани, арт. 5754, проводилось на стенде НИИ механики Нижегородского политехнического института (рис. 9).

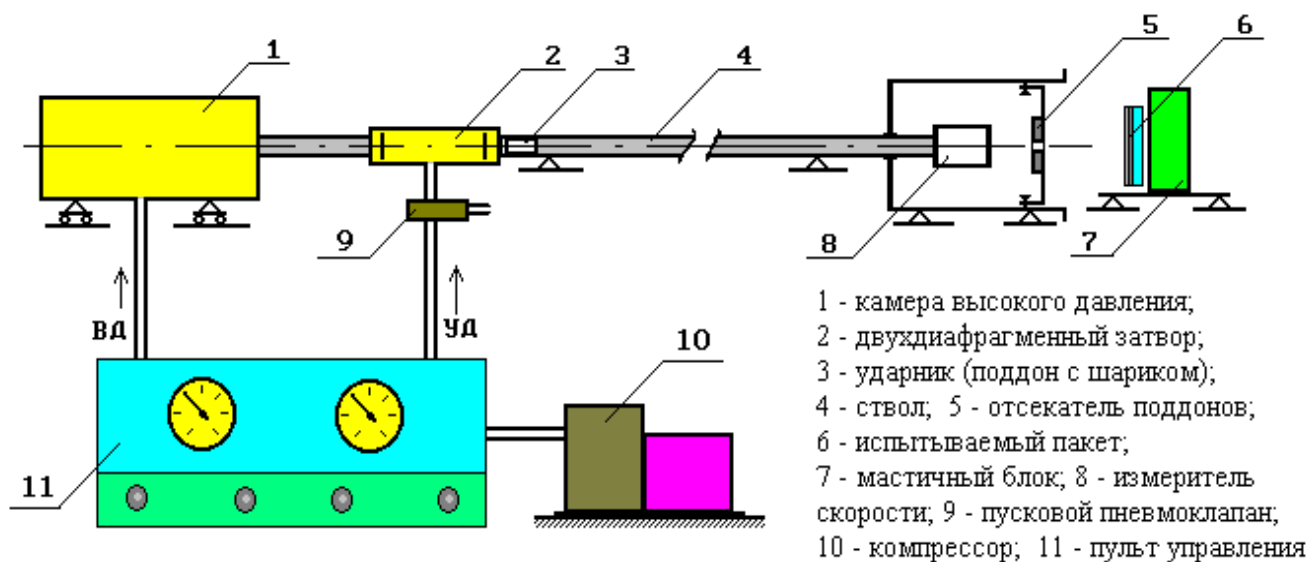


Рис. 8. Схема экспериментального стенда для исследования защитных характеристик БП и БЖ



Рис. 9. Фотография БП

Пакеты устанавливались на манекене в виде мастичного блока из пластилина марки ТУ 86-84-77 с тарированной вязкостью и обстреливались стальными шариками из газовой пушки ПГ-20 по нормали к пакету с автоматической регистрацией скорости шарика и угла встречи с БП. Применялись как отожжённые,

так и закалённые шарики. Пластическая деформация наблюдалась только у оттожжённых шариков, однако она была незначительной и практически не изменяла сферическую форму шарика. Заметного нагрева и тем более термической деструкции ткани в результате удара не наблюдалось.

В предварительных испытаниях наблюдалось проскальзывание шарика и пробой БП. В некоторой степени повышению баллистической стойкости пакета способствовало применение редкой стёжки пакета (100 x 100 мм) вместо первоначальной частой. Частая стёжка мешала свободному движению слоёв друг относительно друга и тем самым повышала вероятность пробоя пакета. Применение демпфера позволило уменьшить не только глубину ЗВ, но и число случаев проскальзывания и, соответственно, пробоя пакета. Однако полностью исключить пробой БП этими мерами не удалось.

