Особенности конструкций взрывательных устройств для боеприпасов ствольной артиллерии.

Часть 1 – Силы, действующие на взрывательные устройства данного типа боеприпаса

08, август 2012

DOI: 10.7463/0812.0452053

Козлов В. И.

УДК 623.451.741 (075.8)

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

vkozlov38@gmail.com

Введение

Статья посвящена весьма актуальному вопросу – особенностям конструкции взрывательных устройств (ВУ) к боеприпасам (БП) ствольной артиллерии.

Изложенные в ней материалы практически не рассмотрены в литературе специального назначения, что и определяет ведущее место статьи на фоне предшествующих работ.

Характеристики ВУ, касающиеся взаимосвязи в системе «Взрыватель – боеприпас – цель – особенности динамики БП», носят по рекомендации автора название «визитных карточек», которые определяют, в каких БП используются данные ВУ, для каких целей предназначены. Следует отметить, что три – четыре подобные «визитные карточки» никогда не повторяются и, следовательно, однозначно определяет принадлежность ВУ к тому или иному БП. В этом заключается научная новизна работы и ее основная цель.

Статья содержит 3 раздела.

В первом разделе приведены основные понятия и характеристики ВУ в соответствии ГОСТ В – 20143 – 82. Взрыватели. Термины и определения.

Во втором разделе рассмотрены силы, действующие на ВУ к БП ствольной артиллерии. Учитывая особенности воздействия этих сил на отдельных этапах эксплуатации ВУ, они проанализированы отдельно для каждого этапа: служебного обращения, движения БП в канале ствола артиллерийского орудия и на траектории, а также при встрече БП с преградой.

В третьем разделе проанализированы особенности конструкции ВУ к БП ствольной артиллерии. В этом разделе автор на основе введенного им термина «визитные карточки» анализирует конструкции типовых ВУ этих БП и показывает их принципиальное отличие от конструкции ВУ к другим типам БП.

1. Основные понятия и характеристики ВУ

Основные параметры и характеристики ВУ определяются материалами государственного стандарта. Наиболее важными среди них являются.

- Высота безопасного падения взрывателя (H_B) – максимальная высота, при падении БП с которой не нарушается безопасность взрывателя.
- Дальность взведения взрывателя (ДВ) – расстояние от орудия, пусковой установки в момент окончания взведения взрывателя.
- Время срабатывания контактного взрывателя – интервал времени от момента соприкосновения БП с целью или преградой до момента срабатывания взрывателя.
- Энергия накола ударника взрывателя – кинетическая энергия ударника в момент соприкосновения жала с капсюлем.
- Область срабатывания неконтактного взрывателя – часть пространства вблизи цели, в котором происходит срабатывание неконтактного взрывателя.
- Эффективность неконтактного взрывателя – свойство неконтактного взрывателя срабатывать в области поражения БП.
- Чувствительность контактного взрывателя – свойство срабатывать при определенных условиях встречи БП с целью или преградой.
- Чувствительность неконтактного взрывателя – минимальная мощность сигнала на входе приемника, обеспечивающая срабатывание взрывателя.
- Помехоустойчивость взрывателя – свойство обеспечить в составе БП эффективность при боевом применении в условиях искусственных и естественных помех.
- Избирательность контактного взрывателя – свойство срабатывать по целевым преградам и не срабатывать по нецелевым преградам.
- Снятие ступени предохранения – взведение устройств, составляющих ступень предохранения.
- Преждевременное срабатывание – срабатывание взрывателя в служебном обращении, при выстреле или на траектории вследствие нарушения

условий эксплуатации или неправильного функционирования его механизмов и устройств.

- Отказ в срабатывании – несрабатывание контактного взрывателя при встрече с преградой, неконтактного – у цели, а дистанционного – в заданной точке траектории.

К ВУ предъявляются тактико-технические и производственно-экономические требования.

К тактико-техническим требованиям относятся.

а) Безопасность в производстве и в служебном обращении, под которой понимается отсутствие преждевременных срабатываний взрывателей как в условиях производства, так и в обращении, т.е. при хранении, транспортировке, монтаже и при случайных падениях. Основные мероприятия, обеспечивающие выполнение этого требования, связаны с применением стойких к перегрузкам служебного обращения капсулей и детонаторов и возможно минимальным количеством ВВ в их составе, с использованием предохранительных механизмов (ПМ) и механизмов изоляции капсулей (МИК), раздельным хранением взрывателей и БП.

б) Безопасность при выстреле, под которой понимается отсутствие преждевременного срабатывания взрывателя в процессе самого выстрела (в момент выстрела, при движении в канале ствола или по направляющей) и на активном участке траектории в пределах дальности, представляющей опасность для орудийного расчета в случае разрыва БП. Основные мероприятия, обеспечивающие безопасность взрывателя при выстреле, связаны с применением ПМ, механизмов дальнего взведения (МДВ), блокирующих механизмов (противоклевковые механизмы) и МИК.

в) Безотказность действия, зависит от следующих мероприятий: надёжное взведение ПМ, переводящих взрыватель из служебного положения в боевое; разработка достаточно чувствительных ударных механизмов (с учётом характера преграды), применение бокобойных устройств; использование дублирующих механизмов и дублирующих взрывателей; обеспечение достаточной мощности детонатора.

г) Обеспечение наибольшей эффективности действия. Взрыватель должен срабатывать в такой момент, в который будет реализована наибольшая эффективность его действия. Очевидно, что все меры обеспечения безотказности действия взрывателя являются одновременно и мерами повышения его эффективности. Однако принимаются и чисто конструктивные меры, способствующие повышению эффективности действия взрывателя. К ним можно отнести: обеспечение повышенной точности действия механизмов, определяющих момент срабатывания взрывателя; введение во взрыватель

механизмов и устройств, фиксирующих момент наиболее выгодного расположения БП относительно цели (механизмы авторегулируемого замедления).

д) Оптимальные габариты, обтекаемая форма и достаточная механическая прочность. Понятие не требует разъяснений. Необходимо лишь обратить внимание на исключение возможности разрушения или вывинчивание взрывателя, проникание грунтов или воды к пороховым замедлителям до момента срабатывания ОЦ.

