

Моделирование сложной ударной нагрузки на систему защиты с нерегулярной поверхностью при воздействии высокоскоростных поражающих элементов

Modelling of complex impact loading on a protection system with an irregular surface under high-velocity projectile impact

И.А. Ионченков¹ ©, В.В. Ильин² ©

I.A. Ionchenkov¹ ©, V.V. Ilyin² ©

¹ Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации, г. Пермь, Российская Федерация

² Пермский государственный национальный исследовательский университет Российской Федерации, г. Пермь, Российская Федерация

¹ E-mail: ionchenkovia@rosgvard.ru

² E-mail: ilin.vad12@inbox.ru

Аннотация. В работе рассматривается вопрос моделирования сложной ударной нагрузки на защитную систему с нерегулярной поверхностью при воздействии высокоскоростных поражающих элементов. Разработана математическая модель, основанная на уравнениях механики сплошной среды с учётом упругопластического деформирования, критериев отрывного и сдвигового разрушения, а также двухкомпонентной структуры материала. Полученные результаты позволяют количественно оценить перераспределение кинетической энергии ударника, определить предельные параметры пробития и обосновать конструктивные решения по повышению стойкости модульных защитных систем.

Abstract. The paper examines the problem of modelling complex impact loading on a protection system with an irregular surface subjected to high-velocity projectiles. A mathematical model has been developed based on the equations of continuum mechanics, accounting for elastoplastic deformation, spall and shear failure criteria, and the two-component structure of the material. The results obtained allow for a quantitative assessment of the impactor's kinetic energy redistribution, determination of the ultimate penetration parameters, and substantiation of design solutions aimed at increasing the resistance of modular protection systems.

Ключевые слова: высокоскоростное соударение; поражающий элемент; нерегулярная поверхность; ударно-волновое нагружение; численное моделирование; напряжённо-деформированное состояние; критерии разрушения; структурно-неоднородная преграда; стойкость к пробитию; защитная система

Keywords: high-velocity impact; projectile; irregular surface; shock-wave loading; numerical modelling; stress-strain state; failure criteria; structurally inhomogeneous barrier; penetration resistance; protection system

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ионченков И.А., Ильин В.В. Моделирование сложной ударной нагрузки на систему защиты с нерегулярной поверхностью при воздействии высокоскоростных поражающих элементов // Академический вестник войск национальной гвардии Российской Федерации. – 2026. – № 2. – С. 53–58.

Проблематика исследования закономерностей высокоскоростного взаимодействия поражающего элемента с твёрдой преградой сохраняет устойчивую научно-практическую значимость в контексте проектирования средств повышения живучести вооружения и военной техники. Анализ динамики ударно-волновых процессов при интенсивных скоростных режимах нагружения позволяет обосновывать конструктивные решения, направленные на снижение остаточного пробивного действия и перераспределение импульса взаимодействия.

Ключевым фактором, определяющим эффективность современных бронезащитных систем, вы-

ступает структурная гетерогенность материалов. Наличие неоднородностей по поверхности и в объёме способствует формированию сложной картины напряжённо-деформированного состояния, что, в свою очередь, обеспечивает рассеивание энергии удара и локализацию повреждений. Комбинирование разнородных по физико-механическим характеристикам компонентов в составе защитной конструкции формирует предпосылки для повышения сопротивляемости проникновению при одновременном снижении массы изделия.

Рационализация конструктивной схемы защитных устройств с учётом особенностей защищаемого

объекта позволяет обеспечить требуемый уровень стойкости при сохранении технологичности изготовления, в том числе в условиях ограниченных производственных возможностей. Унификация элементов, простота сборки и мобильность конструкции приобретают особое значение в ситуации сокращения материальных затрат, временных ресурсов и необходимости масштабного применения в войсковой практике.

Использование композиционных и модульных решений создаёт условия для защиты критически важных узлов, агрегатов и функциональных модулей технических систем. В этой связи особую актуальность приобретает исследование фундаментальных механизмов сопротивления гетерогенных структур воздействию поражающих факторов, включая процессы локальной пластической деформации, разрушения и перераспределения кинетической энергии.

Комплексный анализ современных направлений развития средств защиты свидетельствует о целесообразности формирования адаптивных модульных комплексов повышения живучести военной техники. Перспективным вариантом конструктивной реализации выступают гибкие защитные элементы кольчужного типа, сочетающие пространственную подвижность, выраженные энерго рассеивающие характеристики и универсальность применения в составе различных защитных конфигураций (рис. 1).

