

ПРИСОЕДИНЕННЫЙ ЗАРЯД: РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Б. С. Ермолаев, А. А. Сулимов, В. Е. Храповский,
А. В. Романьков, М. К. Сукоян**

ИХФ РАН
г. Москва, Россия

Идея присоединенного заряда впервые была высказана, по-видимому, в Германии Лангвайлером непосредственно перед началом Второй мировой войны, им же были предприняты первые попытки получить экспериментальное подтверждение. Суть идеи проста: если пороховой заряд (или часть его) присоединить к снаряду и заставить гореть в процессе движения снаряда по стволу, то можно получить прирост дульной скорости за счет ряда факторов, прежде всего за счет реактивной тяги и увеличения давления на дно снаряда благодаря перераспределению давления в заснарядном пространстве.

Работы по проверке идеи проводились в ряде стран: в России, Франции, Китае, но особенно интенсивно в 1970–80-х гг. в США. Однако до сих пор работы не вышли из фазы предварительных исследований. В работе дан критический анализ публикаций, направленный на то, чтобы прояснить ситуацию, сложившуюся с присоединенным зарядом, а также приведены наши собственные экспериментальные данные.

Американские работы проводились по нескольким национальным программам и детально представлены в обзоре Байера и Мэя [1]. Изучены присоединенные заряды трех конфигураций: заряды, изготовленные в виде связки пороховых трубок, газопроницаемые блоки из гранул энергетического материала и монолитные заряды торцевого горения из быстрогорящего топлива. В целом результаты многочисленных опытов оказались мало обнадеживающими. Заряды в виде связки пороховых трубок, присоединенных к метаемому телу, давали стабильные диаграммы давления, однако

прирост дульной скорости оказался невысоким из-за недостаточной скорости горения. Пористые блоки, изготавливаемые прессованием из гранул или волокон сферического пороха, смесей пороха с перхлоратом аммония или из пористой нитроцеллюлозы, давали при горении сильные волны давления и отсутствие воспроизводимости характеристик выстрела; прирост дульной скорости также оказался невысоким. Повышенная взрывоопасность монолитных блочных зарядов, изготовленных из быстрогорящего смесового топлива на основе гидрида бора, оказалась главной причиной прекращения испытаний на фоне неудачи большей части опытов и небольшого прироста скорости метания в опытах, признанных успешными.

Напротив, теоретическая часть исследований оказалась плодотворной. Разработана модель горения быстрогорящего топлива, в основу которой положено предположение, что под действием сдвиговых напряжений в процессе горения происходит рост пористости (процесс, названный деконсолидацией), с последующим развитием конвективного горения и образованием облака диспергированных горящих частиц-конгломератов. Модель качественно воспроизводит все стадии горения, наблюдаемые в манометрической бомбе, включая развитие пульсаций давления. Проведены расчеты выстрела применительно к 40-миллиметровой длинноствольной модельной пушке с использованием модифицированного внутривальнострелкового кода (кода NOVA).

Расчеты проводились для двух вариантов:

- (1) заряд состоит из штатного пороха и скомпонован по классической схеме;
- (2) заряд скомпонован по комбинированной схеме, когда часть заряда — обычный пороховой ускоритель из гранулированного пороха, размещенный в камере, а другую часть составляет присоединенный заряд, изготовленный в виде блока торцевого горения из быстрогорящего топлива.

Расчеты показали, что схема с присоединенным зарядом обеспечивает существенно более высокие характеристики выстрела по сравнению с классической схемой. Так, на системах высокоскоростного метания расчетный прирост дульной скорости достиг 25% (при базовом уровне скорости ~ 2500 м/с), влияние массовой доли присоединенного заряда демонстрирует широкий максимум, когда рас-

четная дульная скорость слабо изменяется в диапазоне массовых долей от 50% до 100%.

Похожий путь пройден российскими исследователями. С помощью численного моделирования получены подтверждения преимущества схемы с присоединенным зарядом для систем разного калибра [2, 3]. Эксперименты проводились на монолитных зарядах из смесового быстрогорящего топлива НТБС, на блоках из пористой нитроцеллюлозы и на высокоплотных зарядах конвективного горения (ВЗКГ), изготовленных прессованием из зерен пироксилинового пороха, капсулированных полимерной пленкой, а также на пластизольном быстрогорящем топливе, помещаемом в пластиковый контейнер [2–4]. Обнаруженный прирост дульной скорости внушает осторожный оптимизм, хотя поиски должны быть продолжены. Сложившуюся ситуацию проиллюстрируем на примере наших исследований.