е) Простота и удобство эксплуатации взрывателя. Оптимальная конструкция современных неконтактных взрывателей должна предусматривать возможность замены вышедших из строя узлов, т.е. иметь блочную структуру. Кроме того, все взрыватели должны переустанавливаться без снятия с БП.

ж) Неизменяемость боевых свойств при длительном хранении. Срок хранения современных ВУ должен быть не менее 10 лет. Основными мероприятиями, обуславливающими стойкость взрывателя при длительном хранении, являются:

- обеспечение герметичности ВУ за счёт смазывания резьбовых соединений суриковой замазкой, щелочным лаком или другими составами;
- применение антикоррозионных покрытий металлических деталей взрывателя, использование коррозионно-стойких материалов;
- хранение взрывателя в герметичной укупорке до момента соединения с БП.

К производственно-экономическим требованиям ВУ относятся:

- простота конструкции;
- дешевизна и недефицитность материала;
- экономичность производства, возможность использования прогрессивных технологий;
- простота контроля и изготовления;
- применение унифицированных стандартных деталей, узлов и блоков;
- ориентация на отечественные материалы.

Важнейшим элементом структурной схемы ВУ является огневая цепь (ОЦ), схема которой приведена на рис. 1.

Рис. 1. Огневая цепь ВУ

Обычно создание начального импульса в контактных и дистанционных ВУ происходит под действием механических сил. Однако есть ВУ, в которых вырабатывается начальный электрический импульс. Эти начальные сигналы усиливаются и используются для инициирования детонации, которая в свою очередь вызывает наиболее мощный взрыв. Усиление и передача импульса детонации продолжается до тех пор, пока детонация последнего элемента ОЦ не вызовет подрыв боевого заряда.

Последним элементом ОЦ является детонатор (рис. 1), сообщающий взрывной импульс заряду БП. Однако объём детонатора ограничивается габаритами ВУ. В связи с этим иногда необходимый импульс детонации получают от дополнительных детонаторов, размещенных в гнездах или каналах заряда БП. В этом случае детонатор ВУ называют основным, а детонаторы, расположенные в боевом заряде - дополнительными.

В качестве ВВ для детонатора обычно применяют БВВ более мощные, чем тротил, входящий в состав боевого заряда БП.

Пусковым элементом детонатора является капсуль-детонатор (КД), в состав которого помимо БВВ входят также более чувствительные ИВВ. Комбинированные капсули дают более мощный взрывной импульс по сравнению с капсулями, содержащими только ИВВ, скорость детонации которых ниже, чем у БВВ. Это позволяет свести к минимуму объём применяемых в капсулях ИВВ и, следовательно, размеры КД. Уменьшение размеров КД повышает безопасность взрывателей. Чем тоньше слой ВВ, тем меньше напряжения в нём при нагрузках, тем меньше вероятность самопроизвольного взрыва. Поэтому недопустимо "упрощение" ОЦ взрывателя путём отказа от применения детонатора и использования взамен него КД больших габаритов, дающих более мощный импульс.

КД бывают двух разновидностей - лучевые и накольные, отличающиеся в основном составом ВВ первичного слоя. В лучевых КД — это ТНРС, а в накольных - специальный ударный состав.

В электрических ВУ применяются мостиковые и искровые электродетонаторы (ЭД). Время срабатывания первых составляет 10-25 мкс, а вторых - 2-2,5 мкс.

Для сообщения начального импульса КД и ЭД используются соответственно капсули-воспламенители (КВ) и электровоспламенители (ЭВ). Они состоят из ИВВ с добавлением пиротехнических составов для усиления импульса. БВВ они не содержат. КВ и ЭВ более чувствительны к инерционным перегрузкам, чем КД и ЭД, однако заметного импульса детонации не создают.

Для устранения преждевременных разрывов БП при самопроизвольном срабатывании КВ (ЭВ) в некоторых ВУ их изолируют от КД (ЭД). Такие взрыватели называются взрывателями полупредохранительного типа.

Вполне естественно, что в результате дальнейшей отработки ВУ появились их образцы с изоляцией КД от детонатора, получившие название взрывателей предохранительного типа. В этом случае приспособление для изоляции КД гарантирует от преждевременного разрыва и в случае срабатывания КВ, т.е. отпадает необходимость в их изоляции.

Создание высокостойких КВ и ЭВ позволило в некоторых случаях отрабатывать и применять взрыватели непредохранительного типа, в которых нет изоляции капсулей.

Особенно широкое распространение получили взрыватели непредохранительного типа в БП, для которых характерны сравнительно малые перегрузки /ракетные снаряды (РС) и авиабомбы/, а также в малогабаритных БП.

В контактных ВУ часто имеется установочное устройство и замедлитель, обеспечивающее срабатывание ВУ при ударе в преграду с замедлением или без него.

В состав замедлителя (и усилителя) входят только метательные взрывчатые вещества (МВВ).

Такова общая схема ОЦ взрывателя. Характерным для неё является рост чувствительности ВВ и уменьшение могущества действия его от элемента к элементу.

В ВУ встречаются различные варианты схемы ОЦ. Основными элементами её являются КВ (ЭВ), КД и детонатор (Д). Из них только КД является обязательным. Остальные элементы могут и отсутствовать.

Разновидности ОЦ. В целом ряде механических взрывателей отсутствует КВ, а жало ударника накалывает непосредственно КД. В этом случае уменьшается время срабатывания, повышается безотказность, уменьшаются габариты ВУ.

Однако для контактных ВУ с установкой на замедление нельзя отказаться от КВ и лучевого КД, так как замедление можно обеспечить лишь задержкой в передаче луча огня на пути КВ-КД. Задержать же действие взрывателя за счёт замедления передачи импульса детонации (на пути КД-Д) не представляется возможным.

Взрыватели с наконечными КД и ЭД могут быть лишь предохранительного или предохранительного типов.

Детонатор отсутствует у взрывателей БП малого калибра ($d \leq 37$ мм), а также у кумулятивных БП.

В зависимости от калибра БП и его назначения возможны следующие разновидности ОЦ:

КВ-З-У-КД-ПЗ-Д, такая характерна для ВУ предохранительного типа с несколькими установками;

КД-ПЗ-Д, применяются в ВУ мгновенного действия предохранительного типа;

КД-Д, характерна для ВУ мгновенного действия предохранительного типа;

КД, применяются в ВУ к малогабаритным БП предохранительного типа с фиксированной установкой.

