

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
НИИ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
СОВРЕМЕННОЙ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД  
И НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ  
(27–29 ноября 2013 г.)**

**III Всероссийская молодёжная научная конференция**

*Под редакцией М.Ю. Орлова*

Томск  
Издательский Дом Томского государственного университета  
2014

**Выводы.** Построена и реализована в пакете MathCAD математическая модель работы электромагнитной измерительной рамки (ЭМИР) на пролет модели с маркером высокой магнитной проницаемости. Показана целесообразность применения маркеров из материалов с высокой магнитной проницаемостью (например, пермаллой) для определения моментов пролета и скоростей моделей из неэлектропроводных немагнитных материалов с использованием электромагнитных измерительных рамок «ЭМИР».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сняев С.В. Датчик скорости для высокоскоростных метательных комплексов // Динамика систем, механизмов и машин: тез. докладов междунар. науч.-техн. конф. Кн. 1. Омск: Изд-во Ом. гос. тех. ун-та, 1995. С. 54.
2. Кульпин В.И., Сняев С.В., Христенко Ю.Ф. Датчик положения и скорости перемещения быстро движущихся тел // патент РФ № 2193207. Бюлл. №32, 2002.
3. Киреева А. А., Сняев С.В. Математическая модель работы электромагнитного датчика скорости быстро летящих тел // Труды ТГУ. Сер. физико-математическая. 2012. Т. 282. С. 237–241.
4. Григорьева М. И., Сняев С.В. Математическое моделирование работы электромагнитного датчика скорости для высокоскоростных метательных комплексов // Современная баллистика и смежные вопросы механики: сб. материалов науч. конф. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2010. С. 75–76.
5. Электротехнический справочник М.: Энергия, 1974. Т. 1. 775 с.
6. Сняев С.В., Киреева А.А. Однорамочный индукционный датчик мгновенной скорости модели в канале баллистической установки // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 6/3. С. 69–71.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЭЛЕКТРО-ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО ВЫСТРЕЛА

**А.Д. Сидоров**

*В данной работе рассмотрена серия баллистических экспериментов с зарядом при температуре 50 °С. Воспламенения пороха производились с помощью капсуля и введения электрической энергии через плазматрон.*

## RESEARCH SCHEMES AND OPPORTUNITIES ELECTRO-THERMOCHEMICAL SHOT

**A.D. Sidorov**

*In this paper we consider a series of ballistic experiments with temperature at -50 ° C. Ignition of gunpowder were made with capsule and through the introduction of electrical energy through the plasma torch.*

Явление выстрела представляет совокупность сложных физико-химических и механических процессов, протекающих достаточно быстро. В случае артиллерийского орудия: зажание, воспламенение и горение метательного заряда, который может состоять из нескольких элементов, различающихся теплофизическими свойствами; деформации и движение ствола под действием давления пороховых газов; движение самого снаряда и его взаимодействие со стволом орудия; взаимодействие пороховых газов со стенками канала ствола и др.

Целью данной работы является проведение расчетов выстрелов, сравнение с экспериментальными данными, подбор температурных коэффициентов горения пороха, трения снаряда о канал ствола, давления форсирования а также в ЭТХ (электро-термохимической) схеме метания скорости горения пороха.

Актуальность выбранной темы связана с тем, что проблема повышения скорости на дульном срезе была, есть и будет. Поскольку классическая схема не позволяет

получать высокие скорости, при создании устройств высокоскоростного метания используются более разнообразные способы ускорения снарядов. В данной работе рассмотрены два вида метания: с традиционным зарядом и с применением ЭТХ схемы.

### Состояние мирового исследования

Под классической схемой в баллистике понимают метание снаряда, осуществляемое только за счет пороха. Простейшим устройством этого типа является обычная пушка, в которой снаряд ускоряется газами, образующимися при сгорании топлива в камере.

Концепция ЭТХ метания была предложена как способ повышения дульной скорости в результате улучшения характеристик обычной пушки, действующей за счет химической энергии заряда (рис. 1).

