



УДК 623.5

Е. А. Хмельников, Т. Е. Заводова, К. В. Смагин, С. Ф. Дубинина

Применение методики «противоточное диффузионное пламя» в моделировании процессов конечной баллистики боеприпасов на основе реакционных материалов

В связи с постоянной модернизацией производства средств поражения и боеприпасов в настоящее время возникла необходимость в поиске новых видов снаряжения. Рассмотрена возможность использования фторопласта в качестве реакционного материала, способного заменить взрывчатые вещества в боеприпасах, применяемых для поражения легкобронированных и легкоуязвимых целей. Отражены результаты экспериментов и математического моделирования процесса проникания фторопластового ударника в преграды из легких сплавов. Использован метод противоточного диффузионного пламени для учета дополнительной энергии, выделяющейся в результате взаимодействия во время моделирования.

Ключевые слова: противоточное диффузионное пламя, математическое моделирование.

Основные цели, против которых, преимущественно, используются малокалиберные боеприпасы, расположены на переднем крае ведущихся военных действий (рис. 1).

Анализ современного боя показывает, что наибольшую эффективность малокалиберная ствольная артиллерия достигает в борьбе с легкоуязвимой и легкобронированной техникой. Для легкобронированной техники (ЛБТ) наблюдается тенденция перехода к бро-



Рис. 1. Легкобронированная и легкоуязвимая техника

не из легких сплавов (на основе алюминия и титана) и комбинированной броне. Типовые бронетранспортеры (БТР) и боевые машины пехоты (БМП), предположительно, будут иметь броневую защиту на основе алюминиевых сплавов толщиной до 50 мм и более. Аэротранспортабельная и плавающая техника выполнена, как правило, также из легких сплавов.

Поражение легкобронированной техники происходит за счет следующих физических факторов: механического действия (экипаж, приборы, силовая установка, топливные баки), зажигательного действия (силовая установка, маслосистемы, топливопроводы и топливные баки) и иницирующего действия (детонация боекомплекта).

Применяемые для поражения ЛБТ и легкоуязвимой техники (ЛУТ) боеприпасы (БП) и поражающие элементы (ПЭ) можно разделить на две группы (рис. 2): пассивные (без энергоносителя) и активные (с энергоносителем). Цели поражаются пассивными БП за счет реализации диссипации кинетической энергии, а активными – в основном благодаря энергии детонации взрывчатых веществ.

К пассивным БП отнесем бронебойные пули (Бр.П), бронебойные снаряды малого калибра (Бр.С), осколки снарядов (ОС), стреловидные поражающие элементы (СПЭ), готовые поражающие элементы (ГПЭ).

Повышения эффективности действия ПЭ можно достичь путем увеличения их кинетической энергии, т. е. повысив массу и скорость. Массу можно увеличить, применив