Функциональная структурная схема механического контактного взрывателя приведена на рис. 2. Как видно из этого рисунка, в ней можно выделить 2 цепи: цепь срабатывания А и цепь предохранения Б.

Рис. 2. Функциональная структурная схема контактного взрывателя

Линия срабатывания - это цепь элементов функциональной схемы, обеспечивающая срабатывание взрывателя в требуемой точке траектории полёта.

Линия предохранения - это цепь элементов функциональной схемы, обеспечивающая безопасность взрывателя в служебном обращении, при выстреле (пуске) и на траектории вплоть до момента окончательного взведения. Во взрывателях к крупным БП они образуют так называемой ПИМ (предохранительно-исполнительный механизм).

В общем случае механический контактный взрыватель содержит следующие основные узлы и механизмы:

- ударный механизм - контактный датчик цели, в котором воздействие цели воспринимается ударником;
- боковой механизм - часть ударного механизма, обеспечивающая срабатывание взрывателя при действии поперечных или боковых сил;
- замедлитель - устройство для замедленного срабатывания взрывателя;

г) механизмы изоляции капсулей (МИК), исключают возможность срабатывания ВУ при случайном воспламенении КВ или КД за счёт вибраций, ударов и при выстреле за счёт больших перегрузок. Различают два типа МИК:

- изолирующий КВ от КД – предохранительно-воспламенительное устройство (ПВУ);
- изолирующий КД от детонатора - предохранительно-детонирующее устройство (ПДУ);

д) установочное устройство - устройство для установки перед выстрелом требуемого значения переменной характеристики взрывателя - вида и времени действия, продолжительности работы дистанционных устройств и т.д.;

е) блокирующий механизм - механизм для запираания подвижных деталей в безопасном положении в случае неправильной работы элементов взрывателя или нарушения условий эксплуатации;

ж) механизм дальнего взведения (МДВ) - устройство для взведения взрывателя в заданных пределах дистанции или времени;

з) предохранительный механизм - механизм для удержания в исходном положении деталей, при перемещении которых происходит взведение взрывателя;

и) накольный механизм — механизм для создания воспламенительного импульса путём накола КВ жалом. Он приводит в действие пиротехнические ПМ, МДВ и самоликвидаторы, являясь, по существу, их пусковым устройством. По своей конструкции накольный механизм подобен ударному механизму. Однако требования, предъявляемые к ним, различны. Кроме того, срабатывание накольного механизма вызывает разрыв вспомогательного, а не боевого (как в ударном механизме) КВ. Наконец они отличаются по времени действия, так как накольный механизм срабатывает в начале движения БП (в канале ствола), а ударный механизм в конце (при встрече с преградой);

к) самоликвидатор - устройство для обеспечения срабатывания ВУ в случае несрабатывания датчика цели.

Таково вкратце назначение основных узлов и механизмов ВУ. Следует, однако, отметить, что их конструктивное оформление различно и в первую очередь определяется типом БП, для которого предназначено данное ВУ. Кроме того, на них оказывают влияние и специфические особенности целей.

2. Силы, действующие на ВУ к БП ствольной артиллерии

При рассмотрении действия ВУ помимо четкого представления об его устройстве необходимо знать и учитывать силы, действующие на взрыватель на различных этапах его эксплуатации.

При служебном обращении на взрыватель могут действовать вибрационные и ударные перегрузки, возникающие в процессе транспортировки изделий или случайных падений БП с ВУ при погрузочно-разгрузочных работах. Эти перегрузки можно разделить на две группы. К первой группе относятся вибрационные и импульсные перегрузки, ко второй - ударные и квазистатические.

Под вибрационными понимаются перегрузки, возникающие во ВУ при транспортировке вследствие колебаний (вибраций) упругой системы транспорта. Различают свободные и вынужденные колебания упругой системы транспорта. Первые возникают и затухают после каждого одиночного воздействия аperiodической внешней силы, например, при столкновении колес транспорта с неровностями почвы. Вынужденные колебания появляются при периодическом действии сил, источником которых могут являться неуравновешенность вращающихся частей мотора, периодическое чередование дорожных неровностей (стыков рельс) и другие подобные причины.

Вибрационные перегрузки, возникающие при указанных колебаниях, изменяются по определенному периодическому закону, а их частоты совпадают с соответствующими частотами свободных и вынужденных колебаний упругой системы транспорта.

К импульсным перегрузкам относятся перегрузки, появляющиеся в результате относительного движения (подскоков) укупорки с ВУ и последующего соударения ее с платформой транспорта. Эти перегрузки имеют характер одиночных кратковременных импульсов, чередующихся с вибрационными перегрузками. Импульсные перегрузки могут появляться и при совместном движении укупорки и платформы в тех случаях, когда при наездах на препятствия амплитуда свободных колебаний поддрессоренного транспорта превышает допустимую, ввиду чего имеет место удар о жесткие ограничители хода.

Ударные перегрузки появляются при наездах автомашин на большие выбоины дороги, при падениях укупорки с ВУ во время погрузочно-разгрузочных работ.

Эти перегрузки являются, по существу, импульсными, но характеризуются относительно малой повторяемостью и большой величиной. Поэтому их целесообразно выделить в отдельную группу.

Квазистатические перегрузки появляются при различных маневрах (виражах и горках самолета, торможении поезда и т. д.) и характеризуются сравнительно большой

длительностью действия, измеряемой секундами и десятками секунд, т. е. являются как бы статическими.

Подытоживая все выше сказанное можно утверждать, что в служебном обращении на ВУ могут действовать вибрационные и ударные перегрузки длительностью в несколько миллисекунд и перегрузки амплитудой не более 100 единиц.

При проектировании ВУ, а также при их подготовке к приемо-сдаточным испытаниям они подвергаются специальным испытаниям. Прежде всего, эти испытания должны оценивать функционирование ВУ в процессе действия вибрационных и импульсных перегрузок, возникающих при транспортировке. Они обязательны для всех ВУ. В настоящее время такие испытания проводят на приборе «Сит», вибростендах (типа ВП-70) или непосредственно возкой на автомобиле.

