

## Conclusion

1. The study of the PTFE striker deformation on the aluminum-based target process in conjunction with parallel oxidation of the contact layer processes allowed the development a combined method of calculation describing this interaction processes (MLP-CDF).
2. The proposed method allows evaluate the results of the interaction of PTFE with aluminum-based target in a wide range of interaction velocity with sufficient degree of accuracy (relative error does not exceed 10%).
3. The results make it possible to apply this method for calculations of interaction results for other interacting pairs, such as PTFE-titanium.
4. Analysis of the results shows that under these interaction conditions, the chemical energy is not used in full. Increase of amount of useful used chemical energy is possible if to use mixtures derived from mechanical mixing aluminum and PTFE nanoparticles as striker material. Strikers can be obtained subsequently compressing of the mechanically activated mixture.

## References

1. A.V. Styrov; V.V. Selivanov; A.I. Osipov; E.A. Khmelnikov; Electrophysics of combustion. Proc. of XIII all-unionworkshop, 1990, 63.
2. E.A. Khmelnikov; A.V. Styrov; K.V. Smagin; V.L. Rudenko etc.; 27th International Symposium on Ballistics, Vol.2, 2013, 1264. ISBN: 978-160595106-5
3. E.A. Khmelnikov; A.V. Styrov; K.V. Smagin; N.S Kravchenko etc.; Defence Technology, Vol. 11, Issue 1, 2015, 56.  
DOI: 10.1016/j.dt.2014.09.006
4. O.M. Belotserkovsky; , Y.M. Davidov; Method of large particles in the gas dynamics. - М.: Nauka. Home edition of Physical and mathematical literature, 1982. – 392.
5. Hiroshi Tsuji, Counterflow diffusions flames. 1982. Institute of Interdisciplinary Research, Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Komaba, Merguro-Ku, Tokyo 153, Japan.

## ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТИ СХЛОПЫВАНИЯ КУМУЛЯТИВНОЙ ОБЛИЦОВКИ

*К.А. Карнаузов, В.Д. Баскаков, О.В. Зарубина, В.М. Маринин*

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Инженерные методики расчета кумулятивного действия (смотри, например, [1, 2]) широко применяются в исследовательской и инженерной практике. Главным достоинством инженерных методик является быстродействие при проведении расчетов, а основной недостаток заключается в использовании большого количества допущений и приближений при построении математических зависимостей, лежащих в их основе. Такие допущения оказывают негативное влияние на точность проведения расчетов, особенно при анализе кумулятивных зарядов сложной конструкции (например, использующих торцовые поджимные гайки, облицовки с цилиндрическими “юбками”, толстостенные корпусные детали и др.).

Численные расчеты, основанные на методах конечных разностей и конечных элементов, позволяют провести всестороннюю проверку инженерных методик, включая основные положения и допущения, положенные в их основу. Такая проверка особенно важна для создания алгоритмов и программ оценки влияния технологических погрешностей на пробивное действие кумулятивного

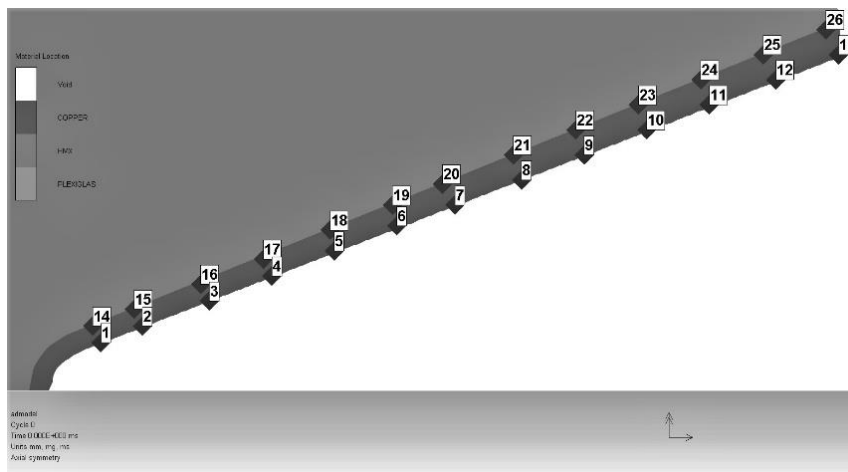
заряда (КЗ), где инженерные методики и их элементы используются как составные части более сложных методик и применяются, например, для вычисления производных скорости схлопывания  $w_c$  кумулятивной облицовки (КО) по параметрам конструкции КЗ [3, 4]. В инженерных методиках под  $w_c$  обычно понимают скорость метания КО продуктами детонации взрывчатого вещества (ВВ) в момент формирования кумулятивной струи (КС).