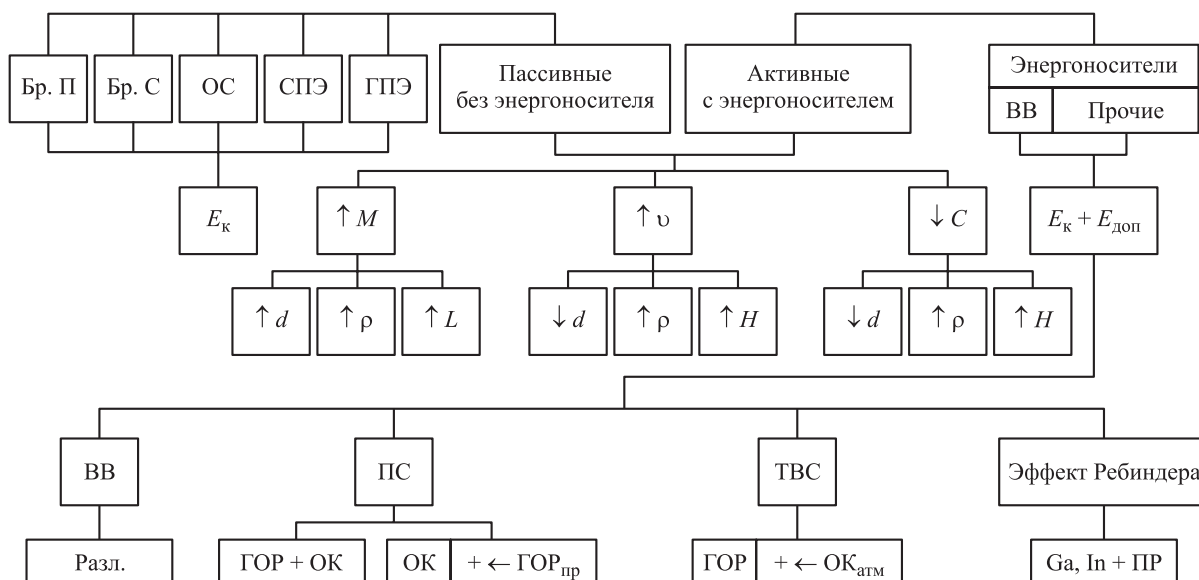


Рис. 2. Типы боеприпасов и способы поражения целей с их применением:

ГОР_{пр} – горючее – материал преграды; ТВС – топливно-воздушная смесь; E_k – кинетическая энергия; $E_{доп}$ – дополнительная энергия; Бр.П – бронебойные пули; Бр.С – бронебойные снаряды малого калибра; ОС – осколки снарядов; СПЭ – стреловидные поражающие элементы; ГПЭ – готовые поражающие элементы; ОК_{атм} – окислитель – атмосфера

более крупный калибр, однако это не всегда приемлемо, так как становится больше масса артиллерийской системы, за счет чего она более громоздка и менее маневренна.

Увеличить массу, не меняя калибра, можно путем применения материалов с более высокой плотностью. С этой целью для производства сердечников и корпуса, кроме стали, используют сплавы карбида вольфрама, а также обедненный уран. Однако наряду с высокими бронепробиваемостью и зажигательным эффектом после пробития преграды сердечники из обедненного урана обладают серьезными недостатками:

- трещинообразование при хранении, отсутствие защитных покрытий, способных обеспечить срок хранения свыше 20 лет и предохранять изделия от повреждений;
- радиоактивность урансодержащих материалов;
- необходимость осторожного обращения.

Сердечники из вольфрама не уступают по пробиваемости сердечникам из обедненного урана. Они не имеют названных недостатков, однако являются дорогостоящими и не обладают достаточной сырьевой базой.

Кроме пассивных боеприпасов существуют боеприпасы, поражающие цели за счет ре-

ализации диссипации не только кинетической, но и дополнительной энергии. Активные боеприпасы содержат энергоноситель: детонирующие взрывчатые вещества (ВВ) либо вещества, способные при взаимодействии с другими материалами вступать в химические реакции с выделением дополнительной энергии.

Активные боеприпасы весьма эффективны для поражения ЛБТ и ЛУТ. Однако снаряженные ВВ боеприпасы сложны в изготовлении, небезопасны в обращении. В случае малокалиберного снаряда для реализации ВВ также необходимы средства инициирования.

Таким образом, возникает необходимость в замене энергоносителя на менее опасное в обращении вещество.

С середины 80-х гг. XX в. в Уральском федеральном университете исследуется применение реакционных материалов (РМ) в качестве снаряжения малокалиберных боеприпасов и готовых ПЭ [1].

С конца 1990-х гг. ведутся масштабные программы по созданию новых типов энергетических материалов (ЭМ) в США, ряде стран Европы и Китае. Данные программы в основном направлены на отработку новых принципов усиления различных видов поражающего действия за счет включения таких ЭМ в конструкцию БП.