Радикально изменить характер удара и полностью исключить пробой БП вследствие проскальзывания шарика удалось только путём размещения в пакете плёнки из высокоэластичной полимерной плёнки. Наиболее вероятное действие этой плёнки заключается в следующем. Обладая более высоким коэффициентом трения о ткань, чем ткани о ткань, она при ударе растягивается и образует полость, в которую заталкиваются разрушенные и растянутые слои ткани, резко повышая сопротивление движению шарика. Такая схема торможения является близкой к расчётной, так как основным условием для разработки расчётной модели было именно отсутствие проскальзывания ударника. Были опробованы плёнки из различных материалов. Они размещались на разных участках БП. Лучшие результаты были получены при применении поливинилхлоридной (ПВХ) плёнки

толщиной 0,5 мм, размещённой между 25-м и 26-м слоями 30-слойного пакета [5]. При этом пять не стёганных между собой слоёв ткани за плёнкой необходимы для гарантированной её защиты от разрыва.

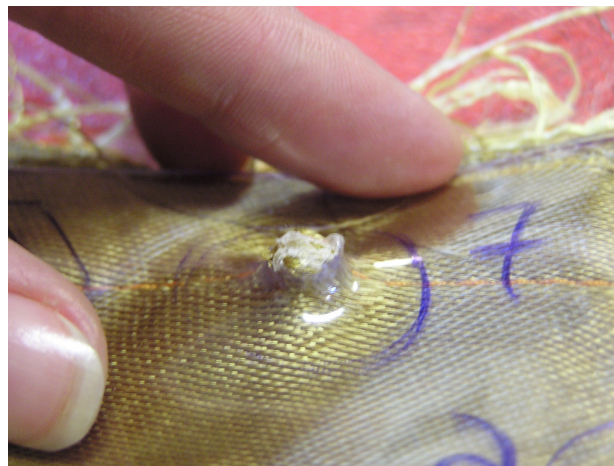
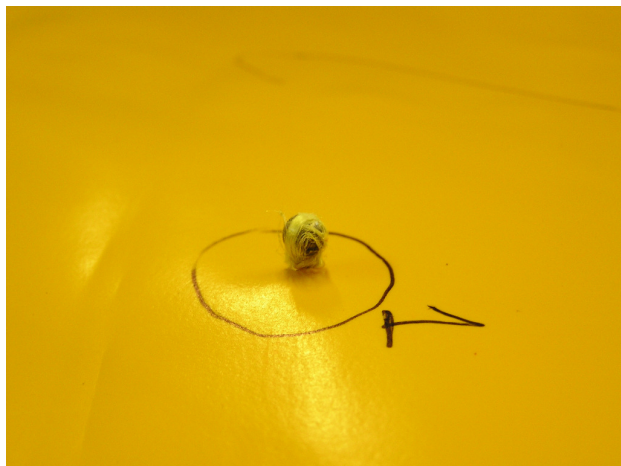


Рис. 10. Фотографии БП с удалёнными неповреждёнными слоями ткани после обстрела

Предложенная новая структура БП позволила полностью исключить случаи пробоя и тем самым гарантировать его баллистическую стойкость в исследованном диапазоне скоростей и массе ударника. Как видно из рис. 10, где приведены фотографии пакетов с разрушенными и демпфированными слоями (нижние целые

слои удалены), шарик действительно подминает под себя эти слои, т.е. как и принято в расчётной модели, они являются продолжением ударника.

