

КОСМИЧЕСКАЯ АРТИЛЛЕРИЯ ЕЁ БОЕПРИПАСЫ И ПОРАЖАЮЩИЕ ФАКТОРЫ ОБЩИЙ ОБЗОР

Содержание

Введение.....	01 стр.
Некоторые определения.....	01 стр.
Ускорители массы.....	02 стр.
Боеприпасы для ускорителей массы.....	08 стр.
Ускорители плазмы.....	18 стр.
Оружие направленной передачи энергии.....	19 стр.
Комбинированные системы.....	33 стр.
Обобщения и выводы.....	37 стр.
Список источников.....	39 стр.
Приложение.....	42 стр.

Введение

Цель настоящего обзора состоит в том, чтобы, как говорится, "с птичьего полёта" бросить взгляд на тот раздел военной техники, который носит название "артиллерия" и попытаться предположить, что может называться этим словом в будущем применительно к системам оружия, установленным на космических кораблях и космических станциях. При рассмотрении заявленной темы мы будем отталкиваться от современной физической картины мира без использования откровенной фантастики типа разрушения пространства или ускорения времени.

В этом документе нет формул. Есть только некоторые цифры, которые дают возможность оценить качественно достоинства и недостатки перечисленных видов оружия, на уровне "больше/меньше" или "лучше/хуже" и не более того. Это сделано совершенно сознательно. Во-первых, потому, что подробное, с формулами, рассмотрение каждого вида оружия потребует написание такого же по объёму документа, как этот. Во-вторых, честные характеристики оружия и прочей техники в геймдизайне востребованы далеко не всегда, а вот соотношение характеристик, их пропорция гораздо нужнее и важнее, поскольку именно это знание даёт разработчику с одной стороны свободу манёвра, а с другой помогает создать атмосферу реальности и добиться правильного игрового баланса.

Некоторые определения

Правильно назвать – значит правильно понять. Прежде всего, это означает, что нам необходимо определиться с тем, что же имеется в виду в данном документе под словом "артиллерия" и что такое её поражающие факторы.

Под артиллерией мы будем понимать вид оружия, который предназначен для поражения живой силы и материальных объектов противника, работающий на разных физических принципах и способный с помощью артиллерийских орудий доставить к цели порцию поражающей энергии в виде твердотельного поражающего элемента (снаряда, осколка и т.п.), ударной волны, электромагнитного излучения, элементарных частиц или атомов.

Артиллерийское орудие – это специально сконструированное устройство, обеспечивающее дистанционную доставку поражающей энергии к цели и, как правило, не предназначенное для транспортировки и применения силами одного человека. К артиллерийским орудиям мы будем относить ускорители массы, ускорители плазмы и устройства, предназначенные для обеспечения направленной передачи энергии.

Под поражающими факторами мы будем понимать эффекты, вызванные воздействием поражающей энергии и способные как в момент возникновения, так и впоследствии оказать вредное или губительное воздействие на живые организмы, растительный мир, а также на искусственные и естественные материальные объекты. Как правило, в результате воздействия поражающих факторов на живые организмы происходят нарушения в их работе, которые могут привести к их выходу из строя или к гибели; в результате воздействия поражающих факторов на материальные объекты происходит ухудшение их функциональных возможностей, поломка или же полное уничтожение.

Ускорители массы

С этим оружием все мы прекрасно знакомы. Практически всё современное огнестрельное оружие относится к ускорителям массы. Более того, это оружие было хорошо известно ещё нашим далёким предкам. Ведь пращи, луки и арбалеты это тоже ускорители массы. Мы кратко рассмотрим следующие типы этого оружия.

- Реактивные;
- Механические;
- Химические;
- Электромагнитные.

Кроме перечисленных выше "чистых" типов ускорителей массы существует определённое количество комбинированных систем. О некоторых из них будет рассказано в соответствующем разделе этого документа.

Реактивные ускорители массы – это вид ускорителей, в котором для метания снаряда к цели используется реактивный двигатель, установленный на самом снаряде, и сообщающий ему необходимую скорость полёта за счёт действия реактивной тяги. Применение реактивного двигателя в составе реактивного снаряда практически исключает действие силы отдачи при выстреле, что позволяет конструировать простые по устройству, лёгкие и сравнительно компактные многоствольные пусковые установки. Они способны создать высокую плотность огня, обладают высокой надёжностью и относительно недороги, что является немаловажной особенностью таких систем.

Главный недостаток реактивного ускорителя массы является продолжением его достоинств. Это его боеприпас – неуправляемый реактивный снаряд. Он имеет малую скорость и большое рассеивание. Это делает реактивные ускорители массы оружием исключительно ближнего боя.