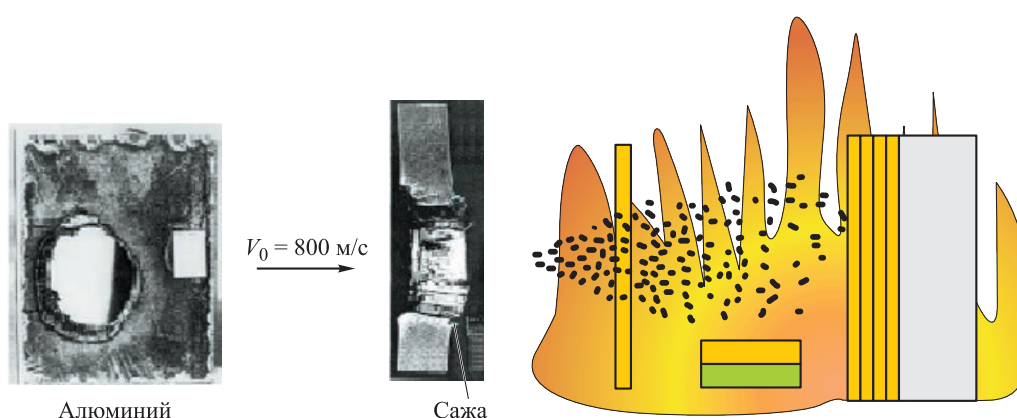


Рис. 3. Модель поражения цели РМ. Температура поверхности контакта около 500 °С

РМ (*RM, Reactive Materials*) – это композиция двух или более твердых веществ, не являющихся взрывчатыми в обычных условиях, но в которой высокоскоростной удар и интенсивная деформация при попадании в цель инициируют экзотермическую химическую реакцию между компонентами, дополнительное энерговыделение за преградой (внутри цели), что приводит к существенному усилению поражающего воздействия. Таким образом, это класс пиротехнических систем, рассчитанных на специфические условия применения. В отличие от традиционного подхода с использованием установленного режима реакции (например, в форме детонации или послойного горения) концепция РМ подразумевает связь скорости реакции с условиями удара; при этом эффект действия РМ может меняться в широком диапазоне.

Данный тип материалов наиболее интересен с точки зрения использования в качестве снаряжения для малокалиберных боеприпасов. Однако при применении РМ возникают определенные трудности в процессе проектирования и отработки новых типов БП, поскольку изучение и моделирование физико-химических процессов, сопровождающих срабатывание РМ, находятся на начальной стадии разработки. Но очевидные преимущества применения РМ – значительное усиление поражающей способности БП, отчетливость факта поражения цели, упрощение конструкции БП и/или повышение их эксплуатационной безопасности – заметно перевешивают указанные выше недостатки. В силу особенностей данного типа РМ (умеренная прочность и плотность, высокая калорийность) они оказались наиболее эф-

фективны при действии по слабозащищенным целям. В процессе удара такие ПЭ деформируются и разрушаются, что вместе со взрывоподобной реакцией приводит к увеличению пробоя и многофакторному (термобарическому и фугасно-зажигательному) действию в запреградном пространстве (рис. 3). Высокая температура и образующиеся мелкодисперсные конденсированные продукты нарушают работу электронных устройств приборных отсеков цели [2].

Для изучения процессов, проходящих при взаимодействии боеприпасов малого калибра, снаряженных РМ с преградами из легких сплавов, авторы провели ряд экспериментов и численное моделирование процесса проникновения (рис. 4) [3]. Во время исследований авторы обнаружили химическую экзотермическую реакцию, происходящую при ударе фторопластового ударника об алюминийсодержащую преграду на скоростях встречи более 600 м/с. Для изучения данного феномена и его дальнейшего применения в конструировании новых типов боеприпасов авторы провели всестороннее исследование данного процесса.

Целью исследования является подбор физико-математической модели, адекватно отражающей условия динамического взаимодействия фторопластового ударника с преградами из алюминиевых сплавов.

Взрывоподобный процесс, возникающий при деформировании головной части ударника о преграду, вызывает механическую термоокислительную деструкцию материала ударника с реализацией энергии по поверхности контакта с головной частью ударника.

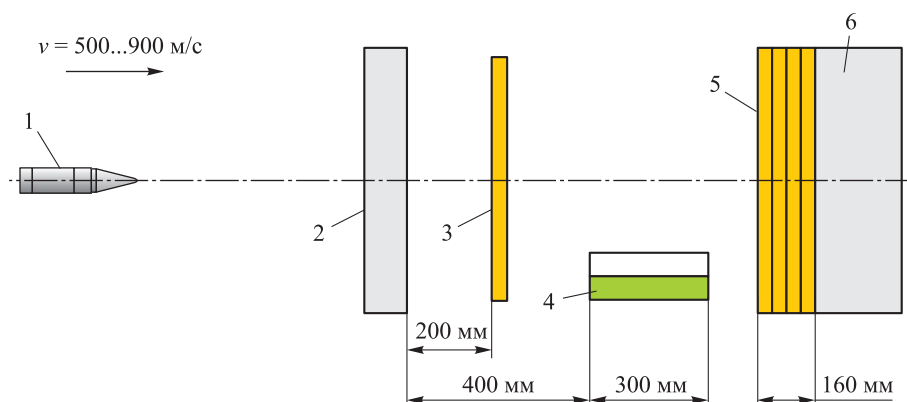


Рис. 4. Схема постановки эксперимента:

1 – ударник; 2 – преграда; 3 – фанера; 4 – дизельное топливо; 5 – доски; 6 – улавливатель (куб из алюминия)

Решение проблемы расчета кинематических и динамических характеристик проникания ударника из РМ в упругопластической постановке было выполнено с использованием ряда методов, реализованных в следующих программных продуктах: «Конечная баллистика», «ТИМ-2D», *ANSYS Autodyn*.

