

УДК: 519.633.2

**АНАЛИЗ ВНУТРЕННЕЙ БАЛЛИСТИКИ МЕТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ
НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА
МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**ANALYSIS OF THE INTERNAL BALLISTICS OF A THROWING PLANT BASED
ON ELECTROHYDRAULIC EFFECT BY THE FINITE ELEMENT METHOD**

К.С. Кулаков, чл.-корр. РАН А.И. Михайлин, И.К. Бородин

АО «НПО Спецматериалов»

M.V. Silnikov, K.S. Kulakov, A.I. Mikhaylin, I.K. Borodin

В статье представлены результаты численного моделирования метательной установки на основе электрогидравлического эффекта. Математическое описание базируется на задании начального условия в виде импульса давления в области электрического разряда и граничных условий в виде акустического импеданса. Основным решаемым уравнением является уравнение Вестервелта. Произведено сравнение кинематических показателей снаряда, полученных в результате натурных экспериментов с результатами численного расчёта.

Ключевые слова: электрогидравлический эффект, волна давления, снаряд.

The article presents the results of numerical modeling of a throwing device based on the electrohydraulic effect. The mathematical description is based on setting the initial condition in the form of a pressure pulse in the electric discharge region and boundary conditions in the form of acoustic impedance. The main equation to be solved is the Westervelt equation. A comparison is made of the kinematic parameters of the projectile, obtained as a result of field experiments with a numerical calculation.

Keywords: electrohydraulic effect, pressure wave, projectile.

Одним из возможных приложений электрогидравлического эффекта является создание метательного оружия нового типа. Его ключевым отличием является воздействие на снаряд волной давления, а не продуктами горения взрывчатых веществ. Это даёт ряд преимуществ, связанных с отсутствием необходимости получения разрешения на применение взрывчатых веществ и изделий на их основе [1].

Таким образом, разработка метательной установки на основе электрогидравлического эффекта актуальна для дальнейшего создания систем активной защиты объектов особой важности, что непосредственно связано с повышением антитеррористической устойчивости последних.

Целью данной работы является построение численной модели метательной установки и её верификация на основе аналитических расчётов и натурных экспериментов.

В основе работы предлагаемого орудия лежит электрогидравлический эффект, связанный с локальным повышением давления, вследствие электрического разряда в жидкости [2–3]. В силу малой сжимаемости вода передает давление равномерно по всему объёму с малой степенью демпфирования. Таким образом, необходимо оценить воздействие распространяющейся волны давления на снаряд во время его движения внутри канала ствола, то есть решить совместно уравнение движения и уравнение нелинейной акустики [4].

Упрощенная схема экспериментальной метательной установки представлена на рис. 1.

Способность материала отражать волну давления задаётся через акустический импеданс [5] Z по формуле.

$$Z = \rho \cdot v, \quad (1)$$

где ρ , кг/м³ — плотность среды, v , м/с — скорость звука в среде.

Сила воздействия волны давления $F(t)$ рассчитывается через поверхностный интеграл от давления $P(t)$ по формуле.

$$F(t) = \iint P(t) \cdot ds.$$

Так как метательная установка может использоваться в разных средах, необходимо учесть силу сопротивления среды в зависимости от времени $F_r(t)$.

$$F_r(t) = C \cdot \frac{\rho \cdot v(t)^2}{2} \cdot S,$$

где C — безразмерный коэффициент сопротивления; S , м² — площадь лобовой поверхности снаряда; ρ , кг/м³ — плотность среды; $v(t)$, м/с — мгновенная скорость снаряда.

Таким образом, уравнение движение задаётся выражением.

$$M \cdot \frac{dv(t)}{dt} = F(t) - F_r(t),$$

где M , кг — масса снаряда.

Начальные условия распространения волны давления опираются на уравнения [2].

$$R_0 = \left[\frac{(\gamma - 1)}{\pi \rho} \cdot \tau^2 \cdot \frac{E}{l} \right]^{1/4};$$

$$P = \rho \cdot \frac{R^2}{\tau^2},$$

где E , Дж — вводимая энергия в канал разряда; R_0 , м — конечный радиус канала разряда; l , м — длина плазменного канала; P , Па — амплитуда давления; τ , с — длительность ввода энергии в плазменный канал; γ — эффективный показатель адиабаты; ρ , кг/м³ — плотность среды.

На рис. 2 представлен снаряд, на основе которого произведена верификация его кинематических характеристик в канале ствола длиной 270 мм и вводимой энергией 7,5 кДж.

На рис. 3 представлена верификационная модель снаряда в осесимметричной постановке.

На рис. 4 представлен график силы воздействия волны давления на основание снаряда от времени в виде затухающего колебания. Колебания вызваны отражениями волны давления от стенок канала ствола и основания снаряда. Затухание связано с преобразованием акустической энергии в тепловую и со способностью снаряда пропускать волну давления сквозь себя. Таким образом, используя формулу (1), можно сделать вывод о том, что чем выше плотность материала снаряда, тем больше сила воздействия волны давления на него [6–11].

