

УДК 623.445.1
DOI: 10.15372/PMTF202315405

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОНИКАНИЯ УДАРНИКОВ В МЯГКИЕ ТЕКСТИЛЬНЫЕ ПРЕГРАДЫ

А. В. Петюков, А. И. Боброва, И. Р. Гришин,
Д. А. Иванов, М. Ю. Сотский

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
Москва, Россия

E-mails: petyukov_a@bmstu.ru, bobrovaai@student.bmstu.ru, grishinir@student.bmstu.ru,
ivanovda2@student.bmstu.ru, msotsky.bmstu@mail.ru

Предложена упрощенная численная методика моделирования проникания ударников в текстильные преграды, в которой учитываются тип плетения ткани, сила трения между нитями и между ударником и тканью, поперечные размеры ткани. На основе сравнения экспериментальных и расчетных данных выбраны необходимые расчетные параметры. С помощью предлагаемой методики проведена оценка баллистической стойкости комбинированной защитной композиции, позволяющей уменьшить заброневое воздействие. Исследована задача о влиянии формы ударника на баллистическую стойкость текстильной бронезащиты.

Ключевые слова: текстильная преграда, численные методы, предельная скорость пробития, баллистическая стойкость, мезомоделирование

Введение. В локальных вооруженных конфликтах основная доля потерь личного состава приходится на осколочные поражения. Для защиты от них используются комбинированные защитные преграды, в составе которых присутствуют ткани из высокопрочных параарамидных волокон (кевлар, тварон, СВМ, русар, армос). Это обусловлено высоким уровнем физико-механических характеристик данных тканей (прочность на растяжение — 5,5 ГПа, скорость распространения продольных волн — 10 км/с), превышающих параметры высокопрочных броневых сталей [1].

Одним из основных методов исследования баллистической стойкости бронезащиты вообще и текстильных бронепакетов в частности является экспериментальный метод [2–7]. Наряду с преимуществами этот метод имеет ряд недостатков, в частности необходимость значительных затрат на создание установки, ее настройку и отладку. Кроме того, имеются трудности при интерпретации полученных результатов.

Теоретические методики можно разделить на два класса: инженерные и численные. В качестве примера инженерной методики можно привести методику, предложенную в работе [8]. Бронепакет представляется в виде системы эквивалентных нитей, при этом предполагается, что основное сопротивление прониканию ударника оказывают нити, проходящие непосредственно через область воздействия, т. е. используется модель крест — колокол. В данной методике кинетическая энергия пули приравнивается к работе деформирования текстильного бронепакета, что позволяет определить соотношение для предельной



Рис. 1. Модель нити в виде набора балочных элементов

скорости пробития, зависящей от эмпирических коэффициентов $\alpha, \beta_1, \gamma, \beta$. Недостатками данной методики являются наличие трудно подбираемых коэффициентов $\alpha, \beta_1, \gamma, \beta$ и отсутствие учета влияния граничных условий, поперечных размеров текстильного бронепакета и свойств подложки на предельную скорость пробития.

Наиболее распространенным способом численного моделирования проникания ударников в текстильные преграды является мезоуровневое моделирование. В этом случае слои ткани моделируются в виде отдельных нитей, переплетенных между собой. Сами нити обычно представляются в виде набора объемных или оболочечных конечных элементов [9–11]. Преимуществом данного подхода является возможность учета искривленности нитей в составе ткани, механизмов вытягивания, проскальзывания нитей относительно друг друга и др. Недостатками являются значительные вычислительные затраты и время расчета реальных защитных композиций с числом слоев 8–90 (необходимость использования суперкомпьютеров).

Целью данной работы является разработка численной методики для оценки параметров процесса проникания пули стрелкового оружия в текстильные защитные преграды без значительных вычислительных и временных затрат.

1. Описание численной методики. В основе предлагаемой методики лежит метод конечных элементов в лагранжевой постановке, реализованный в программном комплексе LS-DYNA [12, 13]. Этот метод базируется на законах сохранения массы, импульса и энергии, записанных в дифференциальной форме и дополненных определяющими соотношениями, описывающими механическое и физическое поведение материалов.

В качестве граничных условий задавались условия контактного взаимодействия между нитями и между ударником и тканью, моделируемого методом штрафных функций.

При моделировании проникания ударников в текстильные преграды необходимо учитывать трение как между ударником и тканью, так и между нитями в составе ткани. В данной работе сила трения задавалась законом Кулона.

Дискретизация нити осуществлялась путем ее представления в виде набора двухузловых балочных элементов [12] с круглым поперечным сечением [14, 15].

Конечно-элементная модель нити представлена на рис. 1.

Механическое поведение материалов нитей и ударников описывалось с помощью билинейной упругопластической модели. Также использовался критерий разрушения нитей — превышение предельной пластической деформации. Ткань Twaron CT 717 имела следующие параметры: поверхностная плотность — 280 г/м², толщина — 0,4 мм. Параметры нити Twaron имели следующие значения: плотность — 1440 кг/м³, модуль упругости — 87 ГПа, предел текучести — 2150 МПа, предельное удлинение при разрыве — 3,4 %.

2. Тестирование разработанной методики. Важным этапом разработки методики является этап ее настройки, а именно подбор численных параметров для адекватного воспроизведения экспериментальных данных. В настоящей работе варьировались количество расчетных ячеек, коэффициент трения между нитями ткани и коэффициент трения между тканью и ударником. Результаты расчетов сравнивались с двумя наборами экспериментальных данных, первый из которых приведен в работе [16]. В [16] определялась предельная скорость пробития одного и двух слоев ткани Twaron CT 717 ((76 ± 3) и (147 ± 3) м/с соответственно) сферическими стальными ударниками диаметром 12 мм и массой 7 г.