Цель данной работы – повышение точности оценки скорости обжатия КО в инженерной методике [1]. Для ее достижения разработан метод численной оценки скорости обжатия КО, проведено всестороннее сравнение результатов расчета скорости обжатия КО, проведено всестороннее сравнение результатов расчета скорости обжатия, полученных численным методом и по инженерным методикам, обоснованы поправки на задержку времени прихода волны разгерметизации в рассматриваемое сечение облицовки от боковой поверхности КЗ.

Численные расчеты скорости обжатия КО проводились на лабораторном заряде диаметром 46 мм с медной КО в конструктивных исполнениях без наружного корпуса (КЗ №1) и со стальным корпусом толщиной 3 мм (КЗ №2).

Вычисления выполнялись в программном комплексе ANSYS AUTODYN, в системе координат Эйлера в соответствии с рекомендациями работы [5, 6]. КО была выполнена из меди (COPPER) с уравнением состояния (УРС) Shock, ВВ – октоген (HMX) с УРС JWL, линза – оргстекло (PLEXIGLAS) с УРС Shock. Корпус изготовлен из углеродистой стали обычного качества с 1% содержанием марганца, в качестве УРС выбрана ударная адиабата Shock.

Размер ячейки для задачи составлял 0,2 мм x 0,2 мм. Для изучения динамики изменения скорости обжатия различных элементов облицовки на ее наружную и внутреннюю поверхность устанавливались подвижные датчики, скрепленные с материалом облицовки. Датчики располагались попарно, на кратчайшем расстоянии друг от друга – темные точки на поверхности КО, отмеченные цифрами от 1 до 26 (рисунок 1). Датчики предназначались для считывания физических параметров в каждый момент времени протекания процесса схлопывания КО и дальнейшего формирования КС.