Монолитный заряд торцевого горения из быстрогорящего топлива НТБС. Смесовое топливо марки НТБС изготавливалось свободным литьем и имело в исходном состоянии нулевую газопроницаемость при технологической пористости 2%–3%. Работа проводилась в начале 1990-х гг. при участии сотрудников НПО «Союз». Для исследования выбраны составы с хорошо воспроизводимыми характеристиками горения, которые содержали ~ 50% (вес.) дисперсной фазы из быстрогорящего взрывчатого вещества (ВВ) класса бензотрифуроксанов при среднем размере частиц около 0,2 мм, матрицу из пластифицированной сферической нитроцеллюлозы и некоторые присадки. Топливо обладало высокой калорийностью (расчетная сила пороха 1,27 МДж/кг).

Закономерности горения исследовались при давлениях до 150 МПа в устройстве с одновременной фотографической и пьезометрической регистрацией. Цилиндрический заряд диаметром 10 мм и длиной 100–150 мм помещался в канал плексигласовой трубки, которая плотно вставлялась в стальную щелевую оболочку с продольным узким окном. Оболочка соединялась с дополнительной камерой, в которой размещался воспламенитель, создающий заданное начальное давление, и куда оттекали продукты горения заряда. Датчики давления располагались по длине оболочки и в камере.

Опыты показали, что если давление превышало 12–15 МПа, то горение топлива переходило на конвективный режим и распространялось с характерным неровным фронтом свечения на всю длину заряда. В процессе горения давление в камере нарастало линейно, а датчик на стенке трубки регистрировал пульсации нарастающей амплитуды, вызванные волновой неустойчивостью потока продуктов горения, оттекающих в камеру. Скорость конвективного горения, если не учитывать короткие участки ускорения/замедления на начальной и заключительных фазах распространения волны горения и сгладить неровности фронта, слабо возрастала по мере увеличения давления в диапазоне 30–50 м/с с показателем степени по давлению на уровне 0,2. Частицы топлива, диспергируемые и оттекающие от фронта пламени вместе с газообразными продуктами горения, полностью сгорали за время около 2 мс. Установлено, что конвективное горение связано с появлением газопроницаемости в сжатом и деформированном топливе, хотя детали механизма остались неясными. Механические испытания показали, что образцы обладали невысокой адгезией связующего к кристаллам ВВ. В условиях деформирования наблюдалось отслоение связующего, появление микродефектов и поверхностных трещин в кристаллах, приводящих к возникновению газопроницаемости.

Опыты с присоединенным зарядом из НТБС проводили в 23-миллиметровой лабораторной гладкоствольной установке с системой регистрации дульной скорости методом рам-мишеней и набором пьезоэлектрических датчиков давления, установленных в камере и по длине ствола. Комбинированный пороховой заряд состоял из двух блоков. Камерный заряд изготавливали прессованием из зерен пироксилинового пороха ВТМ, ингибированных по наружной поверхности 1,5% поливинилацетата (ПВА). Присоединенный заряд из НТБС покрывался по боковой поверхности парафином и приклеивался к метаемому телу (цилиндр из дуралюмина весом 20 г).

Проведено две серии опытов. В первой серии вес камерного заряда 30 г сохранялся постоянным, а вес присоединенного заряда изменяли от 10 до 35 г. Результаты опыта накладывались на базовую кривую, которая была получена в предварительных опытах с блочным зарядом разного веса, полностью размещенном в камере. Как видно из рис. 1 (линии 1 и 2), имеет место систематическое превышение дульной скорости над базовой кривой при одинаковом

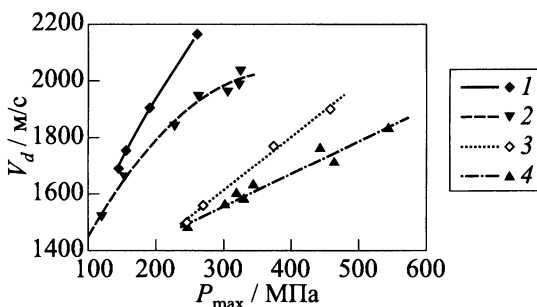


Рис. 1 Зависимость дульной скорости от максимального давления при выстреле в 23-миллиметровой лабораторной установке; снаряд массой 20 г: 1 — комбинированная схема с присоединенным зарядом из НТБС, 2 — классическая схема; снаряд массой 35 г: 3 — комбинированная схема с присоединенным зарядом из ВЗКГ, 4 — классическая схема

давлении; в опыте с присоединенным зарядом массой 35 г превышение составило 250 м/с при дульной скорости 2150 м/с.