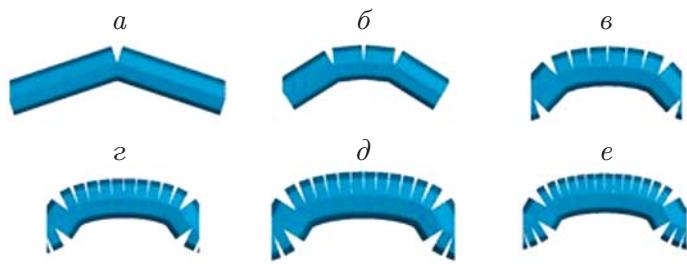


Рис. 2. Число ячеек на полуволне нити:

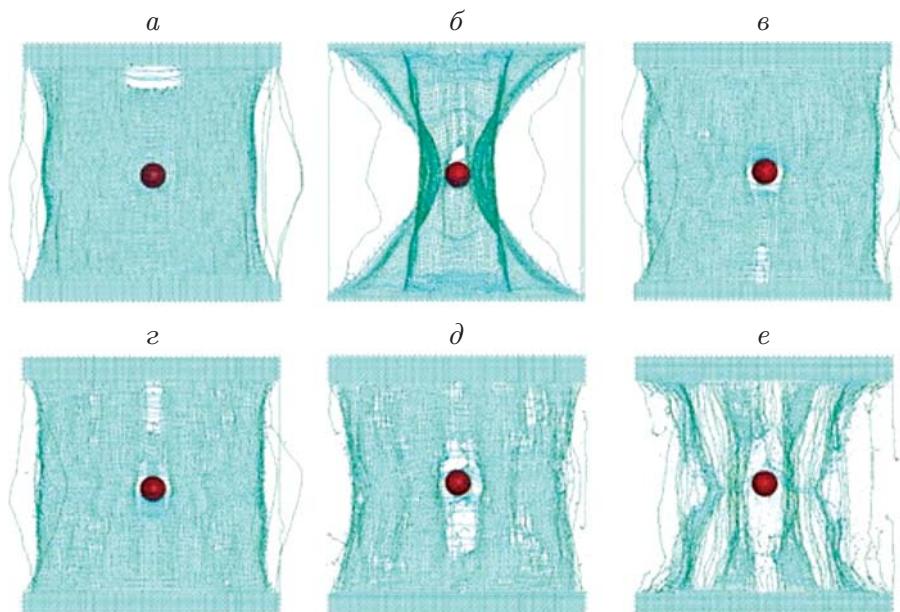
a — $n = 2$, б — $n = 4$, в — $n = 8$, г — $n = 12$, д — $n = 14$, е — $n = 16$ 

Рис. 3. Результаты расчета пробития одного слоя ткани при различном числе ячеек:

a — $n = 2$, б — $n = 4$, в — $n = 8$, г — $n = 12$, д — $n = 14$, е — $n = 16$

Количество ячеек подбиралось в полуволне нити (рис. 2). На рис. 3 приведены результаты расчета пробития одного слоя ткани при различном количестве ячеек n . При $n \geq 12$ балочные элементы в полуволне нити начинали пересекаться (рис. 4), вследствие чего метод штрафных функций давал неверные результаты. В итоге происходило быстрое разрушение ткани. Поэтому во всех дальнейших расчетах было выбрано четыре ячейки на полуволне нити.

Далее были подобраны коэффициенты трения между нитями $\mu = 0,9$ и между тканью и ударником $\mu = 0,7$, обеспечивающие совпадение расчетных и экспериментальных данных: для одного слоя ткани Twaron CT 717 при скорости ударника $V_0 = 73$ м/с — непробитие, при $V_0 = 79$ м/с — пробитие; для двух слоев ткани при скорости $V_0 = 144$ м/с — непробитие, при $V_0 = 150$ м/с — пробитие.

Также было проведено сравнение с данными испытаний, проводившихся в кластере мультикалиберной баллистической установки Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Установка состояла из пневматической пушки БУ-80 диаметром 80 мм, отсекателя, тканевой мишени, уловителя. В качестве ударника использовался шарик диаметром 12 мм и массой 7 г. Ударник взаимодействовал с тканевой

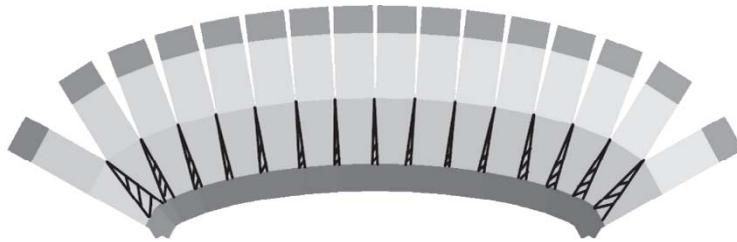


Рис. 4. Ячейки на полуволне нити (заштрихованные области — области пересечения ячеек)