На рис. 5 показаны кинематические характеристики снаряда. Скорость снаряда к момен-

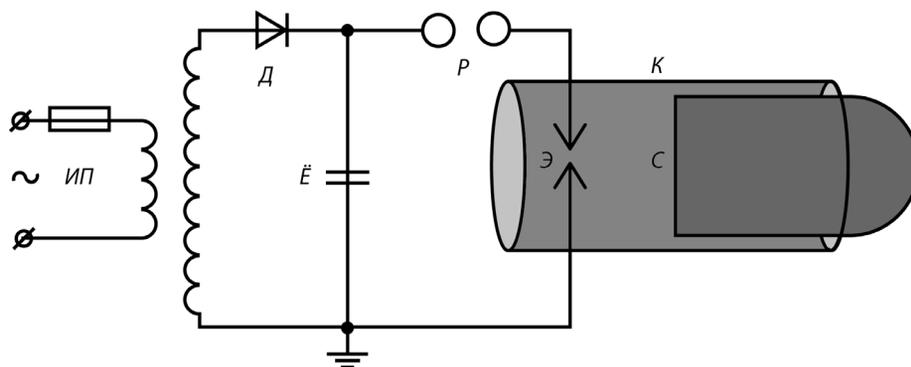


Рис. 1. Схема экспериментальной летательной установки: где ИП — источник питания, Д — высоковольтный диод, Ё — накопительный конденсатор, Р — разрядник, Э — электроды, К — канал пушки, С — метаемый снаряд

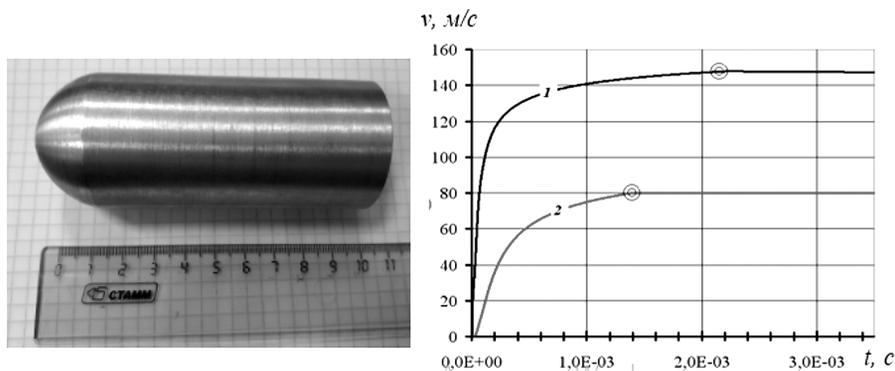


Рис. 2. Алюминиевый снаряд массой 300 г, калибра 40 мм и его скорость, полученная из аналитических расчётов без учета пустот в канале ствола (1) и с их учётом (2)

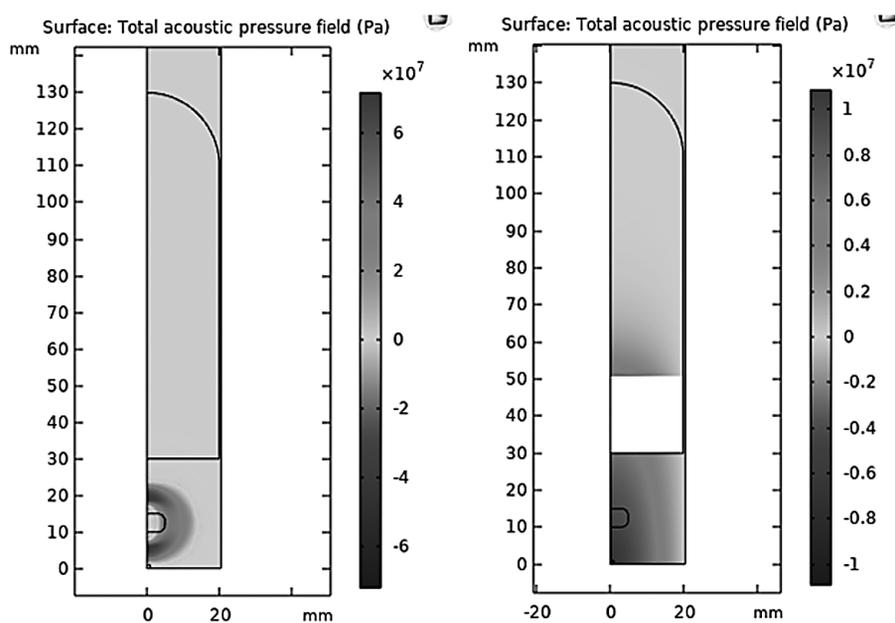


Рис. 3. Положение снаряда в момент электрического разряда (слева) и через 300 мкс воздействия распространяющейся волны давления (справа)