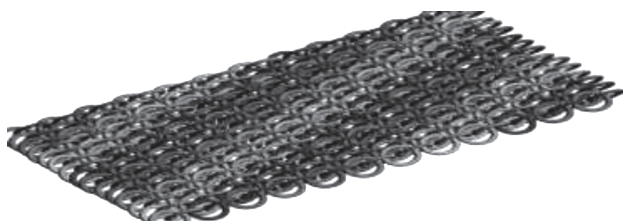


Рис. 1. Структура бронеполотна с нерегулярными поверхностью и объемом

На рисунке 1 представлена схема структуры бронированного полотна типа «кольчуга» с кольцевыми элементами.

Неоднородность пространственной конфигурации бронеполотна, а также присутствие в его объёме системы профилированных элементов (в частности, стенок и радиальных рёбер кольцевых модулей) формируют в корпусе поражающего элемента дополнительные поперечные силовые воздействия. Указанные воздействия индуцируют изгибающие моменты, вследствие чего нарушается его исходная траекторная устойчивость и инициируется отклонение от расчётного направления движения.

Отсутствие жёсткой кинематической фиксации между кольцевыми элементами и наличие у них нескольких степеней свободы обуславливают

сложный нелинейный характер перераспределения ударной энергии. При этом передача импульса носит монотонно возрастающий и пространственно распределённый характер, охватывая значительную площадь защитного полотна. Подобная схема взаимодействия препятствует локализации напряжений в одной зоне и способствует вовлечению в работу всей конструктивной системы.

Демпфирующий эффект реализуется за счёт многократных контактных взаимодействий между кольцевыми элементами, сопровождающимися фрикционными потерями, микропластическими деформациями и частичным разрушением как поражающего тела, так и отдельных элементов модуля. В результате происходит дробление сердечника, снижение его проникающей способности и поэтапное рассеивание кинетической энергии удара.

Финальная стадия поглощения остаточной энергии обеспечивается баллистической преградой, выполненной из мягкого энергоёмкого материала. Данный слой осуществляет улавливание фрагментов поражающего элемента и разрушенных частей кольцевой структуры, обеспечивая их остановку и диссипацию остаточного импульса за счёт внутренних деформационных процессов и вязкоупругого сопротивления материала.

Особенностью системы является использование резины транспортерной ленты в качестве первого внешнего слоя. Резиновая лента способна снижать скорость поражающего элемента, вызывая частичную потерю его кинетической энергии ещё до столкновения с основным кольчужным слоем. Второй внутренний слой расположен за кольчужой и представляет собой дополнительный слой толщиной 5 мм, предназначенный для усиления конструкции и улучшения способности противостоять вторичным факторам, возникающим при попадании поражающего элемента. Его назначение заключается в удерживании обломков поражающего элемента и повышении долговечности системы защиты.

Такое сочетание слоев позволяет достичь максимальной надежности и долговечности, сохраняя при этом умеренную массу и простоту обслуживания. Универсальность конструкции обеспечивает возможность адаптации к различным условиям эксплуатации и применения в широком спектре ситуаций.

В работе [1] приведены результаты моделирования взаимодействия пули и рассматриваемого бронеполотна. Результаты доказывают возможность положительного эффекта по стойкости к воздействию кинетических поражающих элементов структур с нерегулярной поверхностью и объёмом, обладающих свойствами формообразования. В работе [2] описаны принципы изготовления

металлических полотен, напоминающих «кольчугу», и обеспечения стойкости к поражающим элементам стрелкового оружия, а также возможное применение данных структур в средствах военной автомобильной техники. В проанализированных исследованиях в роли ударных элементов применялись пули калибра 5,45 мм. Вместе с тем с инженерно-прикладной точки зрения, ориентированной на развитие и модернизацию средств защиты вооружения и военной техники, особую научно-практическую значимость приобретают результаты экспериментальных и расчетно-численных работ, посвящённых воздействию осколочных поражающих элементов диаметром 4–20 мм и более. Наибольший интерес представляют режимы нагружения, реализуемые в интервале начальных скоростей порядка 1000–2500 м/с и превышающих указанные значения, поскольку именно в данном диапазоне формируются предельные уровни импульсного и ударно-волнового воздействия на конструкционные материалы защитных систем.

