

2. G.R.Johnson, W.H.Cook. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures / Proc. VII Int. Symp. Ballistics, The Hague, The Netherlands, 1983. P.541-547.
3. G.R.Johnson, W.H.Cook. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures // Engng. Fracture Mech. 1985. Vol.21. No.1. P.31-48.
4. T.Вørvik, M.Langseth, O.S.Hopperstad, K.A.Malo. Ballistic penetration of steel plates // Int. J. Impact Enging. 1999. Vol.22. Nos.9-10. P.855-886.
5. D.J.Steinberg, S.G.Cochran, M.W.Guinan. A constitutive model for metals applicable at high-strain rate // J. Appl. Phys. 1980. Vol.51. No.3. P.1498-1504.
6. Б.Л.Глушак, С.А.Новиков, Ю.В.Батьков. Определяющее уравнение Al и Mg для описания высокоскоростного деформирования в УВ // ФГВ. 1992. № 1. С.84-89.
7. Я.Б.Зельдович, Ю.П.Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
8. F.D.Murnaghan. Finite Deformation of Elastic Solid. NY, 1951.
9. Р.Понд, К.Гласс. Металлофизические исследования и распределение энергии / Высокоскоростные ударные явления. Под ред. Р.Кинслоу. М.: Мир, 1973. С.428-467.
10. T.Вørvik, M.Langseth, O.S.Hopperstad, K.A.Malo. Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses: Part I: Experimental study // Int. J. Impact Engng. 2002. Vol.27. No.1. P.19-35.
11. С.С.Соколов, А.А.Воропинов, И.Г.Новиков, А.И.Панов, И.В.Соболев, А.А.Пушкарёв. Методика ТИМ-2D для расчёта задач механики сплошной среды на нерегулярных многоугольных сетках с произвольным количеством связей в узлах // ВАНТ. Сер. Математическое Моделирование Физических Процессов. 2006. Вып.4. С.29-44.
Ю.В.Янилкин, С.П.Беляев, Ю.А.Бондаренко, Е.С.Гаврилова, Е.А.Гончаров, А.Д.Горбенко, А.В.Городничев, Е.В.Губков, А.Р.Гужова, Л.И.Дегтяренко, Г.В.Жарова, В.Ю.Колобянин, В.Н.Софронов, А.Л.Стадник, Н.А.Ховрин, О.Н.Чернышова, И.Н.Чистякова, В.Н.Шемаков. Эйлеровы численные методики ЭГАК и ТРЭК для моделирования многомерных течений многокомпонентной среды / Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Вып.12. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008. С.54-65.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ ВЗРЫВА БРИЗАНТНОГО ВВ В ЛЕГКОГАЗОВОЙ УСТАНОВКЕ ДИАФРАГМЕННОГО ТИПА (ЛГПР) ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО МЕТАНИЯ ТВЁРДЫХ ТЕЛ

*М.А. Баринов, И.Г. Новиков, Т.Н. Половникова, А.В. Самодолов, С.С. Соколов,
Е.А. Степанов, В.Н. Хворостин, А.К. Шаненко*

РФЯЦ ВНИИЭФ, Саров, Россия

В настоящее время во всём мире развивается направление по созданию испытательных установок для высокоскоростного метания тел со скоростью, превышающей 1000 м/с [1-3 и др.]. Применение таких установок с привлечением современных методов изучения импульсных и быстропротекающих процессов позволит успешно решать задачи, имеющие прикладное и фундаментальное значение в области динамики сплошных сред. К основным направлениям исследований в этой области можно отнести, в частности, изучение сжимаемости сплошных сред при высоких давлениях (исследование уравнений состояния различных сред), а также изучение

механизма соударения тел (или процессов, происходящих при ударе твёрдого тела о преграду) при высоких скоростях соударения.

В работе представлены результаты двумерного численного моделирования физических процессов в легкогазовой установке диафрагменного типа, а именно, внутренней баллистики ЛГПР и оценки прочности корпуса при метании МЭ массой 30 и 200 г с вариацией параметров лёгкого газа и плотности заряжения ВВ. Численное моделирование выполнено с помощью методики ТИМ [4,5], предназначенной для решения задач газодинамики, теплопроводности, нестационарной упругопластичности с учётом разрушения материалов, детонации взрывчатых веществ на неструктурированных многоугольных/многогранных лагранжевых сетках.