Цель ударных испытаний состоит в воспроизведении ударных перегрузок. Данному виду испытаний подвергаются также все виды ВУ. Они проводятся путем сброса укупорок ВУ с определенных высот на различные преграды. Иногда для этой цели используются специальные ударные стенды, например «Массет» или «Пур».

Силы, действующие на ВУ при выстреле

Во время движения по каналу ствола артиллерийского орудия на детали ВУ в общем случае действуют четыре силы инерции(рис. 3):

- осевая сила инерции S , вызываемая ускорением поступательного движения БП и направленная в сторону, противоположную его движению;
- центробежная сила C , обуславливаемая вращением БП вокруг своей оси;
- касательная (тангенсальная) сила инерции T , возникающая в связи с изменением угловой скорости БП и направленная по касательной к окружности, образованной вращением центра масс детали ВУ, в сторону, обратную направлению вращения БП;
- кориолисова сила инерции K , действующая на детали ВУ в том случае, если он перемещается относительно корпуса взрывателя.

Рис. 3. Силы, действующие на ВУ к БП ствольной артиллерии при выстреле

Осевая силы инерции S определяется как

$$S = mJ, \quad (1)$$

где m - масса детали ВУ, J - ускорение поступательного движения БП. Ускорение J связано с давлением P пороховых газов на дно БП зависимостью

$$J = \frac{PF}{\phi G} g, \quad (2)$$

где F - площадь поперечного сечения канала ствола; G - вес БП; ϕ - коэффициент фиктивности, учитывающий второстепенные работы, производимые пороховыми газами при выстреле.

С учетом площади полей нарезов F определяется по формуле

$$F = 0,8D^2, \quad (3)$$

где D - калибр БП.

Для вычисления коэффициента фиктивности В.Е. Слухоцким предложено приближенное выражение

$$\phi = K + \frac{1}{3} \frac{W}{G}, \quad (4)$$

где K - коэффициент, равный 1,03 для пушек и 1,06 для гаубиц;

J - вес порохового заряда;

G - вес БП.

$$\text{Отсюда } S = \frac{PF}{\phi G} p, \quad (5)$$

где p - сила тяжести детали ВУ.

Из этого выражения видно, что сила инерции S пропорциональна давлению p .

Характер изменения сил S и p (рис. 4).

Рис. 4. Кривые давления и силы инерции от линейного ускорения при выстреле

Максимальное значение силы инерции имеет место при $D = D_{\max}$:

$$S_{\max} = \frac{P_{\max} F}{\phi G} p = K_1 p. \quad (6)$$

Коэффициент K_1 показывает во сколько раз максимальное значение осевой силы инерции, действующей на деталь ВУ при выстреле, превосходит ее силу тяжести. Этот коэффициент принято называть коэффициентом осевой (линейной) взводимости.

Для современных артиллерийских систем значения K_1 находятся в пределах от нескольких сот единиц (минометы) до нескольких десятков тысяч единиц (малокалиберные зенитные и авиационные пушки). Следовательно, при выстреле из артиллерийских систем инерционные перегрузки во много раз превышают те, которые действуют в служебном обращении. Данное обстоятельство позволяет для подобных ВУ разработать простейшие инерционные предохранительные механизмы (ИПМ), имеющие непрерывное движение взводящейся детали и обеспечивающие безопасность взрывателя в служебном обращении и надежное взведение при выстреле.

По этим же соображениям для взрывателей в гранатометах, реактивных системах и крупных БП (с гораздо меньшим значением K_1) применяются ИПМ с прерывистым движением взводящей детали.

После вылета снаряда из канала ствола давление пороховых газов на его дно быстро падает. Также быстро в этот период (период последствий пороховых газов) убывает осевое ускорение снаряда и осевая сила инерции, действующая на детали взрывателя.

В большинстве случаев действием осевых сил инерции на деталь ВУ в этот период, в виду его кратковременности, можно пренебречь. Однако в тех случаях, когда осевые силы инерции в период последствий вредно влияют на поведение взрывателя, действительную кривую $J(t)$ можно заменить прямой, уравнение которой имеет вид

$$J = (1 - \alpha t) J_d, \quad (7)$$

где $\alpha = \frac{J_d}{0.04V_0}$,

J_d - значение поступательного ускорения у дульного среза. Формула (7) справедлива при $J > 0$ т. е. до момента

$$t = \frac{0.04V_0}{J_d}.$$

Во вращающихся БП возникает центробежная сила

$$C = m\rho\omega^2.$$

Между угловой скоростью БП и его поступательной скоростью V имеется эмпирическая зависимость

$$\omega = \frac{2\pi}{\eta D} V, \quad (8)$$

где η - крутизна нарезов (длина хода нарезов, выраженная числом калибров D).

Наибольшее значение $\omega_{\max}$ соответствует начальной скорости БП V_0 :

$$\omega_{\max} = \frac{2\pi}{\eta D} V_0. \quad (9)$$

Подставляя в исходное выражение для C вместо ω его выражение (8), получим

$$C = \rho \left(\frac{2\pi}{\eta D} \right)^2 \frac{V^2}{g} p. \quad (10)$$

Рис. 5. Кривые скорости артиллерийского БП и центробежной силы при выстреле

На рисунке 5 показан характер нарастания скорости БП V и центробежной силы C по мере движения снаряда в канале ствола. Максимальное значение центробежной силы имеет место у дульного среза орудия.

$$C_{\max} = \rho \left(\frac{2\pi}{\eta D} \right)^2 \frac{V_0^2}{g} p. \quad (11)$$

Введя коэффициент центробежной взводимости

$$K_2 = \frac{\omega_{\max}^2}{g} \left(\frac{2\pi}{\eta D} \right)^2 \frac{V_0^2}{g}, \quad (12)$$

для $C_{\max}$ получим выражение

$$C_{\max} = K_2 p \rho.$$

Численное значение K_2 показывает, во сколько раз центробежная сила, действующая на деталь ВУ у дульного среза орудия, превосходит ее вес при эксцентриситете $\rho = 1$ мм. Для 36-мм авиационных пушек $K_2 = 5870$, а для 305 артиллерийских пушек - $K_2 = 16$.