Большинство применяемых в настоящее время численных алгоритмов, ориентированных на анализ процессов пробития и проникания при относительно простой конфигурации и геометрии взаимодействующих тел, демонстрируют ограниченную эффективность при исследовании перспективных систем ударостойкой защиты. Это обусловлено тем, что современные защитные конструкции, как правило, характеризуются выраженной структурной неоднородностью, многослойностью и наличием внутренних границ раздела материалов, что существенно усложняет описание их динамического поведения при высокоскоростном нагружении.

С учетом указанных обстоятельств в качестве методологической основы исследования целесообразно использовать численный подход, предложенный в работе [3]. Данный метод ориентирован на моделирование процессов интенсивного деформирования и фрагментационного разрушения материалов в условиях высоких скоростей соударения. Его принципиальным преимуществом является возможность явного выделения поверхностей разрыва сплошности среды, а также корректного учета эволюции контактных и свободных границ. При этом обеспечивается отслеживание как исходно заданных поверхностей, существующих на начальном этапе расчета, так и вновь формирующихся в процессе развития деформационных и разрушительных механизмов. Очевидно, что распределение начальной кинетической энергии поражающего элемента зависит от геометрических параметров бронеполотна: d_w – диаметр гровера; l_a – апертура (видимое на просвет расстояние между гранями гроверов); $l_c - d_w + l_a$ – размер ячейки; d_p – диаметр поражающего элемента.

Для описания характеристик бронеполотна целесообразно использовать следующие безразмерные величины:

$-\varepsilon = d_p / (d_w + l_a)$ – параметр, определяющий число гроверных ячеек, приходящихся на диаметр поражающего элемента;

$-k = l_a / d_w$ – параметр, характеризующий степень дискретности бронеполотна (значение $k = 0$ соответствует сплошной преграде).

В рамках механики сплошной среды математическое описание процессов ударно-волнового нагружения твердых тел строится на ряде допущений: материал рассматривается как сжимаемый и изотропный, а внутренние источники тепловыделения отсутствуют. Такая идеализация позволяет сформировать замкнутую расчетную модель без учета автономных термодинамических механизмов.

При указанных предпосылках динамическое состояние среды описывается системой фундаментальных законов сохранения в дифференциальной форме (1). В нее входят уравнение сохранения массы, определяющее изменение плотности, уравнение движения, характеризующее эволюцию импульса под действием внутренних напряжений, и уравнение энергии, отражающее преобразование механической энергии во внутреннюю [3; 4].

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla_i (\rho v_i) &= 0, \\ \rho \dot{v}_i - \nabla_j \sigma_{ij} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\rho \dot{e} - \sigma_{ij} \ell_{ij} = 0,$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(\varepsilon_{ij}, \varepsilon, t), \quad \nabla_i = \frac{\partial}{\partial x_i}, \quad i, j = 1, 2, 3,$$

где ρ – плотность вещества;

v_i – компонента вектора скорости;

$\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, \ell_{ij}$ – компоненты зазоров напряжений, деформаций и скоростей деформаций;

e – удельная внутренняя энергия.

В общем случае при ударно-волновом нагружении твердого тела происходит как изменение объема (плотности), так и изменение формы, поэтому при рассмотрении деформации или разрушения элемента среды целесообразно выделить компоненты напряжений, вызванные изменением его объема и формы. В связи с этим тензор напряжений разбивается на девиаторную и шаровую (2) составляющие:

$$\sigma_{ij} = S_{ij} - P \delta_{ij}, \quad (2)$$

где δ_{ij} – символ Кронекера;

P – давление.

Определяющие соотношения могут задаваться в форме Прандтля-Рейса (3) при условии текучести Мизеса:

$$2G\left(e_{ij} - \frac{1}{3}e_{kk}\delta_{ij}\right) = \frac{DS_{ij}}{Dt} + \lambda S_{ij},$$

$$\frac{DS_{ij}}{Dt} = \frac{dS_{ij}}{dt} - S_{ik}w_{jk} - S_{jk}w_{ik},$$

$$2e_{ij} = \nabla_j v_i + \nabla_i v_j; \quad 2w_{ij} = \nabla_j v_i - \nabla_i v_j;$$

$$3S_{ij}S_{ij} = 2\sigma_T.$$

где G – модуль сдвига;

σ_T – предел текучести материала;

D/Dt – производная Яумана.