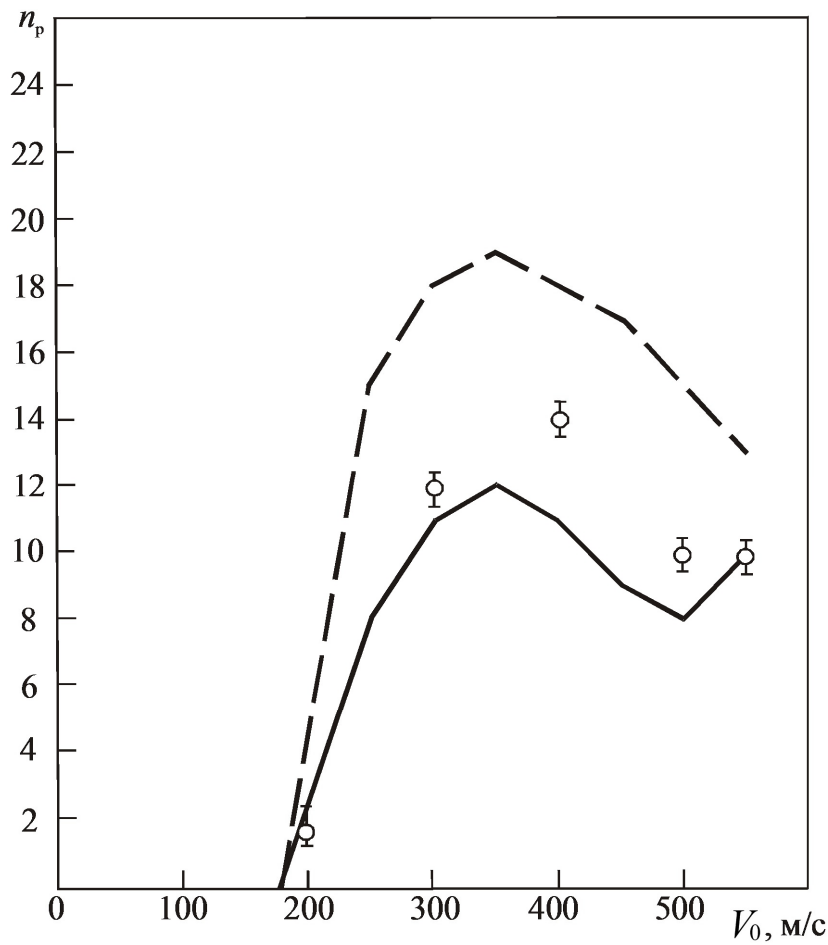


Рис. 11. Сравнение экспериментального числа пробитых слоёв БП с

расчётными для БЖ 1-го варианта в зависимости от начальной скорости шарика ($m = 1$ г): ———— – число пробитых слоёв в конце 3-го периода; - - - - - максимально возможное число пробитых слоёв