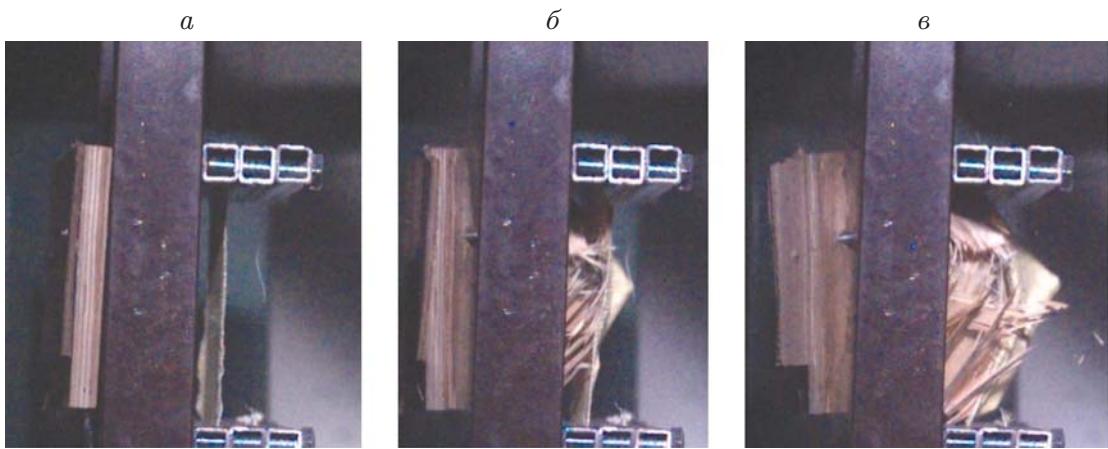


Рис. 5. Процесс пробития преграды при начальной скорости ударника $V_0 = 134$ м/с:
а — $t = 0$, б — $t = 3125$ мкс, в — $t = 3625$ мкс

мишенью, в случае пробития мишени ударник останавливался в уловителе. Начальная и остаточная скорости регистрировались высокоскоростной видеокамерой Phantom v1210. В качестве мишени использовалась ткань Twaron CT 714, имевшая следующие характеристики: поверхностная плотность — 190 г/м², тип плетения — полотно, толщина — 0,3 мм, количество элементов на участке длиной 10 см: основа — 85, уток — 85.

На рис. 5, 6 приведены результаты испытаний. Видно, что при скорости ударника $V_0 = 134$ м/с ткань не пробивается, происходит образование деформационного купола. При $V_0 = 139$ м/с также образуется деформационный купол, но при этом происходят обрыв нитей и пробитие ткани.

Для ткани Twaron CT 714 были выбраны значения коэффициентов трения между нитями — 1,0, между тканью и ударником — 0,75.

3. Оценка влияния поперечных размеров текстильных бронепакетов на их баллистическую стойкость. В экспериментах, описанных в работе [17], установлено, что на баллистическую стойкость текстильных преград существенное влияние оказывают поперечные размеры бронепакета. Для проверки разработанной методики проведены расчеты в той же постановке. Свободно подвешенные текстильные преграды квадратной формы с размерами от 40 × 40 до 240 × 240 мм подвергались обстрелу стальными шариками диаметром 6,35 мм и массой 1,05 г. Бронепакеты состояли из 12 слоев баллистической ткани Twaron CT 717. В расчетах также варьировался тип переплетения: полотно, саржа и сатин.

На рис. 7, 8 показаны бронепакеты полотняного и сатинового переплетения после пробития. Преграды размером до 60 × 60 мм полотняного переплетения пробиваются не за

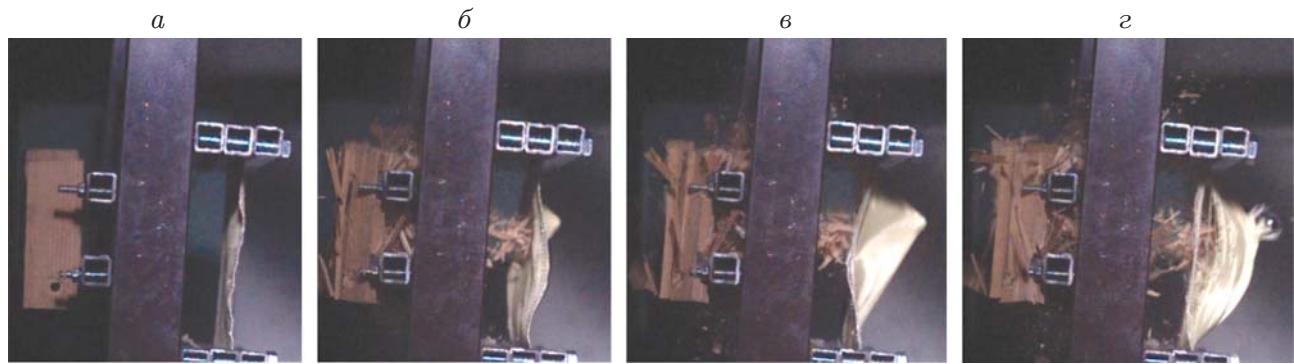


Рис. 6. Процесс пробития препятствия при начальной скорости ударника $V_0 = 139$ м/с:
а — $t = 0$, б — $t = 2750$ мкс, в — $t = 3000$ мкс, г — $t = 3250$ мкс

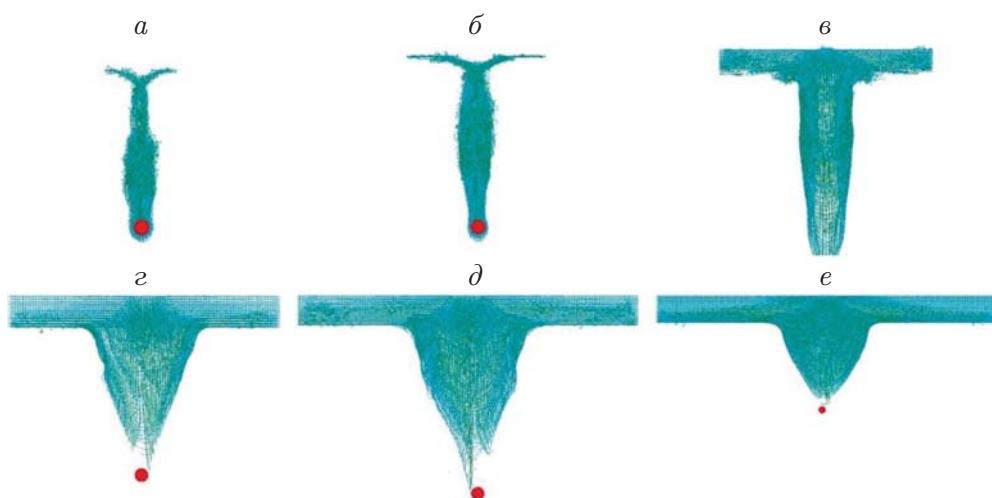


Рис. 7. Текстильные бронепакеты различного размера с плетением типа полотно после пробития:

а — 40×40 , б — 60×60 , в — 100×100 , г — 120×120 , д — 160×160 , е — 240×240

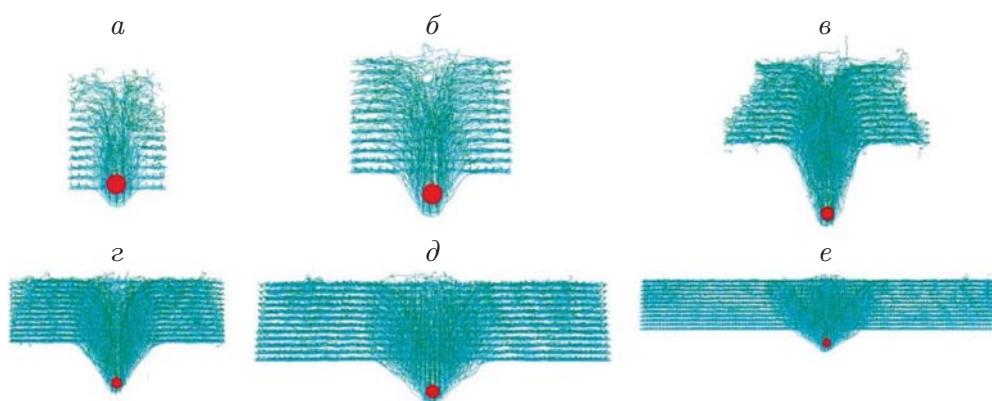


Рис. 8. Текстильные бронепакеты различного размера с плетением типа сатин после пробития:

а — 40×40 , б — 60×60 , в — 100×100 , г — 120×120 , д — 160×160 , е — 240×240

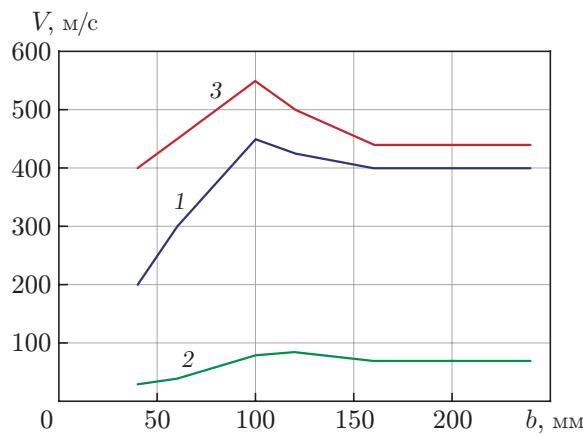


Рис. 9

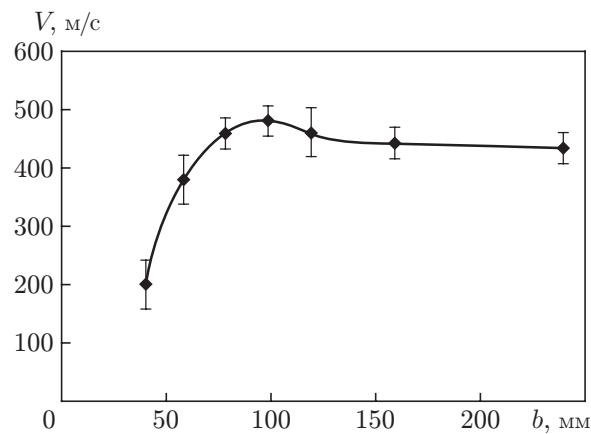


Рис. 10

Рис. 9. Зависимость предельной скорости пробития V от поперечного размера бронепакета b :

1 — плетение типа саржа, 2 — плетение типа полотно, 3 — плетение типа сатин

Рис. 10. Экспериментальная зависимость предельной скорости пробития 12-слойного бронепакета из ткани артикула 56319А от его поперечного размера [17]

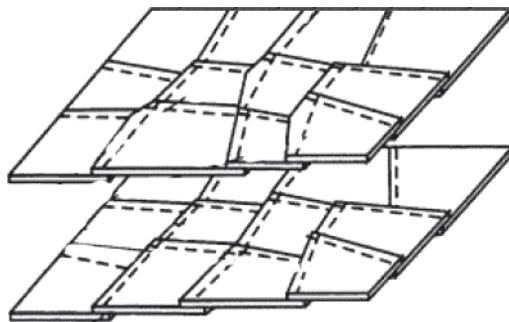


Рис. 11. Два многофрагментных слоя бронеэлемента [18]

счет обрыва нитей, а за счет их вытягивания. Бронепакет размером 100×100 мм пробивается с обрывом нитей, но при этом их вытягивание играет существенную роль. Нити бронепакетов размером 120×120 мм и больше порваны практически без вытягивания. Для саржевого переплетения получены аналогичные результаты. Бронепакеты с сатиновым типом плетения пробиваются за счет вытягивания нитей (см. рис. 8).

На рис. 9 приведены результаты расчетов в виде зависимостей предельной скорости пробития от поперечных размеров бронепакета, качественно хорошо согласующихся с экспериментальными данными [17] (рис. 10).