Производная Яумана учитывает поворот элемента среды во время его перемещения. В упругой области множитель $\lambda = 0$.

Неоднородную среду можно рассматривать как двухкомпонентный материал, состоящий из твёрдой фазы – защитные элементы кольчужного типа и «воздушные зазоры». При этом «воздушные зазоры» в бронематериале распределены равномерно по всем направлениям. Исходя из этого, мы можем записать:

$$V = V_p + V_s; \quad a = \frac{V}{V_s} = \frac{V_p + V_s}{V_s}; \quad \psi = \frac{V_p}{V_s}; \quad \alpha = \frac{1}{1-\psi} \quad \psi = 1 - \frac{1}{a};$$

где V_p , V – объём бронематериала, «воздушных зазоров» и защитных элементов.

При анализе процессов ударного нагружения применяются различные варианты уравнений состояния, выбор которых обусловлен спецификой межатомных взаимодействий в рассматриваемом материале. Функциональная форма таких соотношений напрямую определяется физической природой сил, действующих на микроуровне. Поскольку в общем виде характер этих взаимодействий не имеет жестких ограничений, при инженерных расчетах целесообразно использовать максимально простую математическую модель, обеспечивающую приемлемую точность при минимальных вычислительных затратах. С учетом указанного подхода термодинамическое состояние деформируемого твердого тела рационально описывается уравнением состояния (5) типа Ми-Грюнайзена [4].

$$P = \frac{k(1 - \frac{\Gamma_0 \psi}{2})}{(1 - c\psi)^2} \psi + \rho_0 \Gamma_0 E$$

$$\psi = 1 - \rho_0 / \rho,$$

где Γ_0 – коэффициент Грюнайзена;

c , k – константы материала гровера;

ρ_0 – начальная плотность среды.

Установлено, что при воздействии ударно-волновых нагрузок процесс разрушения конструктивных материалов реализуется преимущественно по двум предельным схемам – отрывной (споллинг) и сдвиговой. В ряде конкретных ситуаций один из указанных механизмов может играть определяющую роль в формировании дефектов, однако при постановке и решении инженерно-прикладных задач корректное моделирование требует одновременного учета обоих вариантов предельного состояния, поскольку их вклад взаимосвязан с параметрами нагружения и свойствами среды.

В дальнейшем примем, что инициирование отрывного разрушения обусловлено достижением главным растягивающим напряжением критического уровня, соответствующего величине откольной прочности материала:

$$\sigma_1 \geq \sigma_k$$

Для прогнозирования сдвиговых разрушений используется критерий, где мерой повреждения материала является удельная работа сдвиговых пластических деформаций A_p (7). При выполнении условия [5]:

$$A_p = \int_0^* dA_p = \int_0^* \frac{\sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^p}{\rho}$$

Разрушение материала квалифицируется как сдвиговое при достижении предельного параметра A_p – критического значения удельной работы пластических деформаций сдвига. Предполагается, что при выполнении любого из указанных критериев в произвольной точке защитного полотна происходит его локальная дезинтеграция с образованием самостоятельных фрагментов.

В случае отрывного механизма разрушения пространственная ориентация трещинообразования в гравере устанавливается, исходя из гипотезы, согласно которой плоскость трещины располагается перпендикулярно направлению максимального главного растягивающего напряжения. При реализации сдвигового механизма разрушения направление развития трещины совпадает с плоскостью действия предельных касательных напряжений, определяющих доминирующее напряжённое состояние материала.

На рисунке 2 приведена карта распределения эквивалентных напряжений в бронеполотне при ударном воздействии. Высокие уровни напряжения сосредоточены преимущественно возле границ контакта, что наглядно показывает зоны потенциального разрушения и формирования повреждений.

На рисунках 3 и 4 представлены результаты моделирования механики напряженно-деформированного состояния унифицированной системы защиты. Рисунок 3 показывает, что максимальный уровень радиальных напряжений в резинотехни-

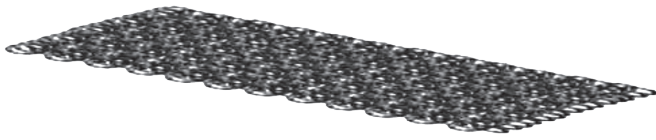


Рис. 2. Карта распределения эквивалентных напряжений в рассматриваемом бронеполотне

ческом элементе при пиковой нагрузке составляет 0,6 МПа, что может привести к повреждению материала из-за локальных зон высокого давления, особенно при многократных ударах.