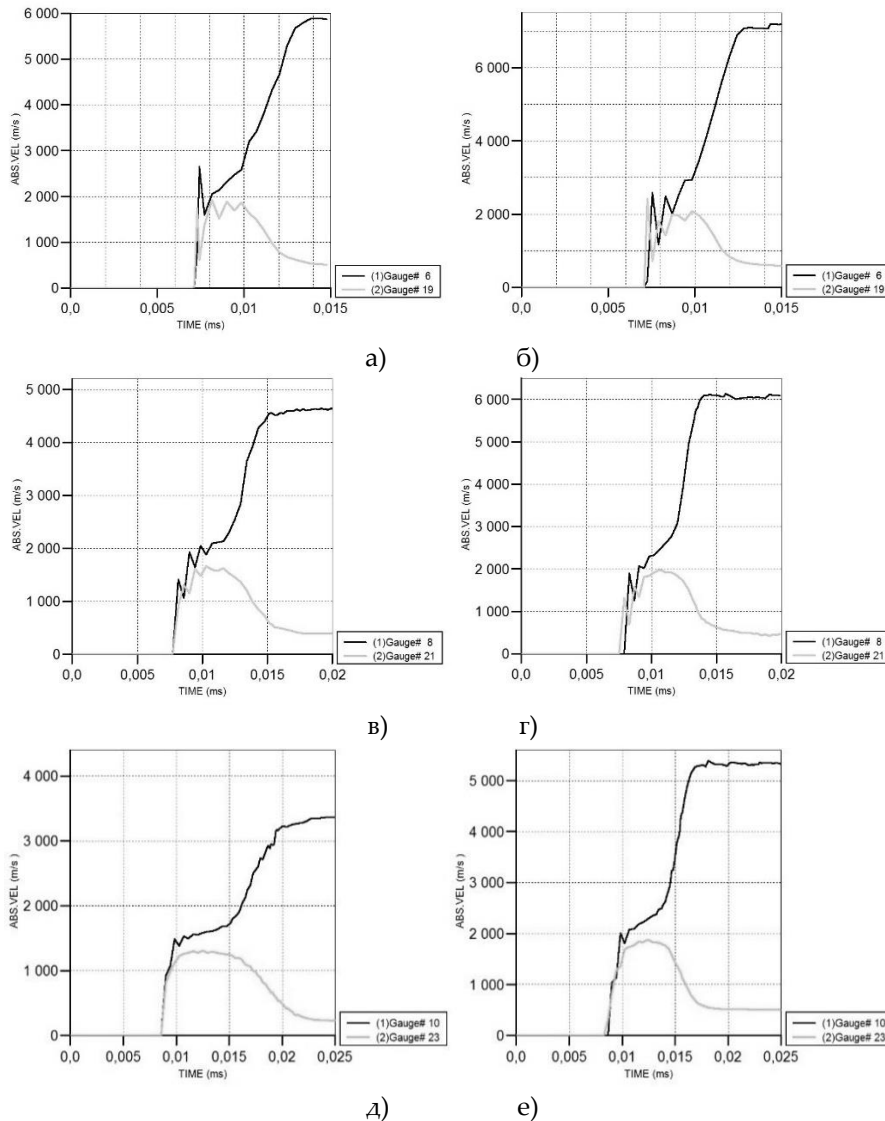
**Рисунок 1.** Исходное положение подвижных датчиков на поверхность КО

Расчетами установлено, что противолежащие датчики на наружной и внутренней поверхности изменяют свою скорость  $w(t)$  следующим образом: датчики на внутренней поверхности (1 – 13) сначала ускоряются, затем скорость их падает, затем интенсивно ускоряются и к моменту образования струи скорость датчиков выходит на асимптотический уровень. Датчики на наружной поверхности (14 – 26) в начале ускоряются, потом скорость их падает, к моменту образования песта скорость датчиков выходит на асимптотический уровень. Такой характер изменения скорости движения  $w(t)$  не противоречит закономерностям формирования струи и

песта. Установлено, что для каждой пары противоположащих датчиков имеется характерное время  $t^*$ , которому соответствует экстремум скорости для наружного датчика  $w_3$  и перегиб на графике скорости внутреннего датчика  $w_{\Pi}$  (рисунок 2). Это характерно как для КЗ №1, так и для КЗ №2.

Очевидно, что перегибы  $w_{\Pi}$  и экстремумы  $w_3$  на графиках  $w(t)$  соответствуют началу формирования элементов КС – ее высокоскоростной части и песта. С целью нивелирования различий между  $w_{\Pi}$  и  $w_3$  для каждого элемента облицовки, обусловленных влиянием толщины облицовки, под скоростью схлопывания  $w_c$  каждого элемента облицовки будем понимать усредненную величину:

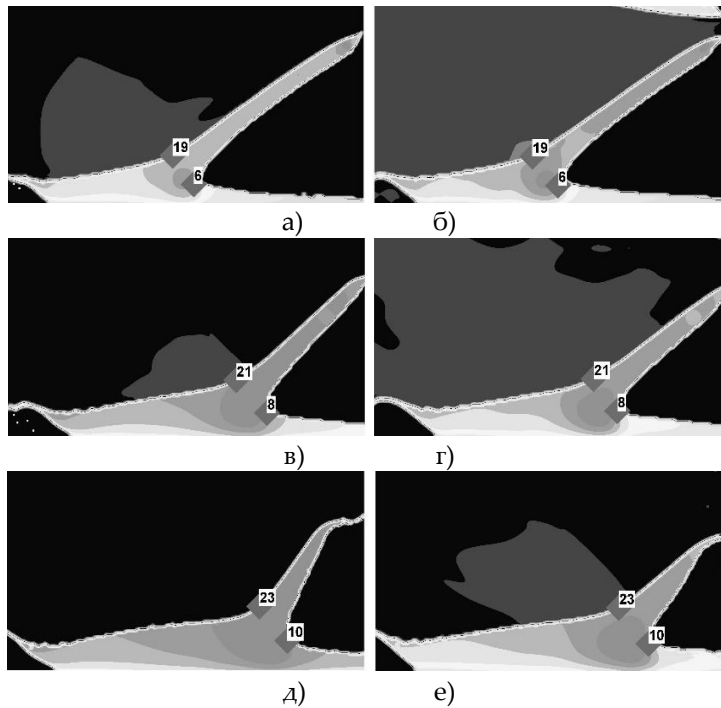
$$w_c = (w_{\Pi} + w_3)/2.$$



**Рисунок 2.** Скорость  $w$  элементов КО для КЗ №1 и КЗ №2 в зависимости от времени  $t$  протекания процесса для различных датчиков: а), б) – датчики 6, 19; в), г) – датчики 8, 21; д), е) – датчики 10, 23; а), в), д) – КЗ №1; б), г), е) – КЗ №2

Установлено также, что перегибы  $w_{\Pi}$  и экстремумы  $w_3$  на графиках  $w(t)$  (рисунок 2) соответствуют времени  $t^*$  выходу датчиков, расположенных в начальный момент времени на

внешней и внутренней поверхности КО, на соответствующие биссектрисы углов схлопывания (рисунок 3).



**Рисунок 3.** Положение подвижных датчиков КО (темные точки на поле плотностей) КЗ №1 и КЗ №2 в момент выхода на биссектрису внутреннего и внешнего угла:  
 а), б) датчики 6, 19; в), г) датчики 8, 21; д), е) датчики 10, 23; а), в), д) КЗ №1; б), г), е) КЗ №2

Для проверки адекватности предложенного подхода к оценке скорости обжатия  $w_c$  КО проведено сравнение результатов численных расчетов с данными вычислений по инженерным методикам для КЗ №1 (рисунок 4 а). Численные расчеты удовлетворительно совпадают с инженерной методикой работы [1], которая широко используется при проектировании и исследовании КЗ. Это позволяет считать предложенный подход к оценке скорости обжатия приемлемым для практических оценок. В тоже время для КЗ №2 численные расчеты совпадают с данными инженерной методики только в области вершины КО. Объясняется это тем, что инженерная методика работы [1] изначально не учитывает влияние корпуса на скорость схлопывания.

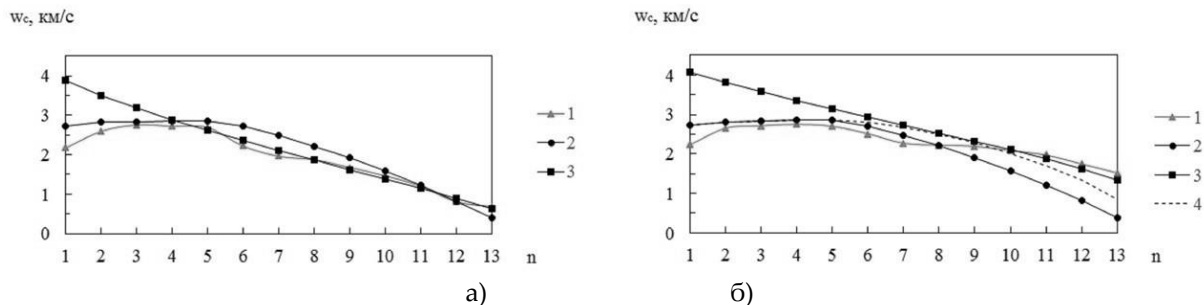
Для учета влияния корпуса дополним инженерную методику работы [1], добавив ко времени прихода боковой волны разрежения составляющую, пропорциональную двукратному времени пробега УВ по корпусу. Следует отметить, что корпус оказывает влияние также и на интенсивность спада давления, действующего на КО в области основания, которая в данной работе не учитывалась.