Защитные композиции, в которых используются ткани с различными поперечными размерами, описаны в [18, 19]. В этих композициях слои бронепакета формируются по принципу “лоскутного одеяла”. Фрагменты баллистических тканей уложены внахлест и скреплены швами из слабопрочных нитей (рис. 11).

С помощью разработанной методики были проведены расчеты процесса проникания стандартного стального имитатора осколка массой 1,05 г и диаметром 6,35 мм со скоростью $V_0 = 400$ м/с в цельнокроеную композицию из 12 слоев (два последних, тыльных слоя подвергнуты поверхностной обработке) и в композицию, включающую два слоя цельнокроеной ткани, восемь слоев ткани из фрагментов и два слоя цельнокроеной поверхностью обработанной ткани. Конструкции располагались на подложке из пластилина.

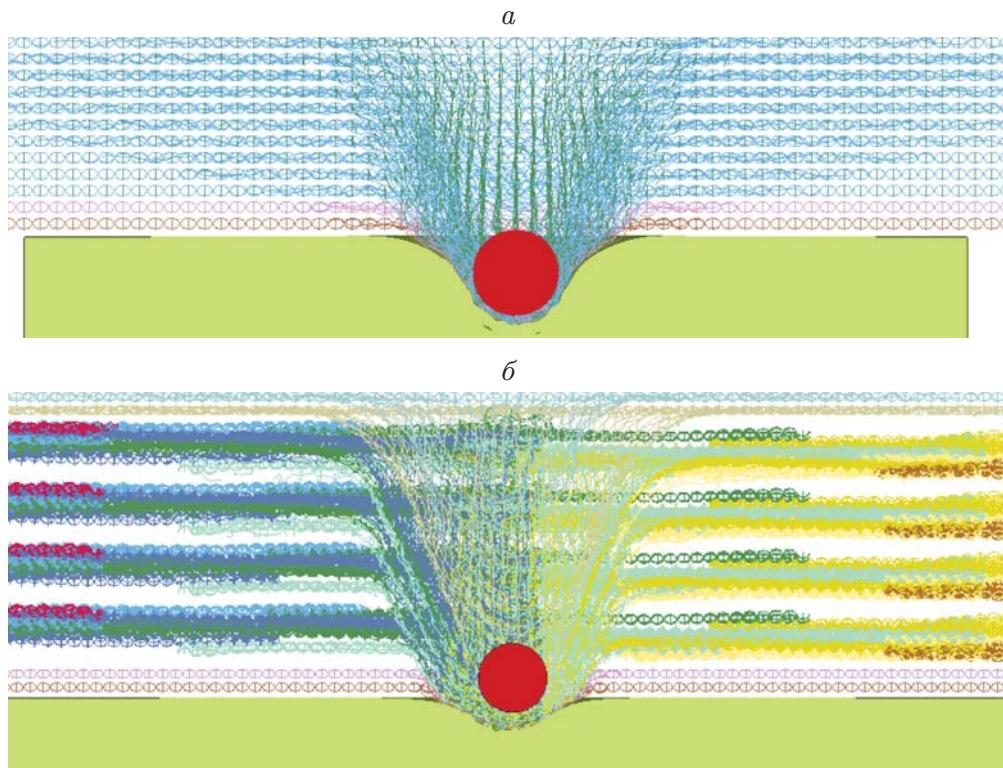


Рис. 12. Деформированное состояние цельнокроеной (а) и комбинированной (б) конструкций

Используемые в расчетах физико-механические характеристики пластилина имели следующие значения: плотность — $1400 \text{ кг}/\text{м}^3$, модуль упругости — 0,2 ГПа, коэффициент Пуассона — 0,2, предел текучести — 5 МПа [11]. Поверхностно обработанная ткань имела следующие физико-механические характеристики: плотность — $1540 \text{ кг}/\text{м}^3$, модуль упругости — 20 ГПа, коэффициент Пуассона — 0,25, предел текучести — 2150 МПа.

На рис. 12 показаны деформированные конфигурации в момент остановки ударника в пластилиновой подложке. Видно, что комбинированная композиция обеспечивает менее значительный тыльный прогиб по сравнению с цельнокроеной композицией. Это обусловлено тем, что слои, состоящие из фрагментов, в отличие от цельнокроенных слоев, пробиваются за счет вытягивания, а не обрыва нитей. Увеличивается перемещение нитей относительно друг друга, следовательно, увеличивается значение работы силы трения и уменьшается кинетическая энергия ударника. Глубина вмятины в пластилиновой подложке для комбинированной конструкции составляет 3,5 мм, для конструкции с цельнокроенными слоями — 6,5 мм.

4. Оценка влияния формы ударника. Для исследования влияния формы ударника на баллистическую стойкость тканевых защитных композиций проведена серия численных расчетов, в которых стальные ударники различной формы (сфера, прямоугольная призма с размерами ребер $3,6 \times 15,2 \times 15,2 \text{ мм}$ и кубик с размером ребра 9,6 мм) пробивали восемь слоев ткани Twaron CT 717 и подложку из пластилина со скоростью $V = 250 \text{ м}/\text{с}$. Для сферического ударника рассматривались случаи удара по нормали и под углом, равным 45° . Для призмы рассматривались варианты удара по нормали меньшей гранью, большей гранью и повернутой под углом призмой. Также рассматривался вариант проникания ударника под углом 45° (рис. 13). Для кубика рассматривались варианты удара гранью и повернутым кубиком по нормали и под углом 45° к ней (рис. 14).