Улучшение характеристик пушки базировалось на двух принципах. Первый: электрическая энергия должна дополнять химическую энергию обычного порохового заряда. Второй: поскольку вводом электрической энергии можно успешно управлять, то за счет целенаправленного ввода энергии в камеру пушки можно обеспечить приближение диаграммы давления к идеальной форме (плоской) в течение более продолжительного отрезка времени, что позволит увеличить дульную скорость. Для проверки этих идей были проведены расчеты внутренней баллистики при идеальных условиях для большого количества пушек с тем, чтобы оценить потенциальные возможности повышения характеристик пушек в случае использования ЭТХ – концепции. Расчеты показали, что при использовании источников электрической энергии реальных размеров и стандартных пороховых зарядов могут быть получены лишь незначительные улучшения характеристик даже в идеальных условиях.

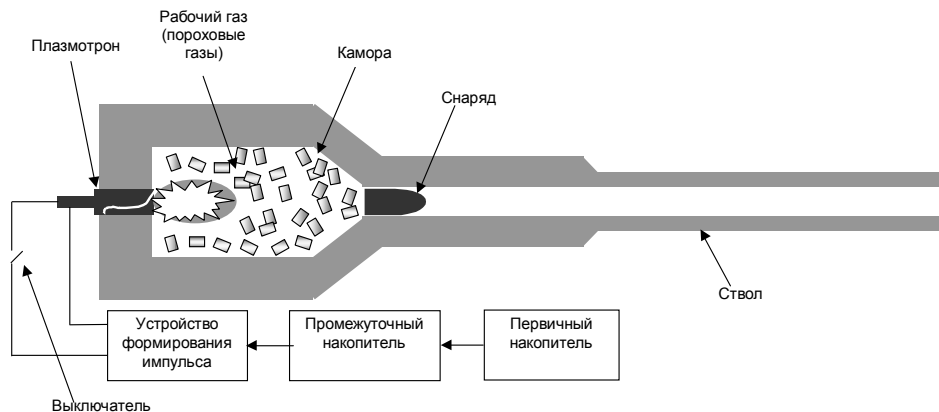


Рис. 1. ЭТХ с вводом плазмы со стороны затвора

### Проведенные исследования

В ходе выполнения работы была рассмотрена серия опытов НИИ ПММ ТГУ. Имелось топливо, которое воспламенялось капсулем или введением энергии. В приведенных ниже расчетах от классики ЭТХ эксперименты отличаются лишь добавлением энергии, а заряд, условия заряжания, снаряд, остаются прежними. Построим кривые зависимости давлений и скоростей от энергии (рис. 2) для снарядов разного калибра ( $d_1$  и  $d_2$ ). Разница в калибре 0,02 мм. Стоит отметить, что во всех опытах начальная температура заряда 223 К.

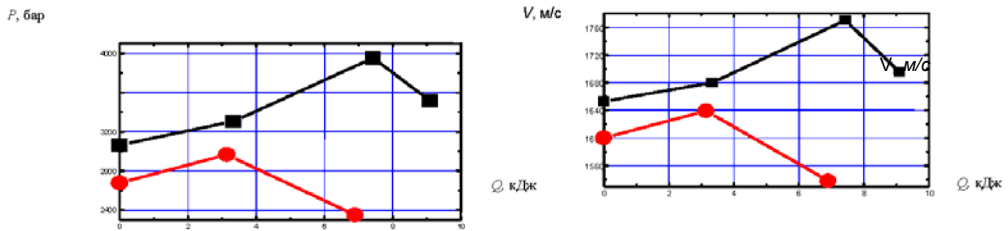


Рис. 2. Зависимости давлений и скоростей от энергии: круг-d1, квадрат- d2)

Выполнив вычисления всех экспериментов в программе газодинамического расчета внутрибаллистических процессов в ствольных системах [1], были получены значения давления и дульной скорости, а также были построены расчетные кривые.