1. Физическая и математическая постановки

По методике ТИМ была проведена серия методических двумерных расчётов по исследованию внутренней баллистики взрывного стенда легкогазовой установки (ЛГПР) на основе бризантного ВВ с использованием легкого газа.

Расчёты проводились в лагранжевой постановке с выделением каждого вещества в отдельную счётную математическую область, с отслеживанием движения различных веществ, разделённых контактными границами, без перемешивания. При этом считается, что разные математические области (тела) могут взаимодействовать друг с другом вдоль контактной поверхности.

В расчётах варьировались масса метаемого объекта, плотность бризантного ВВ и давление легкого газа. Проведены расчёты с учётом воздуха в разгонном отсеке и без него. Рассмотрены расчёты с учётом корпуса ЛГПР и без него (корпус ЛГПР имитировался «жёсткой» стенкой).

Общий вид начальной геометрии ЛГПР (размеры указаны в см) представлен на рисунке 1.



Рисунок 1. Общий вид начальной геометрии ЛГПР (размеры указаны в см)

Метаемый элемент (МЭ) расположен в баллистическом стволе и представляет собой титановую пластину диаметром 30 мм. Начальная масса метаемого элемента составляла 30 и 200 г.

Бризантное ВВ моделировалось как идеальный газ с параметрами: начальная энергия $E_0=4000$ Дж/г и показатель адиабаты $\gamma=2.5$. Начальная масса взрывчатого вещества менялась за счёт изменения плотности ВВ, плотность заряжения с учётом объёма взрывной камеры составляла: 0.785, 0.5 и 0.3 г/см³. В рассматриваемом численном моделировании инициирование ВВ осуществлялось мгновенно. Гелий моделировался как идеальный газ с параметрами: показатель адиабаты $\gamma=1.66$, теплоёмкость $C_v=0.009$ кДж/(г К), плотность 0.00166 г/см³, начальное давление газа в стволе в расчетах менялось за счёт начального нагрева газа и составляло: 20, 40 и 60 атм.

Уравнения состояния для железа и титана брались в форме Ми-Грюнайзена[6]:

$$P = P_x(\rho) + \Gamma(E - E_x)\rho; \quad P_x = \frac{\rho^0 (c^0)^2}{n} \left[\left(\frac{\rho}{\rho^0} \right)^n - 1 \right]; \quad E_x = \int_{\rho^0}^{\rho} P_x(\rho) \frac{d\rho}{\rho^2},$$

с параметрами для железа: $c_0 = 4.615$ км/с, $\Gamma=2$, $n=3$, $q=7.85$ г/см³, и титана: $c_0=4.799$, $\Gamma=1.680$, $n=3$, $q=4.5$ г/см³. Для учета прочностных свойств использовалась упругопластическая модель

Глушака Б.А. [7] ($Y_0=1$ ГПа, $\nu_0=0.28$). Для оценки возможных разрушений использовалась откольная модель разрушения для железа и кинетическая модель разрушения, зарождения и развития поврежденности (под действием растягивающих напряжений и на сдвиговых деформациях) и компактации разрушенного материала для титана [8].

Число ячеек в расчётах составляло ~140 тыс.

2. Результаты расчётов

2.1. Масса МЭ 30 г

Ниже представлены результаты расчётов ЛППР с массой метаемого элемента 30 г с вариацией массы бризантного ВВ и с учётом корпуса легкогазовой установки и без учета. В таблице 1 приведены результаты с учётом воздуха в разгонном отсеке. В столбцах указаны следующие параметры: особенности расчёта, характеристики заряжения ВВ, скорость вылета МЭ из баллистического ствола, время вылета МЭ от момента подрыва ВВ.