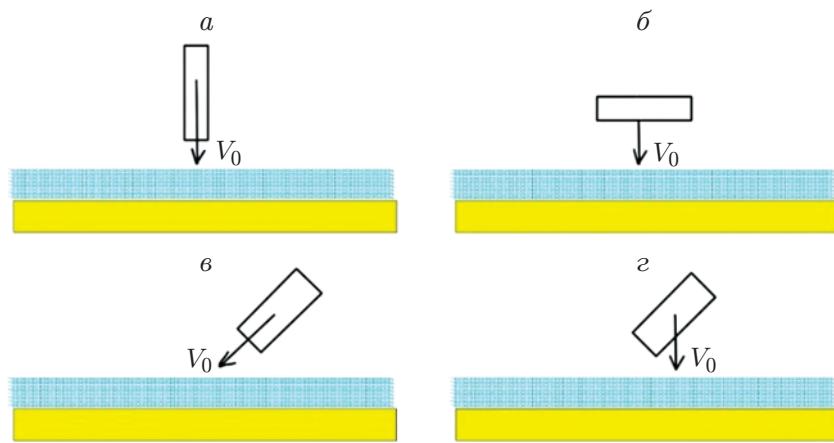


Рис. 13. Постановки задач с ударником в виде прямоугольной призмы:
a — удар по нормали меньшей гранью, *б* — удар по нормали большей гранью, *в* — удар под углом 45° повернутой призмой, *г* — удар по нормали повернутой призмой

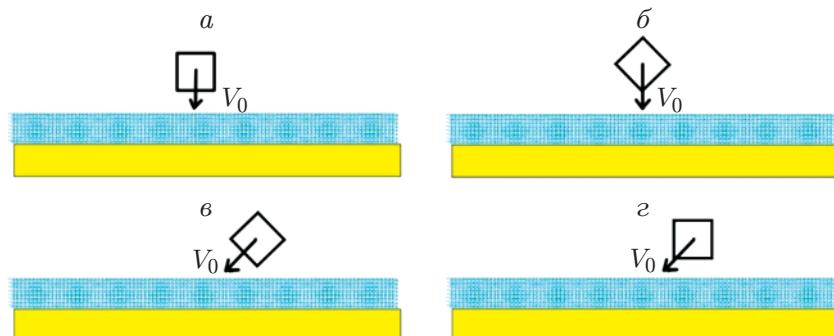


Рис. 14. Постановки задач с ударником в виде куба:
a — удар по нормали гранью, *б* — удар по нормали повернутым под углом кубиком, *в* — удар под углом 45° повернутым кубиком, *г* — удар гранью под углом 45°

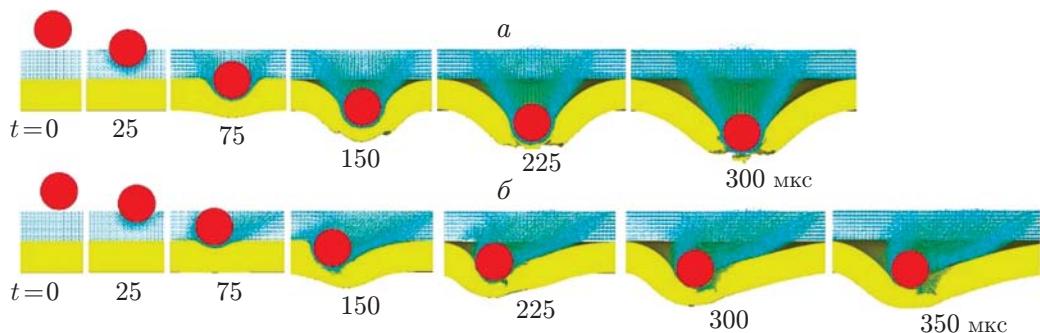


Рис. 15. Результаты расчета для ударника в виде сферы:
a — проникание по нормали, *б* — проникание под углом

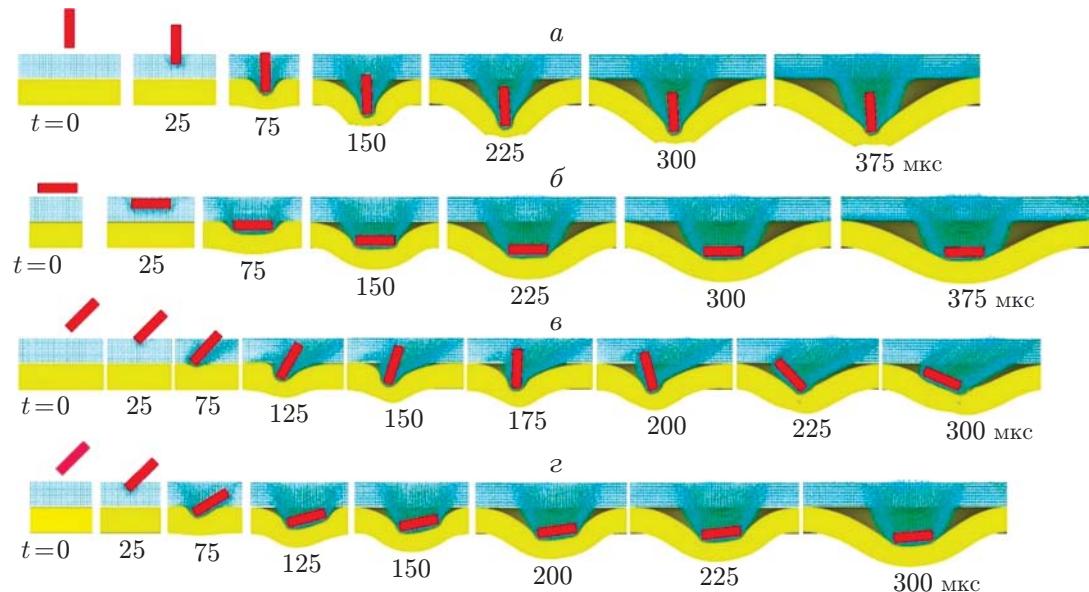


Рис. 16. Результаты расчета для ударника в виде призмы:
 a — удар по нормали меньшей гранью, b — удар по нормали большей гранью, c — удар под углом, g — удар по нормали повернутой призмой