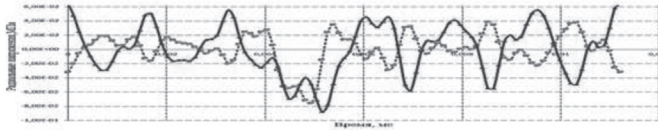


Рис. 3. Концентратор распределений радиальных напряжений в резинотехническом элементе конструкции (сплошная линия – внутренняя поверхность, штрихпунктирная – наружная)

На рисунке 4 изображен график максимального отклика по осевым напряжениям, который достигает 2,5 МПа, что способствует формированию зон пластических деформаций и повышает риск разрушения резинотехнического материала. Оба рисунка демонстрируют механизмы развития деформаций и позволяют лучше понять поведение эластичного материала при экстремальном нагружении.

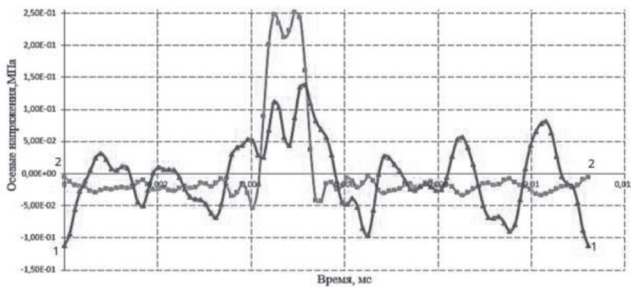


Рис. 4. Концентратор распределения осевых напряжений в резинотехническом элементе конструкции (1 – наружная поверхность, 2 – внутренняя)

Для количественной оценки стойкости преграды предложен безразмерный критерий, выраженный через значение начальной скорости поражающего элемента $V_{пред}$ и его скорости $V_{сд}$ в момент времени $t_{сд} = 20$ мкс (8).

$$k = \frac{V_{пред} - V_{сд}}{V_{пред}} \quad (8)$$

Установлено, что значения критерия стойкости k расположены на интервале действительных чисел от 0,5 до 0,65. Физико-механические характеристики бронеполотна, отвечающие за прочность,

считаются распределёнными случайным образом по объёму бронеполотна.

Плотностная функция распределения исследуемых параметров задаётся посредством применения различных вероятностных законов, которые в обобщённой постановке определяются математическим ожиданием соответствующего параметра, изменяемой дисперсией D_i , а также совокупностью иных характеристик среды (9) Π_i :

$$\frac{d\rho}{d\xi_i} = f_i(\xi_i, \xi_{0i}, D_i, \eta_i) \quad (9)$$

Механические характеристики материала – в том числе предел текучести – временное сопротивление разрушению, предельные относительные деформации и иные параметры, фиксирующие переход к разрушению в рамках различных критериев и теорий прочности, детерминируются количественными и размерными характеристиками внутренних дефектов. Указанные величины целесообразно рассматривать как случайно распределённые по объёму тела параметры, вариация которых обусловлена степенью структурной однородности и масштабом микронеоднородностей материала.

На рисунке 5 представлены результаты натурального эксперимента по оценке стойкости унифицированной системы защиты, состоящей из трех слоев: резинотранспортерной ленты толщиной 5 мм, металлической кольчуги из гравера диаметром 22 мм и толщиной 4 мм и еще одного слоя резинотранспортерной ленты толщиной 5 мм. Щит имеет размеры 0,3 на 0,4 метра.

При воздействии поражающего элемента со скоростью 750 м/с на расстоянии 10 метров от взрыва наблюдается разрушение первого и второго слоев системы защиты. Однако, несмотря на это, внутренние повреждения отсутствуют, что свидетельствует о высокой эффективности данной конструкции в защите от осколков. Отсутствие внутреннего повреждения после разрушения первых двух слоев объясняется несколькими факторами:

- энергопоглощение: первый слой из резинотранспортерной ленты толщиной 5 мм поглощает часть кинетической энергии осколка, снижая его скорость и энергию;
- деформация граверов: второй слой из граверов диаметром 22 мм и толщиной 4 мм деформируется под воздействием осколка, поглощая энергию и замедляя его движение;
- защита внутреннего слоя: третий слой из резинотранспортерной ленты толщиной 5 мм обеспечивает дополнительную защиту, предотвращая проникновение осколка внутрь. Эти слои работают совместно, эффективно рассеивая и поглощая энергию осколка, что предотвращает внутреннее повреждение.