Момент прихода боковой волны разрежения  $t_6$  к соответствующему элементу КО в методике работы [1] при учете корпуса будем определять зависимостью

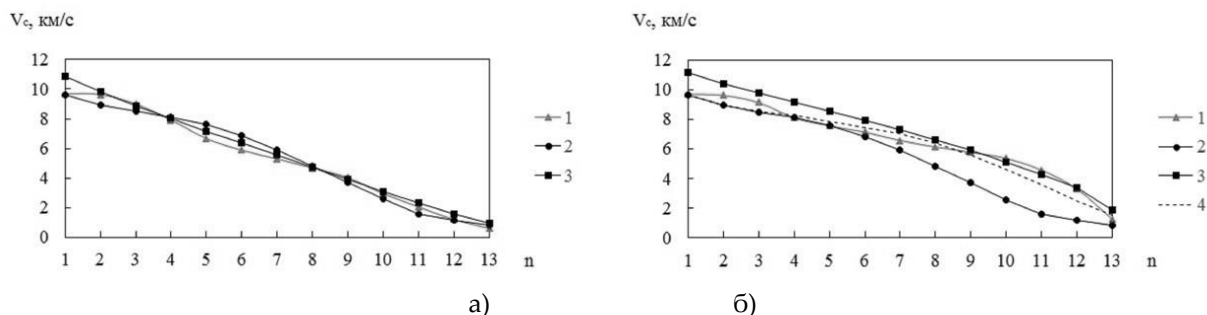
$$t_6 = t_0 \left[ 1 + 1,43 \frac{y}{Dt_0} + 0,43 \left( \frac{y}{Dt_0} \right)^2 \right] + k \frac{2\delta}{c_0} \quad (1)$$

где  $t_0$  – время прихода детонационной волны к текущему элементу КО;  $y$  – расстояние, проходимое волной разрежения за время  $t$ ;  $D$  – скорость детонации ВВ;  $k$  – коэффициент, зависящий от угла подхода ДВ к корпусу КЗ (1...1,2);  $\delta$  – толщина корпуса КЗ;  $c_0$  – скорость звука в материале корпуса КЗ. Второе слагаемое предложенной зависимости является задержкой по времени, обусловленной влиянием корпуса.

Предложенный подход по учету времени задержки волны разряжения удовлетворительно совпадает с результатами численных расчетов скорости обжатия  $w_c$  КО, а также скорости струи  $V_c$  для КЗ №2 (рисунок 4, 5;  $n$  – номер сечения КО).

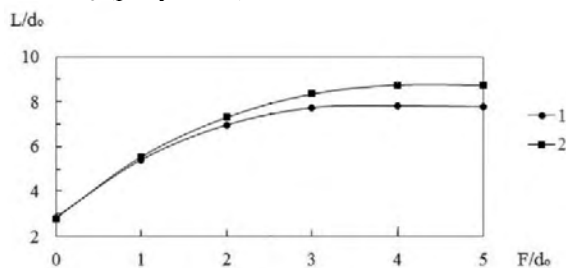


**Рисунок 4.** Зависимость скорости схлопывания  $w_c$  от номера  $n$  поперечного сечения КО: 1 – численные расчеты; 2 – расчеты по методике работы [1]; 3 – расчеты по методике работы [2]; 4 – расчеты по методике работы [1] с учетом (1); а) – КЗ №1; б) – КЗ №2



**Рисунок 5.** Зависимость скорости схлопывания  $V_c$  от номера  $n$  поперечного сечения КО: 1 – численные расчеты; 2 – расчеты по методике работы [1]; 3 – расчеты по методике работы [2]; 4 – расчеты по методике работы [1] с учетом (1); а) – КЗ №1; б) – КЗ №2

Очевидно, что наличие корпуса сказывается на пробивной способности КЗ. Расчеты по инженерной методике работы [1] показывают, что на фокусном расстоянии  $F = 2,5d_0$  разница в пробивной способности КЗ №2, в отличие от КЗ №1, составляет  $0,5d_0$ , тогда как на расстоянии  $F = 4d_0$  разница достигает значения  $d_0$  (рисунок 6).