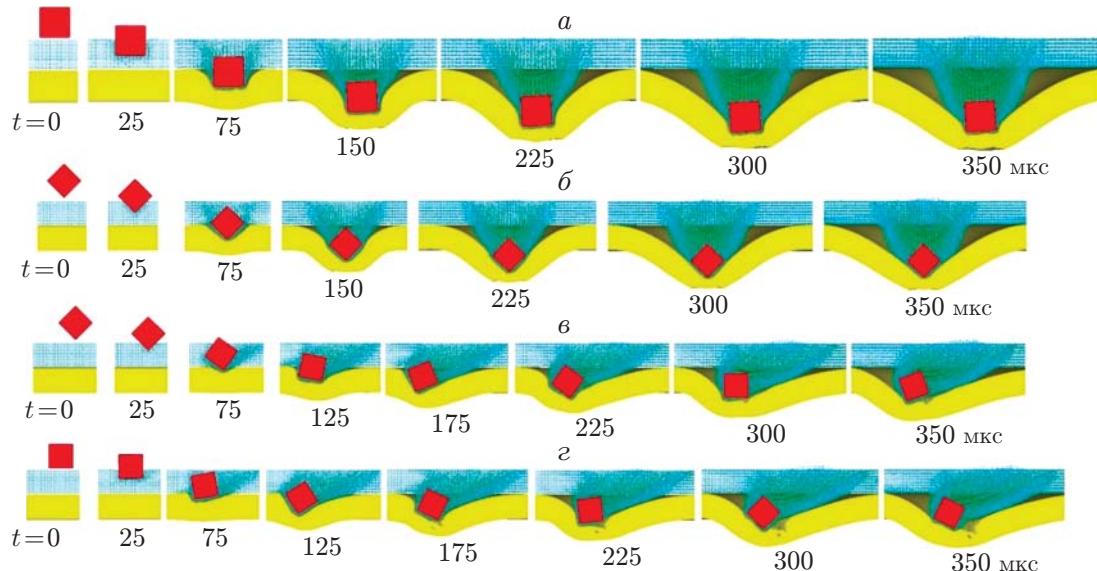


Рис. 17. Результаты расчета для ударника в виде кубика:
 a — удар по нормали гранью, b — удар по нормали повернутым под углом кубиком,
 c — удар под углом повернутым кубиком, g — удар гранью под углом

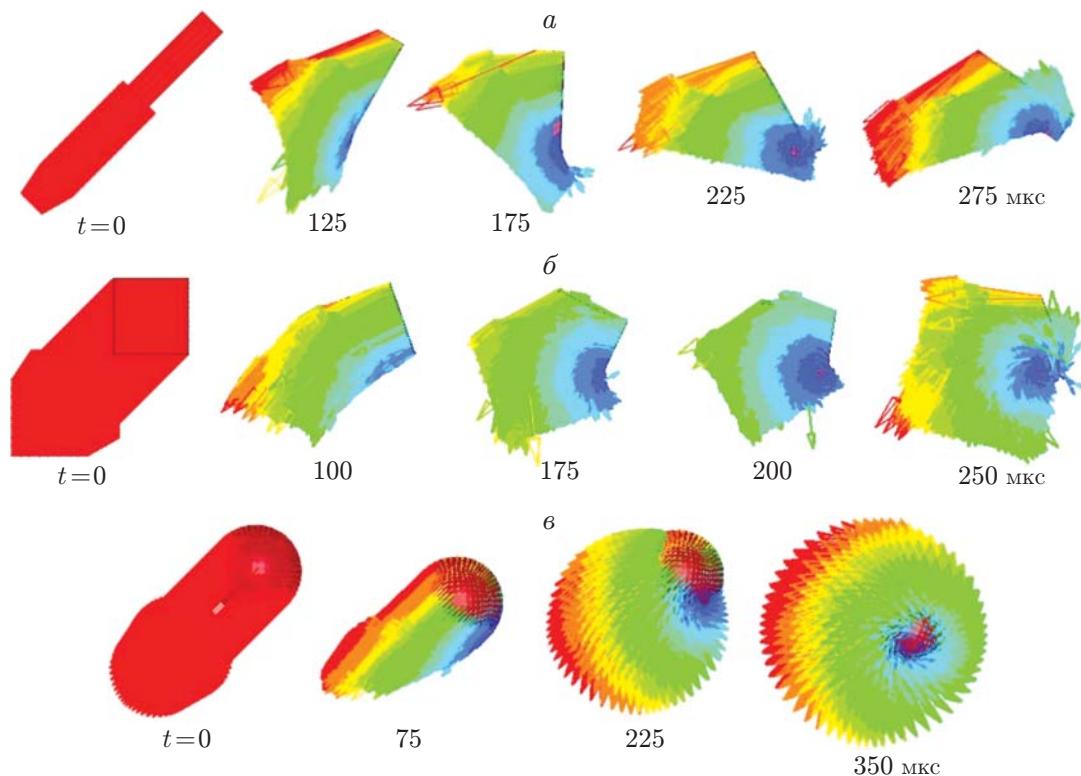


Рис. 18. Изменение направления скорости ударника:
а — удар призмой, б — удар кубиком, в — удар шариком

На рис. 15–17 приведены результаты расчетов проникания ударников различной формы в различные моменты времени. Видно, что призма и кубик в процессе проникания теряют устойчивость и разворачиваются. Это происходит вследствие наличия сил трения между ударником и тканью: часть ударника, непосредственно прилегающая к ткани, быстро тормозится, а затем вследствие интенсивного перемещения нитей под ударником появляется дополнительная компонента скорости, разворачивающая его. На рис. 18 показано изменение направления скорости ударника в различные моменты времени. В случае сферического ударника наблюдается его интенсивное проскальзывание относительно ткани (см. рис. 18, в).