Таблица 1. Результаты расчётов при начальном давлении в легком газе 20 атм., с массой МЭ 30 г и с учётом воздуха в разгонном отсеке

Описание	Характеристики бризантного ВВ: масса (г), плотность (г/см ³)	Скорость метаемого элемента, км/с	Время вылета, мкс
Расчёт с учётом воздуха в стволе, без корпуса	616 г, $\rho=0.785$	6.98	788
Расчёт с учётом воздуха в стволе, без корпуса	392.9 г, $\rho=0.5$	5.62	894
Расчёт с учётом воздуха в стволе, без корпуса	235.8 г, $\rho=0.3$	4.30	1047
Расчёт с учётом воздуха в стволе и корпуса ЛППР	616 г, $\rho=0.785$	5.91	895

Результаты расчётов показывают, что при уменьшении плотности заряжения ВВ, скорость метаемого элемента уменьшается. На рисунке 2 представлены графики скорости движения и графики координаты X метаемого элемента в зависимости от времени для расчётов с различной массой ВВ при начальном давлении в легком газе 20 атм. На представленном графике скорость отрицательная, т.к. метаемый элемент летит влево.

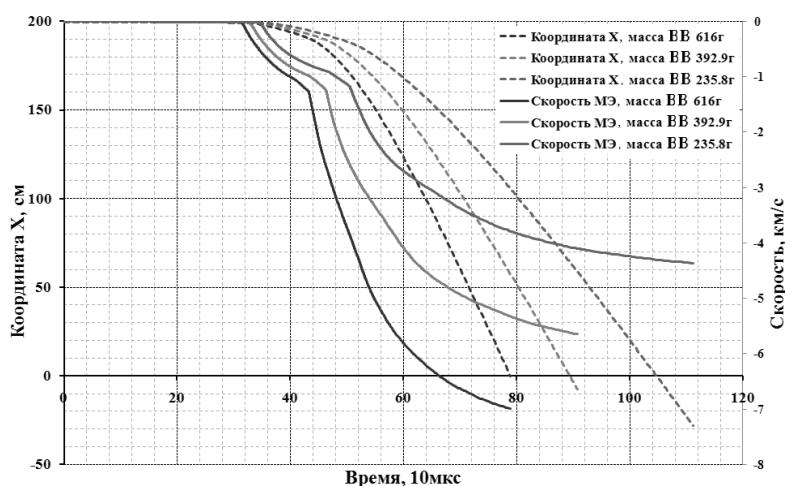


Рисунок 2. Графики скорости движения и координаты X метаемого элемента

массой 30г в зависимости от времени для расчётов с различной массой ВВ

Расчёт с учётом корпуса легкогазовой установки показал, что взрывная камера под действием продуктов взрыва расширяется на ~2мм, деформируя корпус. Деформируемый корпус в процессе воздействия находился в упругой области (пластических деформаций не было), что позволяет его использовать многократно. Расчёты с учётом корпуса установки показывают, что по корпусу баллистического ствола вперёд распространяется ударная волна, которая поджимает МЭ, тем самым затрудняя его движение (рисунок 3), при этом часть энергии взрыва тратится на деформацию и расширение взрывной камеры. Все это приводит к тому, что скорость вылета метаемого элемента из ствола ниже (составляет ~6 км/с), чем в расчёте, где внутренняя граница легкогазовой установки моделировалась как «жёсткая стенка непроницаемая для газа» (скорость вылета МЭ из ствола ~7 км/с).