Рассмотрим сначала меньший калибр снаряда. Для расчета данных экспериментов необходимо знать величины трения в сечениях ствола и температурных коэффициентов горения порохового заряда и давление форсирования. Эти значения являются параметрами согласования. Поэтому просчитаем классический опыт (опыт 1), чтобы подобрать величины трения, которые используются в ЭТХ выстреле (от 55 бар в начале координате ствола до 5 бар на дульном срезе), температурные коэффициенты ( $\gamma_f = 0,0001 \text{ K}^{-1}$ ;  $\gamma_u = 0,0012 \text{ K}^{-1}$ ), а также форсирование (480 бар). Зная коэффициенты, посчитаем силу пороха по формуле (1) и получим 906300 Дж/кг

$$f = f_0 \cdot (1 - \gamma_f \cdot (T - T_0)) \quad (1)$$

В итоге были получены расчетные значения скорости снаряда (точность расчета составляет 1%) и давления на датчике (точность расчета составляет 0,8%). Но была получена не столь точная кривая (черная – опыт, красная – расчёт) давления (рис. 3). Полагается, что геометрический закон горения заряда дает такое расхождение кривых давления [2].

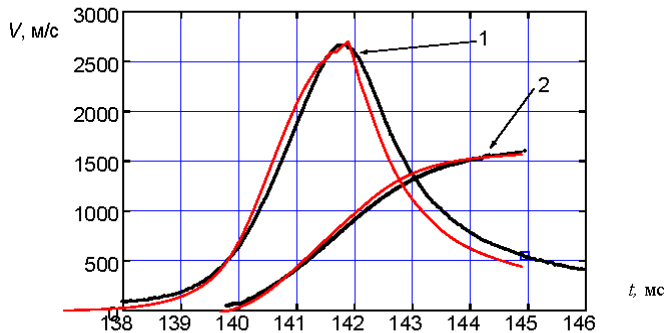


Рис. 3. Опыт 1, 1– кривые давления, 2– кривые скорости

Эксперименты с введением электрической энергии. В опыте 2 было введено 3,15 кДж в порох. Было решено в расчете разделить пороховой заряд на 2 части (более массивная – 81% от всей массы, которая и воспламеняется плазмотроном, и менее массивная – 19%, которая ближе к снаряду). Расчет показал, что скорость горения

топлива возросла на 4% по сравнению с классикой. Эффектом теплового расширения камеры и ствола пренебрегаем. Чтобы учесть введенную энергию в программе, посчитаем силу пороха по формуле (2), где  $k=0,5$  – коэффициент поправки, и получим 912900 Дж/кг

$$f_1 = f_0 + \frac{k \cdot Q \cdot (\gamma - 1)}{\omega} \tag{2}$$

В итоге были получены расчетные значения скорости снаряда (точность расчета составляет 1%) и давления (точность расчета составляет 0,6%), а кривые аналогичные опыту 1. В итоге был получен ожидаемый результат – незначительный рост давления и скорости.

В опыте 3 было введено больше энергии в порох – 6,9 кДж. Аналогично опыту 2 была посчитана сила заряда 916300 Дж/кг. Расчет показал, что скорость горения топлива возросла уже на 11% по сравнению с классикой.

В итоге были получены точные значения скорости снаряда (точность расчета составляет 0,92%) и давления (точность расчета составляет 0,72%). Ожидалось, что давление и скорость возрастут. Напротив, скорость упала на 62 м/с, а давление уменьшилось на 327 бар.

Рассмотрим эксперименты со снарядом большего калибра. Здесь изменилась обтюрация, поэтому было посчитано новое давление форсирования (645 бар). Температурные коэффициенты и трение остались без изменения.

В опыте 4 было введено 3,34 кДж. Сила массивной части заряда 913000 Дж/кг. По сравнению с классикой, скорость горения заряда возросла – 4%. Точность расчета скорости снаряда равна 0,3%, а точность вычисления давления равна 3%.

В опыте 5 ввели 7,43 кДж. Сила заряда 916800 кДж/кг. Скорость горения снаряда выросла на 12%. Точность расчета скорости снаряда равна 1%, а точность вычисления давления равна 4%.

После 5 опытов было нарисована зависимость скорости горения заряда от введенной энергии. Таким образом, значение скорости для следующего опыта было найдено экстраполяцией данной кривой на рис. 4.