Следовательно, для большинства ВУ к артиллерийским БП можно в качестве предохранительных механизмов использовать центробежные - ЦПМ. Последние по сравнению с ИПМ обеспечивают большую безопасность (позднее взведение), но ограниченную область применения.

Во время движения БП по каналу орудия его угловая скорость непрерывно возрастает, и возникают силы инерции от касательных ускорений.

$$T = m\rho \frac{\partial \omega}{\partial t}. \quad (13)$$

$$\text{Так как } \omega = \frac{2\pi}{\eta D} \text{ и } \frac{\partial V}{\partial t} = J,$$

$$\text{то } T = \frac{2\pi I}{\eta D g} \rho p. \quad (14)$$

Таким образом, касательная сила инерции T , как и рассмотренная ранее сила S , пропорциональна ускорению поступательного движения J . Поэтому о величине этой силы можно судить, сравнив ее с силой S :

$$\frac{T}{S} = \frac{2\pi\rho}{\eta D}. \quad (15)$$

В существующих орудиях крутизна нарезов η колеблется в пределах $20 < \eta < 35$, а эксцентриситет ρ всегда значительно меньше радиуса БП $D/2$. Следовательно,

$$\left(\frac{T}{S}\right)_{\max} = \frac{2\pi D/2}{20D} \approx 0,16.$$

Таким образом, при выстреле касательная сила T составляет не более 16 % осевой силы S . В действительности $\rho \leq D/2$ и отношение T/S значительно меньше 0,16. Кроме того касательная сила T оказывает воздействие на деталь ВУ, взводящееся под действием силы S , через коэффициент трения ($f = 0,2$), и отношение T/S составляет не более 3 %.

Однако в ряде случаев касательная сила инерции T создает момент пары сил, под действием которого могут развернуться детали, центры тяжести которых совпадает с осью вращения БП. В случае с ВУ ВМ-30 такой деталью является установочный колпачок, разворот которого не допустим.

Касательная сила инерции T направлена по касательной к окружности в сторону, обратную направлению вращения БП.

Рассмотренные выше силы C, S и T направлены перпендикулярно друг к другу. Максимальные значения этих сил зависят от давления газов $P_{\max}$ и начальной скорости V_0 . При вычислении указанных сил следует учитывать, что с увеличением температуры окружающего воздуха $P_{\max}$ и V_0 повышаются, а с понижением - убывают. Принято считать, что при изменении температуры возможные отклонения $P_{\max}$ не превышают $\pm 20\%$, а начальной скорости $\pm 8\%$.

Наконец следует отметить, что перечисленные силы C, S и T действуют на деталь ВУ при движении БП по каналу ствола независимо от того, перемещаются они или находятся в покое относительно БП.

В противном случае возникает еще одна сила - кориолисова сила инерции K . Она вызывается кориолисовым (поворотным) ускорением детали и равна

$$K = 2 \frac{\omega V_{от} \rho}{g} \sin \alpha, \quad (16)$$

где $V_{от}$ - скорость перемещения детали относительно БП; α - угол между направлением движения детали и осью вращения снаряда.

Очевидно, если деталь относительно БП не движется ($V_{от} = 0$), то кориолисова сила равна 0. Она равна нулю и в случае перемещения детали вдоль или параллельно оси БП ($\alpha = 0$), а также когда БП не вращается.

Чтобы найти направление силы K при $\alpha = \frac{\pi}{2}$, достаточно вектор скорости $V_{от}$ повернуть на угол $\frac{\pi}{2}$ в сторону, обратную направлению вращения БП. При $\alpha \neq \frac{\pi}{2}$ направление силы K можно найти аналогичным образом. С этой целью достаточно вместо вектора $V_{от}$ рассматривать его проекцию $V_{от} \sin \alpha$ на плоскости, перпендикулярной оси вращения.

Следует отметить, что в тех случаях, когда скорость $V_{от}$ измеряется малыми долями метров в секунду, например при взведении центробежных стопоров, величина кориолисовой силы инерции K незначительна даже при больших значениях ω . Однако для центробежных ударников, перемещающихся со скоростью 5-6 м/сек и более, сила K внушительна и с ней приходится считаться.

При вылете снаряда из канала ствола давление пороховых газов на дно снаряда быстро падает и вместе с ним падает до нуля и сила S . Центробежная же сила некоторое время еще сохраняет за дульным срезом свое максимальное значение, а затем начинает относительно медленно уменьшаться в связи с торможением БП в воздухе. Это уменьшение ориентировочно можно определить по эмпирической формуле И.А. Слезкина

$$\omega = \omega_0 \exp \left(1 - 0,06 \frac{DL}{2G} \int_0^t V^{\frac{4}{5}} dt \right), \quad (17)$$

где ω_0 - начальная (максимальная) скорость БП;

L, D, G - соответственно длина, калибр и сила тяжести БП;

V - текущее значение скорости БП.

На траектории под действием силы сопротивления воздуха БП тормозится и появляется отрицательное ускорение. Соответствующая сила инерции (сила набегания S_H) обуславливает перемещение детали ВУ в направлении движения БП. Эта сила характеризуется коэффициентом набегания

$$K_z = \frac{S_H}{mg}.$$

В наибольшей степени эта сила влияет на ударники инерционного действия и может вызвать их преждевременное срабатывание. Для устранения этого применяются контрпредохранители.

Как известно, БП на траектории совершает нутационное и прецессионное колебательные движения. В результате этого появляется осевая сила инерции (сила нутации), определяемая углом нутации δ , углом прецессии ν и скоростями их изменения $\dot{\delta}$ и $\dot{\nu}$, а также радиальная сила инерции, зависящая от этих величин и от угловых ускорений нутации $\ddot{\delta}$ и прецессии $\ddot{\nu}$.

В зависимости от степени износа канала ствола сила нутации может изменяться в широких пределах, достигая максимального значения при начальных углах нутации около 20 градусов (соответственно перегрузка - несколько сотен единиц).

В общем случае вращающийся снаряд движется в воздухе весьма сложным образом. Центр масс снаряда перемещается по криволинейной пространственной кривой. При этом его ось вращается вокруг центра масс, а сам снаряд вращается вокруг оси симметрии.