Для сравнения результатов, полученных указанными методами, численное моделирование проводилось с входными параметрами, соответствующими параметрам эксперимента. Расчеты были осуществлены без учета влияния дополнительной энергии, реализуемой химической экзотермической реакцией. В процессе вычислений были выбраны модели, описывающие упругопластическое деформирование ударника (Мизес) и преграды (модели Джонсона – Кука, Глушака, Мизеса), и различные уравнения состояния (УРС) материала ударника и преграды

(Забабахина и «баротропная зависимость») для адекватного описания упругопластических процессов. Для расчетов в программах «Конечная баллистика» и «ТИМ-2D» использовался метод крупных частиц [4]. Для расчета в программе *ANSYS Autodyn* – метод сглаженных частиц.

В табл. 1 показаны результаты расчетов и экспериментальные результаты для объема каверны. Графики зависимости объема каверны от скорости взаимодействия ударника из РМ и преграды на основе алюминиевого сплава АМц показаны на рис. 5.

Анализ графика (см. рис. 5) показывает, что модели Мизеса и Глушака дают явно завышенные результаты по объему каверны и не учитывает влияние химической реакции при расчете с УРС Забабахина для алюминия. С точки зрения авторов статьи, процесс упругопластического взаимодействия ударника из РМ

Таблица 1

Параметры объема каверны от взаимодействия фторопластового ударника с алюминиевой преградой (Ø13 мм, $m = 8,6$ г)

Начальная скорость, м/с	Модель Мизеса, МКЧ, УРС Забабахина, см ³	Модель Глушака, МКЧ, УРС Забабахина, см ³	Модель Джонсона – Кука, МКЧ, УРС Забабахина, см ³	Модель Мизеса, МКЧ, баротропная зависимость, см ³	Модель Джонсона – Кука, МСЧ, УРС Мизеса (скорость эрозии = 1), см ³	Модель Джонсона – Кука, МСЧ, УРС Мизеса (скорость эрозии = 3), см ³	Экспериментальные результаты, см ³
507	0,065	0,077	0,015	0,073	0,756	0,269	1,200
685	0,537	0,682	0,064	0,693	1,859	1,182	1,450
930	3,270	3,147	0,620	2,607	2,723	4,259	4,000
1108	6,055	5,827	2,276	4,049	3,934	8,766	6,500
1406	13,010	11,742	6,369	7,050	6,904	17,309	11,500

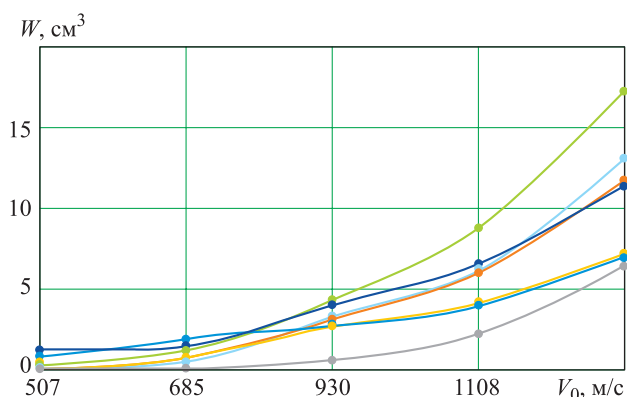


Рис. 5. Зависимость объема каверны от начальной скорости соударения фторопластового ударника с преградой на основе алюминия:

— модель Мизеса, МКЧ, УРС Забабахина; — модель Глушака, МКЧ, УРС Забабахина; — модель Джонсона – Кука, МКЧ, УРС Забабахина; — модель Мизеса, МКЧ, баротропная зависимость; — модель Джонсона – Кука, МСЧ, УРС Мизеса (скорость эрозии = 1), см³; — модель Джонсона – Кука, МСЧ, УРС Мизеса (скорость эрозии = 3), см³; — экспериментальные результаты

и преграды более точно описывается моделью Джонсона – Кука с УРС в форме баротропной зависимости.