Заключение. Разработана упрощенная методика численного моделирования баллистической стойкости текстильных бронепакетов, позволяющая учитывать тип плетения ткани, вытягивание нити из ткани, а также трение как между нитями, так и между ударником и тканью. На основе сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными проведены корректировка параметров методики и ее тестирование.

Выполнены расчеты для двух вариантов защитных композиций: цельнокроеной, состоящей из 12 слоев ткани полотняного переплетения, и комбинированной, в которой промежуточные слои состоят из малоразмерных фрагментов ткани, скрепленных нитью. Из результатов численного моделирования следует, что комбинированная конструкция обеспечивает уменьшение тыльного прогиба на 85 %.

Показано, что ударники в форме прямоугольной призмы и кубика при проникании в текстильные преграды теряют устойчивость и разворачиваются. Вследствие этого происходит уменьшение их бронепробивной способности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кобылкин И. Ф.** Материалы и структуры легкой бронезащиты: Учеб. / И. Ф. Кобылкин, В. В. Селиванов. М.: Изд-во Моск. гос. техн. ун-та, 2014.
2. **Беспалов И. А.** Особенности взаимодействия имитатора осколка с текстильными бронепакетами под углом от нормали // Вопр. оборон. техники. Сер. 16. Техн. средства противодействия терроризму. 2011. № 5/6. С. 58–61.
3. **Баженов С. Л., Гончарук Г. П.** Влияние воды на силу трения нитей в арамидных тканях // Высокомолекуляр. соединения. Сер. А. 2014. Т. 56, № 2. С. 185–196.
4. **Xu H., Yu D., Cui J., et al.** The hypervelocity impact behavior and energy absorption evaluation of fabric // Polymers. 2023. V. 15, N 6. 1547. DOI: 10.3390/polym15061547.
5. **Ахмед П. С., Абед М. С., Салим И. А.** Экспериментальное исследование и численное моделирование баллистического воздействия на гибридный композит (оксид алюминия — тканый материал — эпоксидная смола — алюминий), используемый при изготовлении бронежилета // ПМТФ. 2023. Т. 64, № 4. С. 3–13.
6. **Чжоу Н., Лю Д., Нянь Ц. и др.** Защитные характеристики трехслойной мишени, полученной сваркой взрывом и пробиваемой сферическими частицами при различных углах соударения // ПМТФ. 2022. Т. 63, № 5. С. 42–50.
7. **Штерцер А. А., Злобин Б. С., Киселев В. В. и др.** Характеристики армированного сверхвысокомолекулярного полиэтилена при его пробивании // ПМТФ. 2020. Т. 61, № 3. С. 180–189.
8. **Кобылкин И. Ф., Григорян В. А., Маринин В. М.** Энергетический подход к определению предельной скорости пробития текстильных бронепакетов // Вопр. оборон. техники. Сер. 15. Композит. неметал. материалы в машиностроении. 2008. Вып. 1/2. С. 10–17.
9. **Nilakantan G., Keefe M., Wetzel E. D., et al.** Computational modeling of the probabilistic impact response of flexible fabrics // Composite Structures. 2011. V. 93. P. 3163–3174. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.06.013.
10. **Nilakantan G., Nutt S.** Effects of clamping design on the ballistic impact response of soft body armor // Composite Structures. 2014. V. 108. P. 137–150. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.09.017.
11. **Игнатова А. В.** Анализ кинетики деформирования и разрушения слоистых тканевых структур с тонкими покрытиями при локальном ударе: Дис. канд. техн. наук. Челябинск, 2021.
12. **Hallquist J. O.** LS-DYNA theory manual. Livermore: Livermore Software Technol. Corp., 2006.
13. **Бабкин А. В.** Численные методы в задачах быстропротекающих процессов: Учеб. для вузов. 2-е изд., испр. / А. В. Бабкин, В. И. Колпаков, В. Н. Охитин, В. В. Селиванов. М.: Изд-во Моск. гос. техн. ун-та, 2006.
14. **Chu Y., Min S., Chen X.** Numerical study of inter-yarn friction on the failure of fabrics upon ballistic impacts // Materials Design. 2017. V. 115. P. 299–316. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.11.013.
15. **Папков С. П.** Полимерные волокнистые материалы. М.: Химия, 1986.
16. **Guo Y. B., Chiang H. J., Deng J. J., Shim V. P. W.** Projectile impact on fabric-metal assemblies: Influence of fabric-metal sequence // Intern. J. Impact Engng. 2019. V. 127. P. 1–16.
17. **Кобылкин И. Ф., Маринин В. М., Беспалов И. А.** Влияние поперечных размеров текстильных бронепакетов на их противоосколочную стойкость // Оборон. техника. 2010. № 1/2. С. 19–23.

18. **Пат. 2251651C1 RU, МПК F 41 H 1/02 (2000.01).** Тканевый бронеэлемент и материал для его изготовления / Е. Ф. Харченко, Е. В. Куприянова. Заявл. 23.10.2003; Опубл. 10.05.2005.
19. **Пат. 2147363C1 RU, МПК F 41 H 1/02 (2000.01), F 41 H 5/04 (2000.01).** Защитный экран / Е. В. Куприянова, Е. Ф. Харченко, А. Г. Полушкин, Ю. В. Русин. Заявл. 11.09.1998; Опубл. 10.04.2000.

*Поступила в редакцию 9/X 2023 г.,
после доработки — 29/X 2023 г.
Принята к публикации 27/XI 2023 г.*