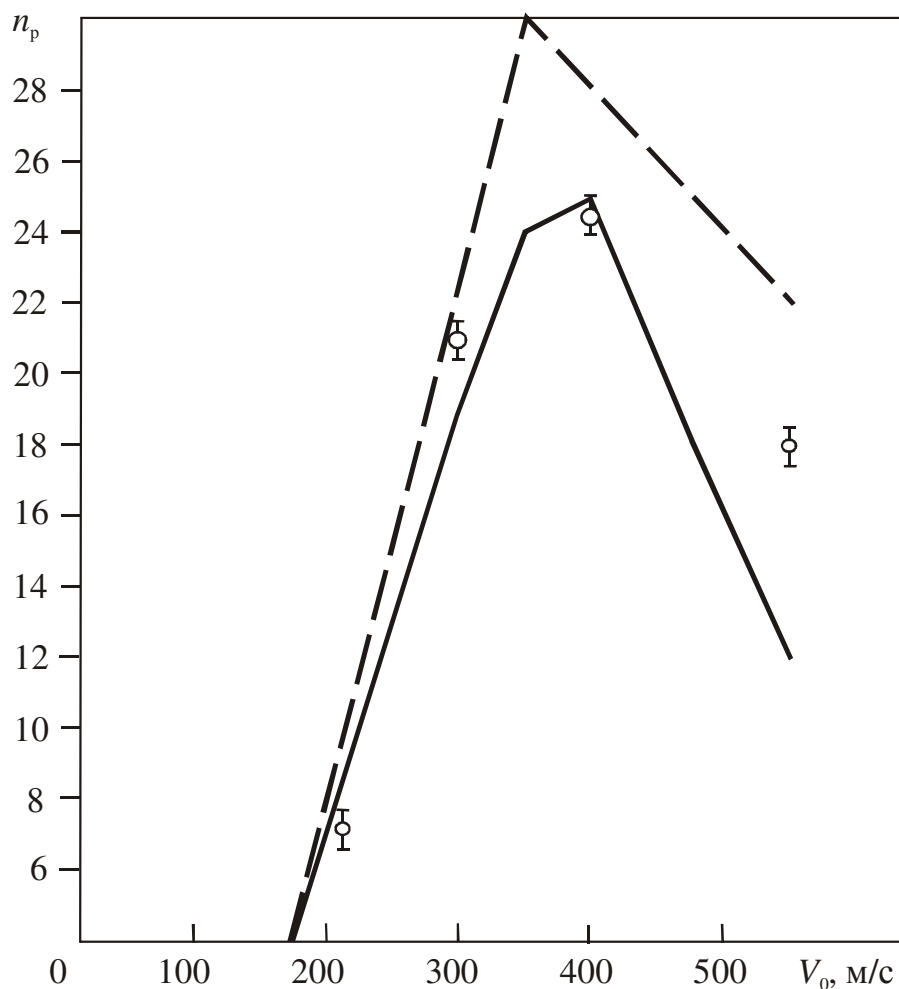


Рис. 12. Сравнение экспериментального числа пробитых слоёв БП с расчётными для БЖ 2-го варианта в зависимости от начальной скорости шарика ($m = 7,1$ г): ———— – число пробитых слоёв в конце 3-го периода; - - - - максимально возможное число пробитых слоёв

Результаты экспериментов по числу пробитых слоёв БП для двух вариантов БЖ – для общей защиты тела с демпфером толщиной 5мм и с дополнительной защитой ЖВО с демпфером толщиной 15 мм в основном соответствуют расчётным при доверительном интервале обработанных каждая по 6 выстрелам экспериментальных точек 5-7 %. Некоторые из этих данных представлены на рис.

11, 12. Как и ожидалось действительное число пробитых слоёв несколько выше, чем для конца 3-го периода, зато существенно ниже максимально возможного.

Выводы

1. Разработана приближённая математическая модель удара жёстким сферическим ударником – имитатором вторичных осколков – о тканевый БП авиационного БЖ при условии отсутствия проскальзывания ударника через пакет, которая позволяет рассчитать все основные характеристики удара – кинематические и динамические параметры ударника, напряжения и деформации в слоях ткани, минимальное и максимально возможное число пробитых слоёв.

2. На основании расчётов для БП из ткани СВМ, арт. 56319, с демпфером из объёмной ткани арт. 5754, показано, что в диапазоне скоростей стального шарика 150 – 550 м/с и массе 0,5...8,0 г баллистическая стойкость пакета обеспечивается при числе слоёв ткани, равной 30.

3. Экспериментальным путём показано, что пробоев БП вследствие проскальзывания шарика можно избежать, разместив 1 слой ПВХ между 25-м и 26-м слоями ткани в 30-слойном пакете.

4. Экспериментальные числа пробитых слоёв БП с указанной структурой с погрешностью 5-7 % соответствуют расчётам.

Библиографический список

1. Аверьянов А.А., Зотов В.А., Тазетдинов Р.Г., Твердохлеб В.А. Экспериментальное исследование защитных характеристик авиационного бронежилета // Материалы XIII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы

механики конструкций и сплошных сред» им. А. Г. Горшкова (Ярополец, 12-16 февраля 2007 г., Москва 19-20 февраля 2007 г.). – М.: МАИ, 2007 – с. 5-14.

2. Аверьянов А.А., Газетдинов Р.Г., Твердохлеб В.А., Фадеев Г.В. Экспериментальное исследование механических характеристик баллистической ткани для авиационного бронезиленета (БЖ) // Материалы XIV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А. Г. Горшкова (Ярополец, 18-22 февраля 2008 г.). – М.: МАИ, 2008 – с. 5.

3. Ридель В.В., Гулий Б.В. Динамика мягких оболочек. – М.: Наука, 1980 – 205 с.

4. Тимошенко С.П., Войновский – Кригер С. Пластинки и оболочки / Пер. с англ. В.И. Контовта под ред. Г.С. Шапиро. Изд. второе, стереотипное. М.: Наука, 1966 – 637 с.

5. Аверьянов А.А., Зотов В.А., Годунова Е.А., Твердохлеб В.А. Баллистический защитный пакет. Пат. РФ № 42648, заявл. 2004.08.04, опубл. 2004.12.10.