При проведении экспериментов было отмечено, что на поверхности преграды появляется слой сажи (рис. 6). В закрытой камере химический анализ воздуха после выстрела подтвердил наличие фторидов алюминия и титана, что доказало существование интенсивной окислительной реакции материала преграды при взаимодействии с ударником.

Для учета дополнительной энергии, выделяющейся во время химической экзотермической реакции, протекающей между РМ и

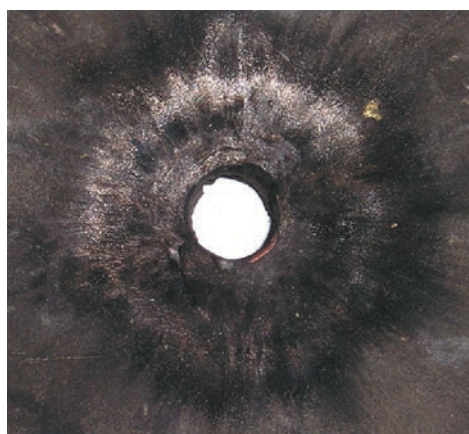


Рис. 6. Плита из алюминиевого сплава АМЦ после пробития фторопластовым ударником

легкосплавной преградой, можно использовать следующее уравнение:

$$E_x = A_{уд} (W_{оп} - W_{рас}), \quad (1)$$

где $W_{оп}$ – опытный объем каверны;

$W_{рас}$ – расчетный объем каверны.

Рассматривая процесс проникания любого срабатывающегося (теряющего массу в процессе проникания или деформирующегося) ударника в преграду можно отметить, что слои материала преграды и деформирующегося бойка движутся параллельно (рис. 7). При этом происходит химическое окисление алюминий- и титаносодержащей преграды при взаимодействии с фторопластом. Процессы параллельного окисления были рассмотрены на различного рода газовых смесях и сформированы в методе *Counterflow Diffusion Flame (CDF)*, впервые предложенном Цудзи и Ямаока [5].

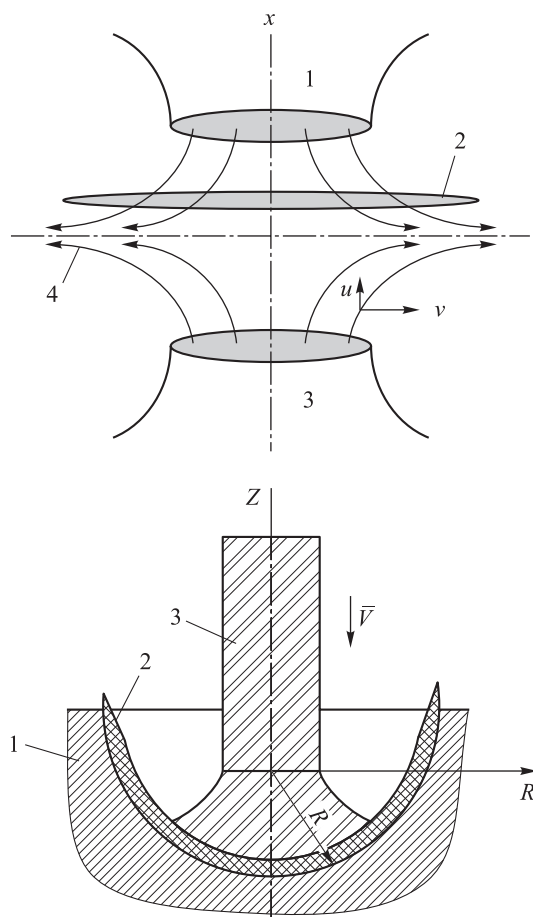


Рис. 7. Схема проникания ударника в преграду: 1 – окислитель; 2 – пламя; 3 – топливо; 4 – зона стагнации



Ламинарная противоточная диффузия пламени, как правило, рассматривается как чистое диффузионное пламя. Наиболее соответствующим процессам, протекающим при взаимодействии фторопластового ударника с преградой, является противоточное диффузионное пламя в передней критической области цилиндрической пористой горелки.

Ламинарное противоточное диффузионное пламя устанавливается в передней критической области проникающего фторопластового снаряда в алюминийсодержащую преграду. Скорость потока окислителя (фторопласта) можно рассчитать как радиальный компонент скорости срабатывающейся части снаряда. Образующая боковой поверхности ударника, как показали экспериментальные результаты, хорошо описывается в цилиндрической системе координат ORZ (см. рис. 7) уравнением вида

$$ZR^n = \text{const}, \quad (2)$$

где n – показатель степени, зависящий от материала ударника и условий его деформирования, $n > 0$.