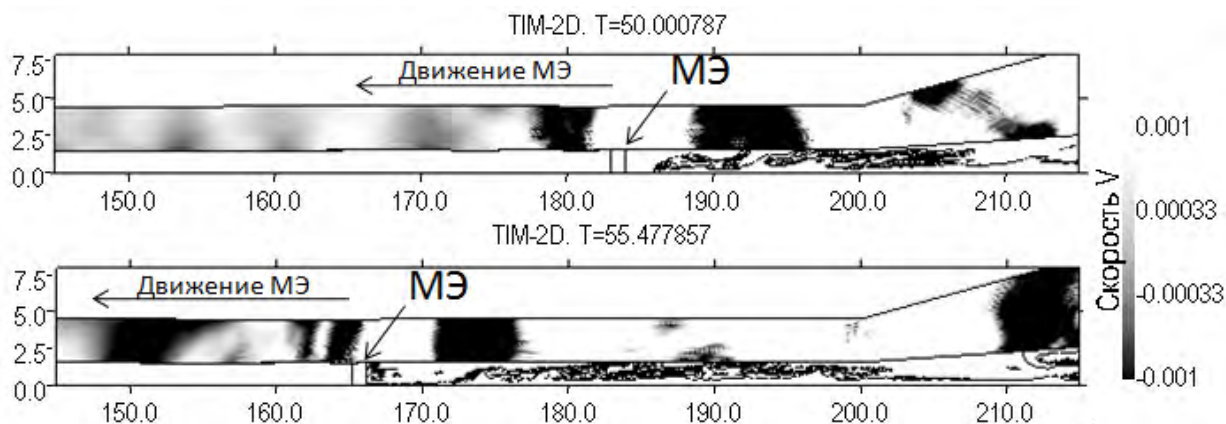


Рисунок 3. Распространение УВ в корпусе баллистического ствола ЛГПР на моменты времени: 500 и 554.7мкс. Растровые картины представлены с раскраской по компоненте скорости V_x , км/с

В рассматриваемой установке ЛГПР предусмотрена возможность откачки воздуха. В таблице 2 представлены результаты расчётов с массой МЭ 30 г с вариацией параметров легкого газа без учёта воздуха в стволе ЛГПР и без корпуса ЛГПР.

Таблица 2. Результаты расчётов с массой МЭ 30 г и с массой ВВ 616 г без учёта воздуха в разгонном отсеке с вариацией параметров лёгкого газа

Начальное давление в легком газе, атм	Скорость метаемого элемента, км/с	Время вылета, мкс
P=20	7.17	787.5
P=40	7.30	786
P=60	7.31	784

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о слабом влиянии начального давления легкого газа на итоговую скорость движения метаемого элемента. В расчетах с учетом воздуха в стволе скорость вылета метаемого элемента на 2.7% ниже, чем в расчетах без учета воздуха в стволе.

2.2. Масса МЭ 200 г

Далее приведем результаты расчётов с массой метаемого элемента равной 200 г (таблицы 3-4).

Таблица 3. Результаты расчётов с массой МЭ 200 г без учёта воздуха в разгонном отсеке и без учёта корпуса с вариацией параметров лёгкого газа

Начальное давление в легком газе, атм	Характеристики бризантного ВВ: масса (г), плотность (г/см ³)	Скорость метаемого элемента, км/с	Время вылета, мкс
P=20	616 г, $\rho=0.785$	2.61	1417
P=40	616 г, $\rho=0.785$	2.63	1411
P=60	616 г, $\rho=0.785$	2.68	1394

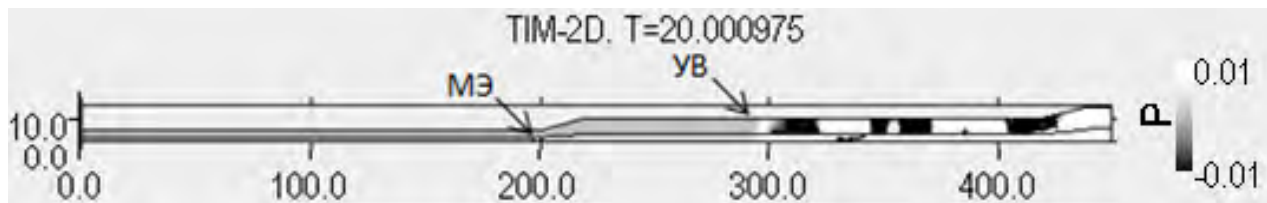
Таблица 4. Результаты расчётов с массой МЭ 200 г для давления лёгкого газа 20 атм. с вариацией различных параметров

Описание	Характеристики бризантного ВВ: масса (г), плотность (г/см ³)	Скорость метаемого элемента, км/с	Время вылета, мкс
Без корпуса, без воздуха	616 г, $\rho=0.785$	2.61	1417
С корпусом, без воздуха	616 г, $\rho=0.785$	2.37	1530
С корпусом, с воздухом	616 г, $\rho=0.785$	2.30	1534
Без корпуса, без воздуха	392.9 г, $\rho=0.5$	1.92	1750
С корпусом, без воздуха	392.9 г, $\rho=0.5$	1.74	1881
Без корпуса, без воздуха	235.8 г, $\rho=0.3$	1.4	2334

Из полученных результатов видно, что скорость вылета МЭ из баллистического ствола в расчёте с учётом корпуса ЛГПР ниже на 0.3 км/с, чем в расчёте без корпуса (с имитатором корпуса ЛГПР «жесткой» стенкой).