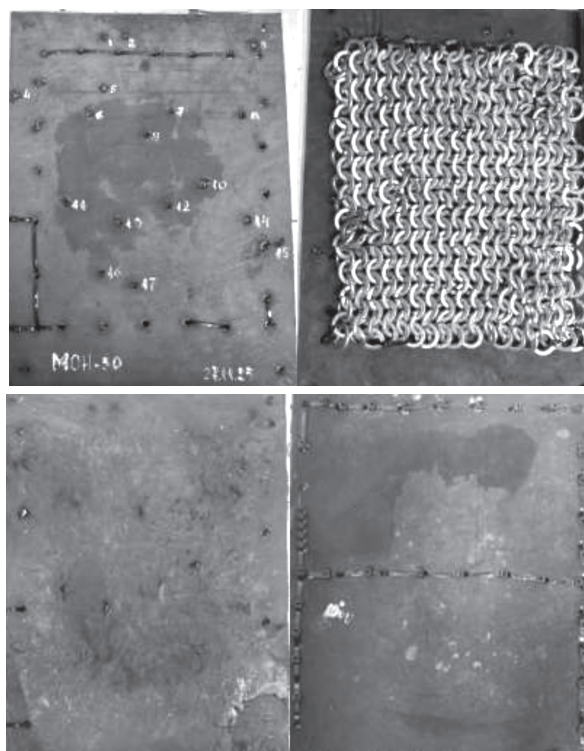


Рис. 5. Унифицированная система защиты

Вывод

Выполненное исследование показало, что структурная гетерогенность бронеполотна оказывает определяющее влияние на перераспределение начальной кинетической энергии ударника: наличие апертур, ребристых элементов и подвижных соединений формирует поперечные моменты, способствует отклонению траектории поражающего элемента и обеспечивает нелинейное рассеивание энергии по площади преграды.

Представленная модель была реализована с помощью программного обеспечения LS-DYNA. Она основана на уравнениях механики сплошной среды с учетом упругопластического поведения уравнения состояния типа Ми-Грюнайзена и критериев отрывного и сдвигового разрушения и позволяет воспроизводить процессы фрагментации материала и формирование трещин при ударно-волновом нагружении. Установлено, что учет двухкомпонентной структуры (твёрдая фаза и межзвеньевое пространство) и случайного распределения прочностных характеристик повышает достоверность прогноза повреждения и разрушения защитных элементов.

Численный анализ напряженно-деформированного состояния показал формирование локальных зон концентрации радиальных и осевых напряжений в элементах конструкции. Также определены их максимальные значения и выявлены условия перехода материала в область пластических деформаций. Предложен безразмерный критерий стойкости, связывающий параметры скорости поражающего элемента, что позволяет проводить количественную оценку защитной эффективности при варьировании массы, диаметра и скорости ударника.

В совокупности полученные результаты подтверждают целесообразность применения модульных кольчужных структур в составе перспективных адаптивных систем защиты. Разработанный подход может быть использован для инженерной оптимизации геометрических параметров бронеполотна, прогнозирования предельной скорости пробития и повышения живучести технических систем при воздействии высокоскоростных поражающих факторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Губеладзе О.А. Моделирование высокоскоростного удара / О.А. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 1 (14). – С. 61–69.
2. Математическая постановка задачи о разрушении бронеполотна с нерегулярной поверхностью / В.В. Ильин, И.Т. Севрюков, И.А. Ионченков, Т.И. Супрун // Альманах Пермского военного института войск национальной гвардии. – 2025. – № 2 (18). – С. 47–53.
3. Соколов И.В. Результаты имитационного моделирования воздействия ударника на гибкую звеньевую структуру / И.В. Соколов, И.Т. Севрюков // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2018. – № 9–10 (123–124). – С. 31–36.
4. Рудаков И.А. Технические решения броневых структур с нерегулярной поверхностью и их применение / И.А. Рудаков // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2016. – № 4 (132). – С. 31–35.

Статья проверена программой Антиплагиат. Оригинальность — 88 %.

Статья поступила в редакцию 12.03.2026; одобрена после рецензирования 09.04.2026; принята к публикации 15.05.2026.