Во второй серии опытов суммарная масса двух полузарядов сохранялась постоянной (65 г). Вес присоединенного заряда увеличивали от 0 до 40 г при соответствующем уменьшении веса камерного заряда. В этих опытах дульная скорость оставалась примерно постоянной на уровне 2150 м/с, тогда как максимальное давление снижалась по мере увеличения массы присоединенного заряда от 400 до 220 МПа. Анализ записей давления показал, что на определенной стадии выстрела давление на дно снаряда становится выше, чем давление в камере. В целом, эти результаты свидетельствуют о позитивном эффекте, который может быть достигнут при использовании НТБС в качестве присоединенного заряда. Аналогичные выводы сделаны в работах НИИПММ [3].

Пористые блоки (ВЗКГ) из ингибированных зерен пироксилинового пороха. Исследовались блочные заряды, изготавливаемые пресованием из зерен одноканального пироксилинового пороха ВТМ, покрытых по наружной поверхности 1%–2% ПВА. Закономерности горения в зависимости от процента покрытия и плотности заряда в диапазоне 1,3–1,43 г/см³ изучались при давлениях до 200 МПа в обычной манометрической бомбе. Опыты с присоединенным заря-

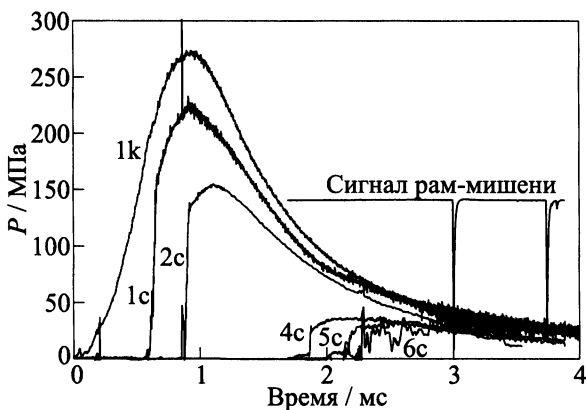


Рис. 2 Пример регистрации давления при выстреле в 23-миллиметровой лабораторной установке с присоединенным зарядом из ВЗКГ: сигналы шести датчиков давления, установленных в камере (1к) и по длине ствола (1с, 2с, 4с, 5с, 6с), и сигнал рам-мишени для определения дульной скорости

дом проводили в той же 23-миллиметровой гладкоствольной установке по комбинированной схеме со снарядом массой 35 г. Камерный заряд массой 50 г состоял из зерен 7-канального пороха 4/7. Присоединенный заряд в виде блока приклеивали к заднему торцу метаемого тела, его массу варьировали от 20 до 50 г. Пример регистрации дан на рис. 2. Результаты опытов сравнивали с базовой кривой, полученной с зарядами классической схемы из пороха 4/7 разной массы. Как видно из рис. 1 (линии 3 и 4), эффект оказался примерно таким же, как и на топливе НТБС.

В целом, проведенные опыты обнадеживают, хотя, чтобы выйти на уровень теоретических предсказаний, потребуются новые исследования. Следующие трудности можно назвать ключевыми в данной проблеме. Порох, выбранный для присоединенного заряда, должен гореть с очень высокой, воспроизводимой и (желательно) прогрессивно возрастающей скоростью при экстремальных нагрузках, необычных для классического порохового заряда. Горение должно начаться вблизи максимума диаграммы давления (при 300–500 МПа) и продолжаться во время движения вместе со снарядом

при спаде давления. Это фактически вводит во внутреннюю баллистику концепцию «управляемого горения» и разительно отличается от привычной классической схемы, в которой наилучшие результаты достигаются, как раз когда пороховой заряд полностью охвачен горением еще на начальной стадии выстрела, при низких давлениях. Кроме того, до сих пор нет простой и удобной методики тестирования пороха для присоединенного заряда. Фактически инструментом исследований является теоретическая обработка результатов выстрела в модельных ствольных устройствах.

Работа выполнена при поддержке программы Отделения химии и наук о материалах РАН № 4 «Разработка научных основ получения нового поколения высокоэнергетических материалов».

Литература

1. Baer, P. G., and I. W. May. 1988. Traveling-charge effect // *Gun propulsion technology*. Progress in astronautics and aeronautics ser. Washington, DC: AIAA Inc. 109:499–536.
2. Хоменко Ю. П., Ищенко А. Н., Касимов В. З. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 256 с.
3. Барышев М. С., Бураков В. А., Ищенко А. Н. и др. Экспериментальные и теоретические исследования возможностей применения присоединенного метательного заряда из топлив различного типа в условиях установок различного калибра // Доклады 5-й научной конференции. — Саров, 2007.
4. Сулимов А. А., Ермолаев Б. С., Храповский В. Е., Сукоян М. К. Конвективное горение литевых смесевых композиций // Материалы 5-й Всесоюзной конференции «Энергетические конденсированные системы». — Черногловка, 2010. С. 62–63.