Приведём более подробное описание расчёта с массой МЭ 200 г при плотности ВВ 0.785 г/см³ и давлении лёгкого газа 20 атм. На рисунках 4-5 приведена динамика движения УВ по стволу ЛГПР и внутри ствола. Для отображения положения фронтов УВ и отражённых УВ величина давления на рисунках была ограничена значением 0.01 ГПа.

Начиная с момента времени ~350 мкс положение фронта УВ по корпусу опережает положение метаемого элемента при его движении. Интенсивность давления на фронте ударной волны, распространяющемся по корпусу ЛГПР, на момент времени 350 мкс равна ~0.01 ГПа. Так же, как и для расчетов с массой МЭ 30 г деформируемый корпус в процессе воздействия находился в упругой области, что позволяет использовать его многократно. На рисунках 4-5 отмечено положение УВ и МЭ.


Рисунок 4. Движение УВ по корпусу на момент времени 200 мкс.

Растровые картины представлены с раскраской по давлению, ГПа

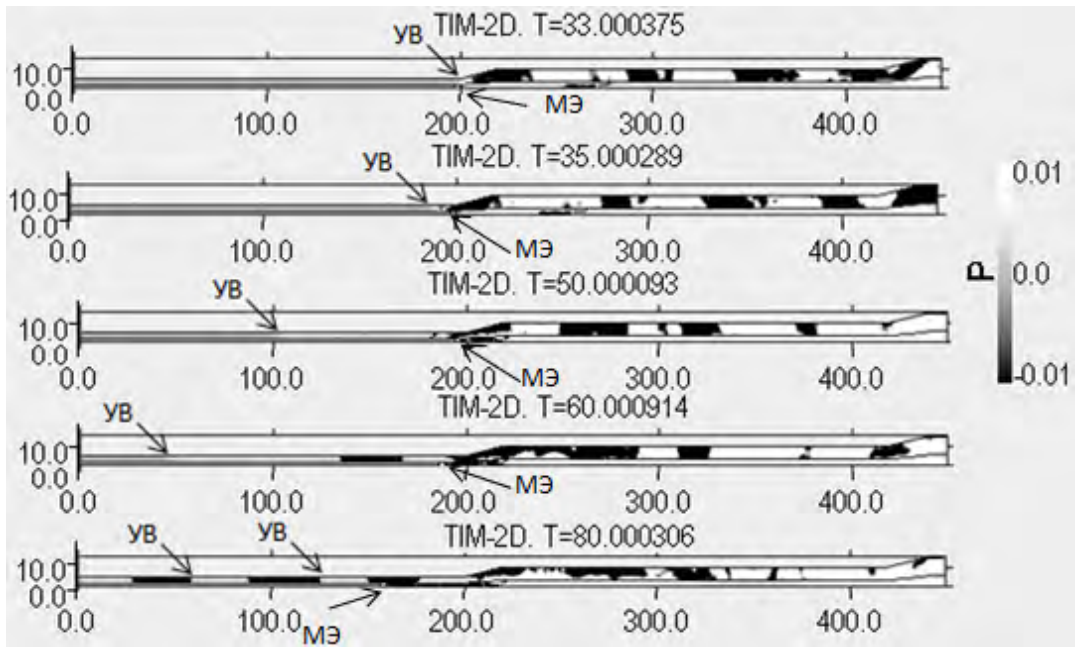


Рисунок 5. Движение УВ по корпусу на моменты времени: 330, 350, 500, 600 и 800 мкс. Растровые картины представлены с раскраской по давлению, ГПа

3. Выводы

В работе приведены результаты численного моделирования, выполненного по методике ТИМ, проведенного для исследования внутренней баллистики и прочности корпуса легкогазовой установки с использованием энергии бризантного ВВ. При исследовании варьировалась масса бризантного ВВ, масса метаемого элемента (30 и 200 г), параметры лёгкого газа, учёт и не учёт воздуха в разгонном отсеке и учёт наличия корпуса лёгкогазовой установки или его имитатора в виде жесткой стенки.