Рассмотрим более простой случай, когда центр масс снаряда движется прямолинейно и равномерно. Пусть ось снаряда совершает относительно касательной к траектории (вектора V) равномерное коническое движение с постоянным углом нутации δ_0 . Такое движение называется регулярной прецессией.

Для упрощения выкладок можно исходить из того, что снаряд находится в движущемся воздушном потоке и центр масс неподвижен. Проследим за движением детали взрывателя, закрепленной в точке А снаряда на его оси симметрии на расстоянии $l = OA$ от центра масс (рис. 6). Деталь будет двигаться по окружности. Следовательно, возникает центробежная сила

$$C = mr\dot{\nu}^2,$$

где m - масса снаряда;

r - радиус окружности, равный $l \sin \delta_0$;

$\dot{\nu}$ - угловая скорость вращения детали.

Рис. 6. Силы, действующие на деталь ВУ при наличии инерционного прецессионно-нутационного движения БП

Угловая скорость $\dot{V}$ совпадает со скоростью вращения плоскости нутации, проходящей через ось снаряда и касательную к траектории центра масс. Угол поворота этой плоскости, отсчитываемый относительно некоторого начального положения, называется углом прецессии V . Скорость вращения плоскости нутации, равная $\dot{V}$, называется скоростью прецессии.

Центробежная сила C направлена под углом $90^\circ - \delta_0$ к оси снаряда. Проекция ее на ось снаряда равна

$$C_T = ml\dot{V}^2 \sin^2 \delta_0,$$

а нормальная составляющая сила

$$C_N = ml\dot{V}^2 \sin \delta_0 \cos \delta_0.$$

Таким образом, при постоянных значениях δ_0 и V_0 деталь взрывателя испытывает действие постоянной осевой силы инерции C_T и радиальной силы C_N , постоянной по величине, но меняющей свое направление по отношению к быстровращающемуся взрывателю. Силу C_T принято называть силой нутации. Это название неточно, так как в данном случае сила C_T существует вследствие прецессии, а не нутации снаряда. Однако сила прецессии возможна лишь при наличии угла нутации δ_0 , что косвенно оправдывает принятое название. Силу C_N обычно называют радиальной силой инерции или радиальной составляющей силы нутации, или просто радиальной силой.

Случай регулярной прецессии снаряда на практике встречается редко. Обычно и угол нутации δ и скорость прецессии $\dot{V}$ изменяются в некоторых пределах. Если при

постоянной скорости $\dot{v}$ ось снаряда колеблется в плоскости нутации, то возникают следующие явления.

Нутация снаряда, т. е. колебания его оси в плоскости нутации с угловой скоростью $\dot{\delta}$, создает еще одну центробежную силу C_a (рис. 7), проходящую через точку $\hat{I}$ и лежащую на оси снаряда,

$$C_a = ml\dot{\delta}^2.$$

Складывая силы C_a и C_T , получим выражение для силы нутации S_H

$$S_H = ml(\dot{\delta}^2 + \dot{v}^2 \sin^2 \delta). \quad (18)$$

Рис. 7. Силы, действующие на деталь взрывателя в общем случае прецессионно-нутационного движения БП

Сила нутации S_H имеет, таким образом, центробежное происхождение. Рассмотрим радиальную силу инерции. Наряду с силой C_N , вызванной прецессией снаряда, радиальная сила имеет и другие составляющие. Действительно, скорость нутации $\dot{\delta}$ не может все время быть постоянной величиной: ось снаряда, достигнув предельного значения угла δ , движется затем в обратном направлении. Следовательно, имеет место угловое ускорение $\ddot{\delta}$ и деталь взрывателя испытывает действие касательной силы инерции T_a , направленной перпендикулярно оси снаряда

$$T_a = ml\ddot{\delta}^2.$$

Легко видеть, что при положительном ускорении $\ddot{\delta}$ сила T_a направлена обратно по отношению к силе C_N . Угловая скорость прецессии $\dot{\nu}$ также не постоянна в процессе колебательного движения оси снаряда. От ускорения $\ddot{\nu}$ возникает касательная сила инерции $T_v = mr\ddot{\nu}$. Она направлена по касательной к окружности в точке А. Иначе говоря, сила T_v тоже является радиальной силой, но она направлена под прямым углом к радиальным силам C_N и T_a .

Кроме рассмотренных сил, связанных угловыми скоростями и угловыми ускорениями оси снаряда, возникает еще одна сила инерции. Дело в том, что деталь, расположенная в т. А, одновременно участвует в двух движениях. С одной стороны, она вращается вокруг касательной к траектории (вектора скорости V) с угловой скоростью $\dot{\nu}$. С другой стороны, вследствие поворота оси снаряда в плоскости нутации, та же деталь совершает мгновенное поступательное движение со скоростью $l\dot{\delta}$. Следовательно, возникает кориолисова сила инерции $T_k = 2ml\dot{\delta}\dot{\nu}\sin(90^\circ - \delta)$. Сила T_k направлена в ту же сторону, что и сила T_v .

Результирующая радиальная сила N выйдет из плоскости нутации. Величину ее можно определить из выражения

$$N = ml\sqrt{(\dot{\nu}\sin\delta\cos\delta - \ddot{\delta})^2 + (\ddot{\nu}\sin\delta + 2\dot{\delta}\dot{\nu}\cos\delta)^2}. \quad (19)$$

Так как взрыватель с большой скоростью вращается относительно вектора силы N , то эта сила непрерывно меняет направление действия по отношению к взрывателю.

Таким образом, в результате вращения оси снаряда вокруг своего центра масс возникают осевая сила инерции S_H , определяемая углом нутации δ , угловыми скоростями нутации $\dot{\delta}$ и прецессии $\dot{\nu}$, и радиальная сила инерции N , зависящая от этих величин, а также от угловых ускорений нутации $\ddot{\delta}$ и прецессии $\ddot{\nu}$.

Приведенные зависимости сил инерции от параметров вращательного движения снаряда справедливы, если его центр масс движется равномерно и прямолинейно, а центр масс инерционной детали расположен по оси симметрии снаряда.

Известно несколько методов экспериментального определения сил инерции, вызванных колебательным движением снаряда с большими углами нутации δ . В простейшем случае о величине силы нутации судят по результатам стрельб с взрывателями инерционного действия.