Полагая, что уравнение линий тока для скорости частиц материала ударника в процессе его деформирования также будет описываться уравнением (2), найдем функциональную связь между осевой ϑ_z и радиальной ϑ_R компонентами скорости данной частицы материала:

$$\partial \vartheta_R = -\frac{R}{nZ} \vartheta_z. \quad (3)$$

Компоненты скорости должны удовлетворять уравнению неразрывности для несжимаемой среды в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial \vartheta_z}{\partial Z} + \frac{\partial \vartheta_R}{\partial R} + \frac{\vartheta_R}{R} = 0. \quad (4)$$

Уравнение неразрывности с учетом формулы (3) имеет вид

$$nZ \frac{\partial \vartheta_z}{\partial Z} - 2\vartheta_z - R \frac{\partial \vartheta_z}{\partial R} = 0. \quad (5)$$

На границе раздела жесткой и пластической областей ударника осевая компонента скорости частиц деформированного материала будет равна скорости жесткой части ударника, т. е. при $Z = h$, $\vartheta_z = -V$. Из решения уравнения (5) при заданном граничном условии на-

ходим выражение для осевой компоненты скорости частиц деформированного материала:

$$\vartheta_z = -V \left(\frac{Z}{h} \right)^{2/R}, \quad (6)$$

где h – текущая высота деформированной части ударника.

Подставляя уравнение (6) в формулу (3), получим:

$$\vartheta_R = V \frac{R}{nh} \left(\frac{h}{Z} \right)^{(n-2)/n}. \quad (7)$$

Определяя из решения задачи пластического деформирования фторопластового снаряда при его взаимодействии с преградой радиальную и осевую компоненты скорости, находим скорость движения окислителя вдоль образующей каверны ϑ_R и давление на границе контакта снаряда с преградой.

С учетом того, что скорость потока окислителя (фторопласта) должна быть больше скорости потока топлива (алюминия), решение, представленное Цудзи и Ямаоко для вывода скорости реакции и оценки тепловыделения протекающего химического процесса модели противоточного диффузионного пламени, может быть применено для случая взаимодействия фторопластового бойка с алюминиевой преградой.

Скорость тепловыделения и скорость реакции могут быть рассчитаны по квазиодномерному уравнению сохранения энергии и уравнению неразрывности соответственно.

$$Q = A^{-1} \left\{ \rho_0 v_0 \sum_i G_i C_{pi} \frac{dT}{dy} - \frac{d}{dy} \left(A \lambda \frac{dT}{dy} \right) \right\}, \quad (8)$$

где A – соотношение поток – трубка – площадь в любой точке;

ρ – плотность газовой смеси;

C_{pi} – теплоемкость при i постоянном давлении;

T – температура газа;

λ – теплопроводность газовой смеси.

Индекс 0 обозначает некоторую точку отсчета G_i .

Чистая скорость реакции K_i , т. е. чистая молярная скорость генерации или потребления



видов i в единицу объема за единицу времени химической реакции, рассчитывается по формуле

$$K_i = \frac{\rho v dG_i}{M_i dy}, \quad (9)$$

где M_i – молекулярная масса.
Масса потока:

$$G_i = \rho Y_i(v + v_{di}), \quad (10)$$

где v – скорость потока.

Массовая концентрация Y_i задается формулой

$$Y_i = \frac{X_i M_i}{\sum_i X_i M_i}, \quad (11)$$

где X_i – молярная доля i -й частицы.

Скорость диффузии определяется выражением

$$v_{di} = -\frac{D_i dX_i}{X_i dy}, \quad (12)$$

где D_i – двоичный коэффициент диффузии.

Плотность газовой смеси рассчитывается исходя из измеренных температуры и концентрации стабильных уравнений состояния:

$$p = \frac{\rho R^\circ T}{\sum_i X_i M_i}, \quad (13)$$

где p – давление;

R° – универсальная газовая постоянная.