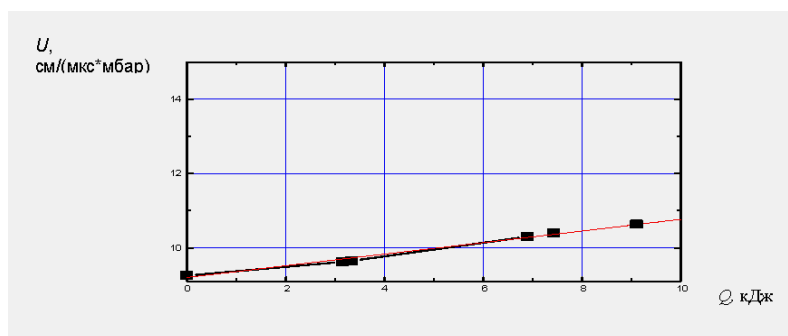


Рис. 4. Зависимость скорости горения от введенной энергии

В опыте 6 ввели 9,1 кДж. Сила заряда 918300 кДж/кг. Скорость горения снаряда выросла на 15%. Точность расчета скорости снаряда равна 1,5%, а точность вычисления давления 3%.

В ходе анализа серии результатов аналогичных опытов был сделан вывод. В опытах 3 и 6, где было введено больше энергии, было отмечено следующее. Избы-

ток энергии сдвинул снаряд в канале ствола до начала горения заряда, тем самым увеличив «заснарядное» пространство на  $180 \text{ см}^3$  (опыт 3) и на  $79 \text{ см}^3$  (опыт 6), что привело к падению выходных параметров. Зависимость объема «заснарядного» пространства от энергии рис. 5.

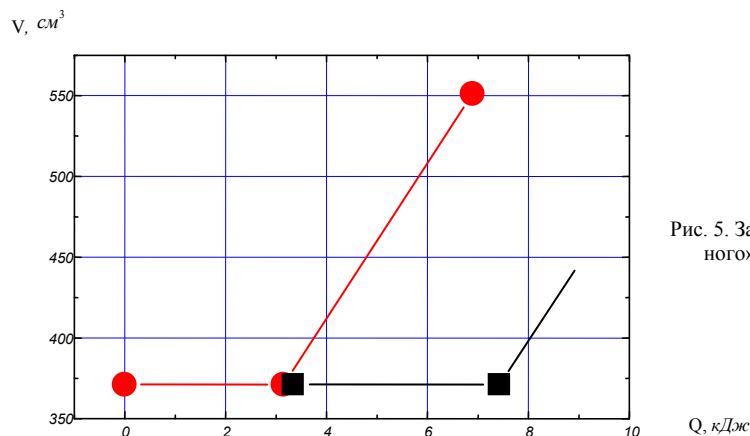


Рис. 5. Зависимости объема «заснарядного» пространства от энергии:  
круг – d1, квадрат – d2

Полученные результаты в дальнейшем способствуют упрощению расчёта экспериментов, у которых условия заряжания схожи с данными экспериментами. А именно, будут использованы температурные коэффициенты горения пороха, трение снаряда о стенки канала ствола, давление форсирования и скорость горения заряда.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Программа газодинамического расчета внутриваллистических процессов в ствольных системах. № 2000611040 / В.З. Касимов, Ю.П. Хоменко, А.Н. Тихонов, А.А. Шехобалов // Программы для ЭВМ, базы данных и топологии интегральных микросхем. 2001. № 1. С. 42–43.
2. Бурлов В.В. [и др.]. *Баллистика* ствольных систем / под ред. Л.Н. Лысенко и А.М. Липанова. М.: Машиностроение, 2006. 461 с.

## ДВИЖЕНИЕ ИЗОЛИРОВАННОГО ВИХРЯ В ПРЯМОУГОЛЬНИКЕ

**А.Е. Сидорова**

*Решается задача о свободном движении точечного вихря в односвязной области. Приводится аналитическое решение для прямоугольника, полученное с помощью его конформного отображения на единичный круг.*

## MOVEMENT OF VORTEX IN A RECTANGLE

**A.E. Sidorova**

*The problem about free movement of a dot vortex in one-coherent area dares. The analytical decision for a rectangle, received with the help conformal mapping to a circle, which radius is equal to unit, is resulted.*

В обзоре [1] рассматривается движение системы вихрей с точки зрения гамильтоновой динамики. Решение таких задач важно для изучения проблемы адвекции, когда определяются траектории частиц жидкости при заданном законе движения N