**Рисунок 6.** Зависимость относительной глубины проникания КС  $L/d_0$  от относительного расстояния КЗ до стальной преграды  $F/d_0$ : 1 – КЗ №1 (по методике работы [1]); 2 – КЗ №2 (по методике работы [1] с учетом (1))

## Выводы

1. Разработана методика определения скорости схлопывания кумулятивной облицовки, основанная на обработке результатов численных расчетов скорости движения облицовки в противоположащих друг другу областях ее внутренней и наружной поверхностей.

2. Показано, что скорость схлопывания  $w_c$  соответствует среднему значению скорости точек перегиба  $w_n$  (датчики на внутренней поверхности КО) и экстремумов  $w_3$  (датчики на внешней поверхности КО).
3. Установлено, что численные расчеты скорости схлопывания удовлетворительно совпадают с данными инженерной методики работы [1] только для кумулятивных зарядов без корпуса. Для кумулятивных зарядов с корпусом численные расчеты и данные инженерной методики существенно отличаются друг от друга для области основания облицовки.
4. Предложена поправка в формулу расчета времени прихода боковой волны разрежения для инженерной методики работы [1], пропорциональная времени двойного пробега ударной волны по толщине корпуса, повышающая точность расчета скорости обжатия в 1,2 раза для области основания КО.
5. Для оценки пробивного действия корпусных КЗ сложной конструкции (например, использующих торцовые поджимные гайки, облицовки с цилиндрическими “юбками” и др.) целесообразно использовать разработанную численную методику расчета скорости обжатия с последующей подстановкой полученных результатов в инженерные методики для оценки пробивного действия.

### Список литературы

1. В.М. Маринин, А.В. Бабкин, В.И. Колпаков Методика расчета параметров функционирования кумулятивного заряда // Оборонная техника. 1995. №4. С. 34 – 39.
2. Л.П. Орленко Физика взрыва – Изд. 3-е, переработанное. – В 2 т. Т. 2. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 656 с.
3. В.А. Тарасов, В.Д. Баскаков, М.А. Дубовской Влияние технологической наследственности на пробивное действие кумулятивных зарядов//Оборон. техника. 1995. № 4. С. 54-59.
4. В.Д. Баскаков, В.А. Тарасов, В.И. Колпаков, А.С. Софьин Методика оценки влияния погрешностей конструкции снарядоформирующих зарядов на кучность попадания в цель и пробивное действие удлиненных поражающих элементов // Оборонная техника. 2010. № 1-2. С. 90.
5. В.И. Колпаков, В.Д. Баскаков, Н.В. Шикунов Математическое моделирование функционирования снарядоформирующих зарядов с учетом технологических асимметрий // Оборонная техника. 2010. № 1-2. С. 82.
6. В.Д. Баскаков, О.В. Зарубина, К.А. Карнаухов, В.А. Тарасов. Математическое моделирование процесса соударения плоских струй идеальной жидкости Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки. 2016. № 2 (65). С. 79-90.

## NUMERICAL ANALYSIS OF LINER COLLAPSE VELOCITY

*K. A. Karnaukhov, V. D. Baskakov, O. V. Zarubina, V. M. Marinin*

BMSTU, Moscow, Russia

Engineering methods of calculating shaped charge effect (see, for example, [1, 2]) are widely used in research and engineering practice. The main advantage of engineering methods is their rapid calculation capacity, while the main disadvantage consists in the use of quite a few allowances and approximations in constructing mathematical relationships underlying their basis. Such approximations adversely affect