Соотношение поток – трубка – площадь A определяется из плотности и измеряемой скорости по общему уравнению неразрывности:

$$\rho v A = \rho_0 v_0. \quad (14)$$

В предположении, что двоичные коэффициенты диффузии всех пар равны и что массовая концентрация Y_i – это функция i консервативного скаляра ζ (или какой-либо функции Шваба – Зельдовича), уравнение состояния для скорости реакции может быть преобразовано в простую форму:

$$w_i = -\rho D (\vartheta_{R\xi})^2 \frac{d^2 Y_i}{d\xi^2}, \quad (15)$$

где w_i – чистая скорость реакции (масса на единицу объема в секунду);

D – молекулярная диффузия;

ϑ_r – единая скорость потока окислителя.

Отличительной чертой уравнения (15) является то, что для получения скорости химической реакции требуются измерения только состава и температуры. Необходимые параметры температуры получаются при решении задачи упруго-пластического деформирования в каждой ячейке.

Важным шагом является создание смешанной ячейки, в которой возникают химическая реакция и продукты химической реакции в форме фторида алюминия. Давление, образующееся на поверхности контакта, способствует появлению этой реакции. Расчет позволил оценить полученное давление (рис. 8). Анализ показывает, что максимальное давление намного превышает предельное давление, при котором инициируется химическая реакция (200 МПа).

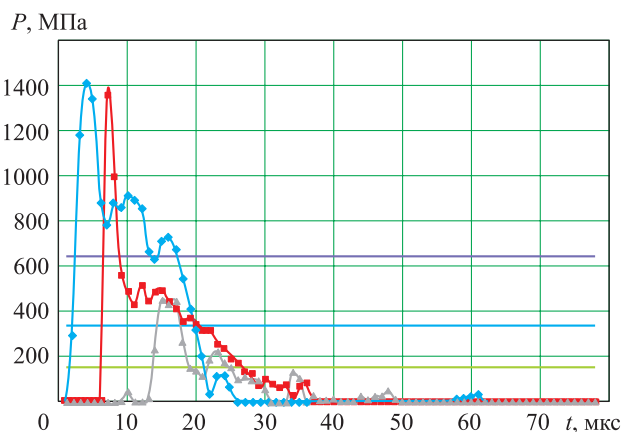


Рис. 8. Давления, возникающие на границе контакта: —●— $V_0 = 1406$ м/с; —■— $V_0 = 930$ м/с; —▲— $V_0 = 507$ м/с; — — $P_{avg}(V_0 = 1406$ м/с)

Для учета влияния химической энергии на процесс проникания в метод крупных частиц введен блок расчета тепловыделения по модели CDF . Напрямую программный комплекс $ANSYS Autodyn$ не может сочетать процессы горения и проникания. Таким образом, была предпринята попытка представить проникающий боеприпас как многослойную конструкцию, в которой четные слои проникают как твердое тело, а нечетные – горят. Результат расчета объема каверны с использованием методики CDF , реализованный в двух

программных комплексах (рис. 9), показывает, что данные, полученные в программном комплексе *ANSYS Autodyn*, превышают экспериментальные.

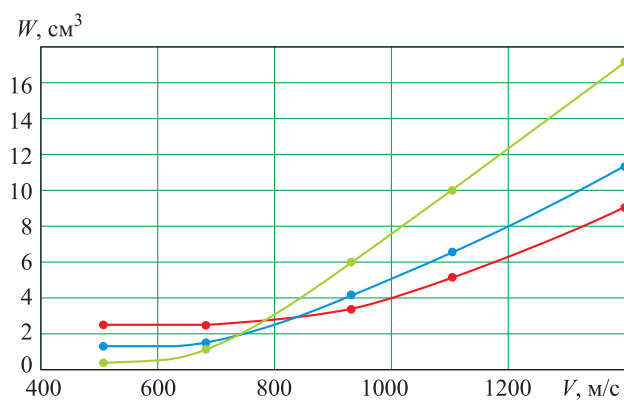


Рис. 9. Зависимость объема каверны от начальной скорости соударения фторопластового ударника с преградой на основе алюминия с использованием методики *CDF*:

— экспериментальные результаты; — конечная баллистика; — *ANSYS Autodyn*

Выводы

1. Предложенный метод позволяет оценить результаты взаимодействия фторопластового ударника с преградой на основе алюминия в широком диапазоне начальных скоростей со значительной степенью точности.

2. Предложенный метод расчета в программе «Конечная баллистика» позволяет вычислять кинетическую и химическую энергию проникающего боеприпаса одновременно.

3. Использование реакционных материалов, таких как фторопласт, в качестве энерго-

носителя делает возможным разработку новых типов малокалиберных боеприпасов (патенты № 2582322, 2625991).