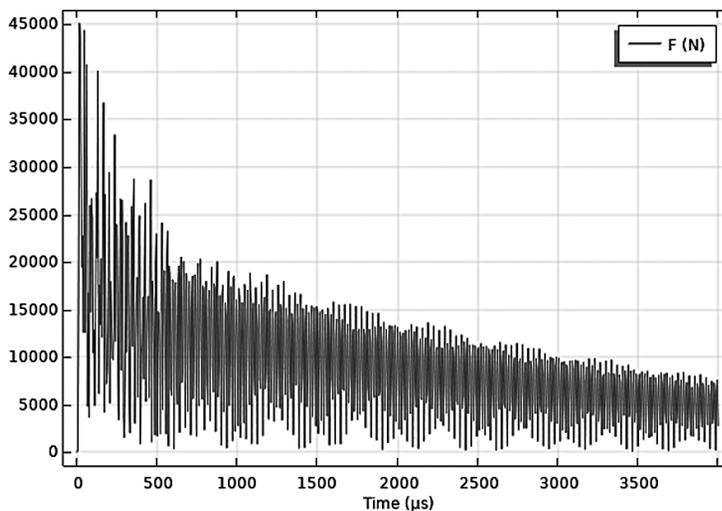


Рис. 4. График мгновенной силы воздействия волны давления на основание снаряда

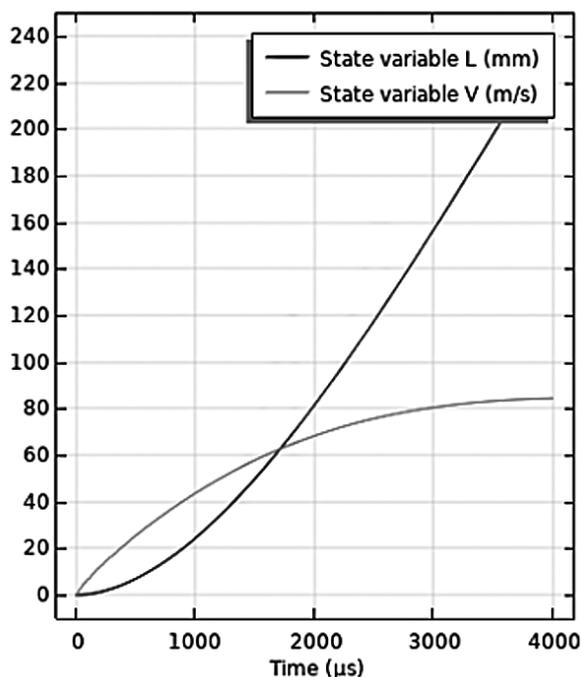


Рис. 5. График зависимости скорости и перемещения снаряда от времени

ту вылета из канала ствола составляет примерно 85 м/с. Форма графика скорости в результате численного эксперимента схожа с данными, полученными исходя из аналитических соображений.

Выводы

На основе теоретических расчётов и решения задачи магнитной гидродинамики (МГД) получено начальное условие распространения волны давления.

Полученные динамические и кинематические характеристики снаряда схожи с данными эксперимента и аналитического расчёта.

Таким образом, полученная численная модель обладает предсказательной силой, которая необходима при оптимизации различных параметров метательной установки для различных областей применения.

Литература

1. Об оружии: «Федеральный закон от 13.12.1996 № 150 — ФЗ» (последняя редакция).

2. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. — М. Наука. 1971. 155 с.

3. Юткин Л.А. Электрогидравлическое дробление. — Л. ЛДНТП. Ч. 1. 1959. 40 с.

4. Рубина Л.И., Ульянов О.Н. О решении некоторых уравнений нелинейной акустики // Акустический журнал. Том 61. 2015. № 5. С. 576–582.

5. Юлдашев П.В. Нелинейно-дифракционные явления при распространении разрывных акустических волн в поглощающих и случайно-неоднородных средах в присутствии импедансных границ. ИСТИНА МГУ. 2014.

6. Medvedev S.P., Khomik S.V., Ivantsov A.N., Mikhailin A.I., Silnikov M.V. Simulation of shock wave produced by detonation of high-explosive charge in a conical shock tube // Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1686 (1). 012084

7. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. — Киев: Наукова думка. 1979. 208 с.

8. Сильников М.В., Михайлин А.И., Лазоркин В.И., Кулаков К.С. Перспективы использования плазмодинамических метательных устройств в системах обеспечения безопасности охраняемых объектов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2018. № 2 (102). С. 22–28.

9. Сильников М.В., Михайлин А.И., Кулаков К.С., Помазов В.С. Экспериментальное исследование характерных особенностей процесса преобразования энергии при электроразрядном способе метания снарядов заданной массы // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 1–2 (115–116). С. 104–108.

10. Silnikov M.V., Krivosheev S.I., Kulakov K.S., Kulakov S.L. Initiation of a discharge channel in water by means of electrical explosion of aluminum foil // Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika). 2013. Volume 60. Issue 13. P. 978–981.

11. Сильников М.В., Кулаков К.С., Кулаков С.Л., Михайлин А.И. Использование электрического разряда в воде для генерации ударных волн и импульсов давления // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2013. № 1–2 (55–56). С. 3–13.