Известно, что головные взрыватели, снабженные инерционными ударниками, при стрельбе из сильно изношенных стволов (2 и 3 категории износа) могут преждевременно действовать на траектории. Причиной траекторных разрывов является сила нутации, перемещающая ударник с капсюлем по направлению к жалу (ВУ РГМ-2). Если инерционный ударник весом p имеет контрпредохранитель с сопротивлением R и взрыватель при этом преждевременно срабатывает на траектории, то возникает предположение, что перегрузки, вызванные силой нутации, достигают величины $n = R / p$. Так, ВУ РГМ-2 при $R / p = 290-440$ при стрельбе из сильно изношенных орудий дает большое число преждевременных срабатываний.

Однако такой упрощенный подход к вопросу о силах нутации, действующих во время полета снаряда, неправилен. Дело в том, что ударник под действием силы нутации небольшой величины в состоянии сдеформировать контрпредохранитель с сопротивлением, превосходящим силу нутации в несколько раз. Это вытекает из того, что между жестким предохранителем и инерционным ударником имеется некоторый зазор. Следовательно, деформация носит динамический характер, в связи с чем, принятый выше статический расчет неправилен. Кроме того, сила нутации является периодически действующей, вызывающей постепенную деформацию контрпредохранителя.

Следующий способ измерения силы нутации основан на экспериментальных стрельбах по картонным щитам, когда в каждом щите снаряд вырубает отверстие. По длине этого отверстия можно составить представление об угле нутации δ , а по его положению об угле прецессии V .

Недостаток этого метода связан с тем, что этим способом можно определить силы нутации лишь на начальном участке траектории, хотя значительные силы нутации действуют и на конечном участке. Последнее обстоятельство очень важно при проектировании и отработке ВУ к корректируемым БП.

Поэтому на кафедре СМ-5 разработан метод их определения с помощью специальных датчиков. Для этой цели применяются акселерографы с часовой разверткой времени, а также телеметрический метод измерения, позволяющий с помощью радиопередатчика, установленного в снаряде, и приемной части, расположенной на земле, зафиксировать период изменения силы нутации и ее величину в функции времени.

Помимо силы набегания и силы нутации к преждевременным срабатываниям могут привести и метеорологические факторы, действующие на мембрану головного взрывателя при встрече с каплями дождя, хлопьями снега и крупинками града. Особо важно это при проектировании и отработке ВУ к высокоскоростным зенитным и авиационным БП, т. е. необходимо разрабатывать так называемые всепогодные ВУ.

Прежде всего, нужно оценить величину этих дестабилизирующих факторов. Данные о них весьма ограничены. Подобные явления принято рассматривать как процесс мгновенного удара о неподвижную мембрану капли, имеющей скорость, равную скорости движения снаряда. В результате удара капли может произойти деформация мембраны и срабатывание ударного механизма. Последнее возможно, если кинетическая энергия капли (или нескольких капель), встречаемых мембраной взрывателя, больше энергии необходимой для деформации мембраны, преодоления сопротивления контрпредохранителя и воспламенения капсюля. Очевидно, что энергия капли в момент удара о мембрану зависит не только от скорости капли, но и от ее массы. На основании экспериментальных исследований, проведенных НИИ «Поиск» (г. Санкт-Петербург), можно сделать вывод, что при проектировании ВУ, безопасных при стрельбе в дождь, необходимо исходить из предположения о встрече мембраны ВУ с каплями дождя диаметром 2-4 мм.

Представляет интерес вопрос о числе соударений мембраны взрывателя с подобными каплями дождя за время полета БП. Если задаться определенным процентным распределением капель дождя по диаметрам, интенсивностью дождя и скоростью падения капель, то по ориентировочному расчету взрыватель, имеющий мембрану диаметром 12 мм, на расстоянии 5 км может встретить 30-40 капель диаметром 2-4 мм.

Выше отмечалось, что процесс взаимодействия мембраны с каплей дождя рассматривается как явление мгновенного удара. В связи с этим, время, в течение которого происходит удар, считается равным нулю и в расчет не принимается. Отсюда вытекает, что определить силу реакции Q нельзя и можно оперировать лишь интегральными величинами: импульсом силы или кинетической энергией.

Величины кинетической энергии дождевых капель диаметром 2-4 мм при скоростях БП от 500 до 1200 м/сек приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Величины кинетической энергии капель дождя при соударении с мембраной ВУ (E , Дж)

V м/сек,	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
2	0,57	0,72	1,05	1,37	1,73	2,13	2,58	3,07
3	1,78	2,57	3,50	4,57	5,78	7,14	8,63	10,3
4	4,17	6,14	8,36	10,9	13,8	17,1	20,7	24,6

Для надежного инициирования КВ нужна энергия, не превышающая 0,1 Дж; для прорыва стальной мембраны толщиной 0,13 мм - 0,2-0,3 Дж, для преодоления сопротивления пружинного предохранителя, например, ВУ РГМ-6 - 0,1 Дж. Таким образом, для срабатывания ударного механизма средней чувствительности требуется кинетическая энергия, измеряемая величиной порядка 0,4-0,5 Дж. Сопоставив эту энергию с данными приведенной таблицы, можно видеть, насколько трудно обеспечить несрабатывание ВУ при прохождении снарядом зоны дождя, которая ведет себя в этом случае как твердое тело. Попытки устранить преждевременное срабатывание ВУ путем утолщения мембраны положительного результата не дали из-за ухудшения при этом чувствительности ВУ.

Предпринимаемые в настоящее время поиски конструктивного решения задачи обеспечения безопасности ВУ при стрельбе в дождь основаны на использовании разницы в физике процесса удара об одиночные капли и о сплошную преграду.

Рис. 8.Схема всепогодного ВУ (1 –корпус, 2 – стопоры, 3 – ударник, 4- контрпредохранительная пружина, 5 - КВ)

Во всепогодном ВУ (рис. 8) мембрана заменена колпачком конической формы толщиной 0,3-0,35 мм с неподвижной центральной частью. Чтобы взрыватель сработал, необходимо обжать колпачок по его боковой поверхности и переместить толкатели 2 в сторону ударника 3, обеспечивающего накол КВ 5. Необходимое обжатие колпачка

возможно только при ударе о сплошную преграду, а не об отдельные дождевые капли. В последнем случае составляющая сила капли, перпендикулярная стенке колпачка, недостаточна для срабатывания ВУ.