Список литературы

1. *Khmel'nikov E.A., Styrov A.V., Smagin K.V., Rudenko V.L.* etc. Analyses of processes are flowing in high speed interaction between firing pins contains fluoropolymer and aluminum containing barrages // 27th International Symposium on Ballistics. 2013. Vol. 2. Pp. 1264–1276.

2. *Khmel'nikov E.A., Styrov A.V., Smagin K.V., Kravchenko N.S.* etc. Study of high-speed interaction processes between fluoropolymer projectiles and aluminum-based targets // Defence Technology. 2015. Vol. 11. Issue 1. Pp. 56–64. DOI: 10.1016/j.dt.2014.09.006.

3. *Khmel'nikov E.A., Smagin K.V., Zavodova T.E.* Application of the Methodology "Counterflow Diffusion Flames" in Modeling of the Terminal Ballistic Processes of Munitions Based on Reactionary Material // Proceedings 11th International High Energy Materials Conference & Exhibits. 2017. Vol. 1. Issue. 1. Pune: High Energy Materials Society of India. Pp. 270–276.

4. *Belotserkovsky O.M., Davidov Y.M.* Method of large particles in the gas dynamics. M.: Nauka. Home edition of Physical and mathematical literature, 1982. 392 p.

5. *Tsuji H.* Counterflow diffusion flames // Progress in Energy and Combustion Science. 1982. Vol. 8. Issue 2. Pp. 93–119. DOI: 10.1016/0360-1285(82)90015-6

Поступила 21.03.18

Хмельников Евгений Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Специальное машиностроение» Нижнетагильского технологического института (филиала) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Нижний Тагил.

Область научных интересов: внутренняя, внешняя и конечная баллистика, поведение материалов при импульсных нагрузках.

Заводова Татьяна Евгеньевна – старший преподаватель кафедры «Специальное машиностроение» Нижнетагильского технологического института (филиала) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Нижний Тагил.

Область научных интересов: внутренняя, внешняя и конечная баллистика, математическое моделирование быстротекущих процессов внешней баллистики.



Смагин Константин Владимирович – старший преподаватель кафедры «Специальное машиностроение» Нижнетагильского технологического института (филиала) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Нижний Тагил.

Область научных интересов: внутренняя, внешняя и конечная баллистика, математическое моделирование быстропотекающих процессов конечной баллистики.

Дубинина Софья Федоровна – ассистент кафедры «Специальное машиностроение» Нижнетагильского технологического института (филиала) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Нижний Тагил.

Область научных интересов: внутренняя, внешняя и конечная баллистика, математическое моделирование быстропотекающих процессов внутренней баллистики.

Application of the “counterflow diffusion flame” method in simulating the final ballistics of ammunition based on reaction materials

Due to the constant modernization of weapons and ammunition production, it has become necessary to search for new types of equipment. Within the research, we examine the possibility of using fluoroplastic as a reaction material which can replace explosives in ammunition used to destroy lightly armored and soft targets. The paper shows the results of experiments and mathematical simulation of the fluoroplastic striker penetrating into the light alloy barriers. The counterflow diffusion flame method was used to take into account the additional energy released as a result of interaction during the simulation.

Keywords: counterflow diffusion flame, mathematical simulation.

Khmelnikov Evgeniy Aleksandrovich – Doctor of Engineering Sciences, Head of Department of Special Engineering, Nizhny Tagil Technological Institute, branch of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeitsin”, Nizhny Tagil.

Science research interests: interior, exterior and terminal ballistics, material response under impulse loads.

Zavodova Tatiana Evgenievna – Senior Lecturer, Department of Special Engineering, Nizhny Tagil Technological Institute, branch of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeitsin”, Nizhny Tagil.

Science research interests: interior, exterior and terminal ballistics, mathematical simulation of high-speed processes of exterior ballistics.

Smagin Konstanton Vladimirovich – Senior Lecturer, Department of Special Engineering, Nizhny Tagil Technological Institute, branch of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeitsin”, Nizhny Tagil.

Science research interests: interior, exterior and terminal ballistics, mathematical simulation of high-speed processes of terminal ballistics.

Dubinina Sofia Fedorovna – Assistant Lecturer, Department of Special Engineering, Nizhny Tagil Technological Institute, branch of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeitsin”, Nizhny Tagil.

Science research interests: interior, exterior and terminal ballistics, mathematical simulation of high-speed processes of interior ballistics.