С плотностью номинального заряжания ВВ в 0.785 г/см^3 для масс метаемого элемента 30 и 200 г получена скорость вылета МЭ из баллистического ствола 7.3 и 2.6 км/с соответственно. Анализ результатов расчётов показывает, что различное начальное давление в лёгком газе (20, 40 и 60 атм.) оказывает слабое влияние на итоговую скорость вылета МЭ, в расчётах с учётом корпуса ЛГПР видно, что часть энергии взрыва тратится на расширение и деформацию взрывной камеры. Поэтому скорость вылета метаемого элемента из баллистического ствола при учёте корпуса лёгкогазовой установки на 2.7% ниже, чем при моделировании его граничным условием «жесткая» стенка, непроницаемая для газа.

Анализ результатов для массы МЭ 200 г показал, что для плотности заряжания бризантного ВВ 0.785 и 0.5 г/см^3 итоговая скорость вылета МЭ из ствола составляет 2.3 и 1.7 км/с соответственно при учёте корпуса ЛГПР. В расчёте с плотностью заряжания ВВ 0.3 г/см^3 без учёта корпуса ствола получена скорость МЭ 1.4 км/с.

При выбранных параметрах заряжания ВВ деформируемый корпус в процессе воздействия находился в упругой области, что позволяет использовать его многократно. Метаемый элемент в рассмотренных условиях воздействий не разрушается.

Проведённое численное исследование показало принципиальную возможность моделирования физических процессов, происходящих в экспериментальных установках типа ЛГПР.

Список литературы

1. Бохан А.С., Куликов С.В., Лапичев Н.В. и др. Опыт отработки высокоскоростного метания стальных сферических элементов из ЛГУ. В сб. «Воздействие мощных потоков энергии на вещества». // М.: ИВТАН. 1992. с.156-163.
2. Kryukov P.V. Review of investigations under way on the large-scale TsNIIMASH ballistic facility // Int. J. Impact Engng. 1999. Vol.23. p.501-508.
3. Piekutowski A.J., Poormon K.L. Development of a three-stage, light-gas gun at the University of Dayton Research Institute // Int. J. Impact Engng. 2006. Vol.33. p.615-624.
4. С.С. Соколов, А.И. Панов, А.А. Воропинов и др. Методика ТИМ расчета трехмерных задач механики сплошных сред на неструктурированных многогранных лагранжевых сетках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2005. Вып. 2. с. 37-52.
5. С.С. Соколов, А.А. Воропинов, И.Г. Новиков и др. Методика ТИМ-2D для расчета задач механики сплошной среды на нерегулярных многоугольных сетках с произвольным количеством связей в узлах // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2006. Вып. 4. с. 29-43.
6. Я.Б. Зельдович Я.Б., Ю.П. Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений // М. Наука. 1966г., 688с.
7. Г.В. Гаркушин, Г.Е. Иванчихина, О.Н. Игнатова и др. Механические свойства меди М1 до и после ударного сжатия в широком диапазоне длительности нагрузки. // Физика металлов и металловедение. 2011. т.111, №2, с.1-10.
8. С.С. Соколов. Феноменологическая модель кинетики развития поврежденности в твёрдых материалах при импульсных воздействиях // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2012. Вып. 4. с. 13-26.

КОМБИНИРОВАННАЯ ПРОТИВОПУЛЬНАЯ И ПРОТИВОКУМУЛЯТИВНАЯ ЛЕГКАЯ БРОНЕЗАЩИТА

И.Ф. Кобылкин, А.А. Горбатенко

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Для защиты легкой бронетехники от кинетических и малокалиберных кумулятивных средств поражения (КСП) необходимо одновременное использование как противопульной бронезащиты [1], так и противокумулятивной динамической защиты (ДЗ) [2] с существенно уменьшенным уровнем ударного воздействия на защищаемый объект. Для обеспечения повышенной противопульной стойкости в настоящее время обычно используют керамико-металлические или керамико-композитные двухслойные преграды с лицевым керамическим слоем [3, 4]. Исполнению традиционной противокумулятивной ДЗ препятствует чрезвычайно интенсивное воздействие метаемых стальных пластин на объект защиты. В настоящей статье представлена структура объединенной комбинированной бронезащиты, обеспечивающей защиту, как от кинетических, так и от малокалиберных КСП, при приемлемом уровне воздействия на объект защиты (рис. 1).

В работах [5, 6] было обосновано использование для противокумулятивной защиты легкой бронетехники ДЗ с керамическими обкладками. Экспериментально и теоретически было установлено, что метаемые взрывом керамические обкладки ДЗ вследствие диспергирования