Перегрузка, действующая на ВУ при встрече с преградой, определяется физико-механическими свойствами преграды, скоростью и углом встречи с ней БП. В среднем и по уровню, и по продолжительности она сопоставима с перегрузкой, которую испытывает ВУ при выстреле.

Эта перегрузка равна отношению сопротивления преграды R к силе тяжести боеприпаса.

Сопротивление грунта проникновению БП с головной частью цилиндрической формы можно найти по методу Сагомояна А.Я. в предположении, что трение о преграду боковой поверхности снаряда не оказывает заметного влияния на силу

$$R = 2 \frac{\rho S \dot{x}^2}{1 - b_0}, \quad (20)$$

где ρ - плотность грунта;

S - площадь соприкосновения переднего торца БП с грунтом;

$\dot{x}$ - скорость БП;

b_0 - сжимаемость грунта.

Площадь S зависит от радиуса r цилиндрической поверхности БП и угла φ встречи его с преградой

$$S = r^2 (\Theta - 0,5 \sin 2\Theta) \quad (21)$$

где через Θ обозначен угол

$$\theta = \begin{cases} \arccos\left(-\frac{y \operatorname{tg} \varphi}{r}\right), & y < r \operatorname{ctg} \varphi; \\ \pi, & y \geq r \operatorname{ctg} \varphi. \end{cases}$$

Интегрируя с помощью ЭВМ уравнение движения в преграде БП $M\ddot{x} = -R(x, \dot{x})$ при допущении о постоянстве угла φ в процессе движения, можно найти осевую перегрузку БП $n_x(t)$.

Сила сопротивления преграды при соударении БП с водой, имеющего оживальную головную часть

$$x = \frac{H}{r_0^2} y^2,$$

где r_0 - радиус цилиндрической части БП;

$x(y)$ - координаты БП;

H - высота головной части.

Сопротивление преграды R определяется формулой

$$R = 2 \frac{\pi a \rho_0}{\sqrt{1 + 4H^2}} \frac{r_0^2}{H} xV \quad (x < H),$$
$$R = 2 \frac{\pi a r_0^2 \rho_0}{\sqrt{1 + 4H^2}} V \quad (x \geq H),$$
(22)

где a - скорость звука в воде;

ρ_0 - плотность воды.

Силу сопротивления преграды при соударении с броней можно рассчитать по формуле

$$R = F_1 (H_D + \lambda \rho V_C^2),$$
(23)

где F_1 - площадь поперечного сечения цилиндрической части бронебойного снаряда;

V_C - скорость встречи БП с преградой;

H_D - твердость брони;

ρ - плотность брони;

λ - коэффициент формы БП

$$\lambda = \frac{8n - 1}{24n^2}, \quad n = \frac{R_0}{D}.$$

При прохождении БП мягких преград (грунтов) происходит резкое падение его угловой скорости, что приводит к возникновению касательной силы инерции. Вредное влияние этой силы, например, проявляется в развинчивании резьбовых соединений. В связи с этим во взрывателях обычно применяется кернение или левая резьба.

Кроме того, БП в преграде движется по сложной траектории, очень часто с изменением направления его движения. Последнее обстоятельство может привести к развороту узлов, расположенных внутри взрывателя, что в ряде случаев крайне нежелательно, например, для установочных устройств.

Заключение

Представленная статья посвящена анализу особенностям конструкции ВУ к одному из типов БП. Подобный анализ автором проведен и для других типов БП: реактивных снарядов, авиабомб инженерных БП [2]. Полученные при этом научные материалы полностью подтвердили идею автора о целесообразности использования при

рассмотрении особенностей конструкции ВУ такого понятия как «визитные карточки». Эти материалы также помогут сотрудникам отрасли проектировать новые образцы ВУ для различных видов БП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черный В.Г., Охитин В.Н., Козлов В.И. Конструкция и эксплуатация импульсных тепловых машин. Ч. IV: учеб. пособие. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1992. – 100 с.
2. Козлов В.И. Анализ технических решений взрывательных устройств к боеприпасам различных классов // Автономные информационные и управляющие системы: в 4 т. / под ред. А.Б. Борзова. - М.: ООО НИЦ "Инженер", 2011.- Т. 1, Гл. 3.- С. 337-407.

Design features of fusing devices for conventional artillery ammunition. Part 1 – Forces acting on fusing systems of the particular type of ammunition.

08, August 2012

DOI: 10.7463/0812.0452053

Kozlov V.Ya.

Russia, Bauman Moscow State Technical University
vkozlov38@gmail.com

The article considers design features of fusing devices with conventional artillery ammunition. The author defines their interconnection with operating conditions of the munition, their dynamics and the nature of target. The author provides assessment of fuse functioning in their practical application during fighting. The “trademark” concept introduced by the author allowed to analyze design of typical fuses in these munitions and to reveal their fundamental differences from the design of fuses with a different type of ammunition. The material presented in the article is of great interest to graduate students of universities and industry experts.

Publications with keywords:[explosive](#), [target](#), [ammunition](#), [fuse](#), [firing circuit](#), [stages of operation](#)

Publications with words:[explosive](#), [target](#), [ammunition](#), [fuse](#), [firing circuit](#), [stages of operation](#)

References

1. Chernyi V.G., Okhitin V.N., Kozlov V.I. *Konstruktsiia i ekspluatatsiia impul'snykh teplovykh mashin. Ch. 4* [Design and operation of pulsed thermal machines. Pt. 4]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1992. 100 p.
2. Kozlov V.I. Analiz tekhnicheskikh reshenii vzryvatel'nykh ustroystv k boepripisam razlichnykh klassov [Analysis of technical solutions of detonating devices to munitions of different classes]. In book: *Avtonomnye informatsionnye i upravliaiushchie sistemy: v 4 t.* [Autonomous information and control systems: in 4 vols.]. Moscow, OOO NITs "Inzhener" Publ., 2011, vol. 1, ch. 3, pp. 337-407.