Механические ускорители массы. В них для разгона поражающего элемента применяется механическая энергия упругих элементов, энергия вращения маховика или энергия сжатого газа (а также пара). Сейчас подобное оружие практически полностью вытеснено из вооружённых сил огнестрельными системами и используется как спортивное, развлекательное или охотничье. Однако, в будущем ситуация может измениться. Научные разработки в различных прикладных областях вполне могут вернуть "механострелы" в армию. Если не на главные роли, то на вспомогательные уж точно.

Химические ускорители массы пришли на смену механическим системам и в настоящее время прочно занимают лидирующие позиции, как в армии, так и в ряду гражданских средств самообороны. В этом оружии разгон поражающего элемента осуществляется с помощью энергии сгорания различных метательных взрывчатых веществ (ВВ). Для тех же целей может быть использована энергия детонации бризантных ВВ, а в будущем вполне возможно использование энергии взрыва тонкого проводника импульсным током. О том, что это за процесс будет рассказано ниже.

К метательным взрывчатым веществам относится старый добрый порох, а также различные жидкие и газообразные вещества. Возможно, что в будущем на смену пороху придёт другое твёрдое метательное вещество, отличающееся от него по химическому составу. Главной отличительной особенностью метательных ВВ является способность к горению без доступа кислорода с выделением большого объёма газообразных продуктов, которые и используются для метания поражающего элемента. Скорость горения или взрыва этих веществ составляет от десятков до сотен метров в секунду. Бризантные (что в переводе с французского значит "дробящие") это такие ВВ, как тротил, гексоген, динамит и т.д. Эти взрывчатые вещества уже не горят и не взрываются, а детонируют. До недавнего времени считалось, что детонация качественно не отличается от взрыва, а разница между этими явлениями только в скорости протекания процесса. Однако последние исследования позволяют утверждать, что детонация это процесс цепной реакции, но не на ядерном уровне, как при атомном взрыве, а на молекулярном. Скорость детонации современных бризантных ВВ может достигать 10-ти км/с, а перспективных – до 15 км/с.

Сейчас порох является основным метательным ВВ, но в будущем он вполне может уступить своё лидерство другим своим "коллегам". Ведь сила пороха за те 800 лет, что он известен человечеству, выросла примерно в 10 раз и практически подошла к своему пределу. В будущем, даже используя различные конструктивные и технологические ухищрения, а также новые рецептуры порохов вряд ли удастся создать орудие, способное разогнать достаточно тяжёлый снаряд (десятки – сотни килограммов) до скорости выше 4 – 5 км/с. Для современных орудий она ограничена максимумом примерно в 2 км/с. Это связано с тем, что скорость расширения пороховых газов у современных порохов не превышает 4 км/с. Теоретически уже сейчас можно создать пушку с начальной скоростью снаряда в 3 км/с, но подобное орудие не будет обладать хорошими показателями по критерию "стоимость-эффективность". Возможно, что в будущем удастся поднять этот предел, однако, в любом случае, существует теоретическое ограничение на скорость расширения пороховых газов, связанное с их большой молекулярной массой (~28), и как следствие, малой скоростью звука в них, которая и определяет скорость снаряда.

Если использовать в ускорителе массы сочетание бризантных взрывчатых веществ и кумулятивного эффекта, то в будущем можно добиться скорости поражающего элемента в виде кумулятивной струи или ударного ядра в пределах 10 – 30 км/с (сейчас этот предел для кумулятивной струи составляет 10 – 15 км/с, для ударного ядра 3 – 5 км/с). Однако, бризантные ВВ создают очень высокие динамические нагрузки, что приводит к росту массы орудия, да и масса снаряда весьма ограничена.

Жидкие и газообразные метательные ВВ в этом смысле гораздо перспективнее. Уже сейчас легкогазовая пушка может разогнать снаряд, массой в несколько десятков граммов до 3 – 4 км/с. В будущем такие пушки смогут разогнать лёгкий поражающий элемент (единицы – десятки граммов) до скорости в несколько десятков километров в секунду. По конструктивному типу легкогазовые пушки подразделяются на одноступенчатые и многоступенчатые. В одноступенчатых устройствах энергия к рабочему газу подводится непосредственно либо за счёт горения, либо за счёт электрического разряда; принципиальным преимуществом этих установок является их простота. Схема работы одноступенчатых установок полностью подобна схеме работы обычного огнестрельного оружия (рис. 1). В многоступенчатых устройствах подвод энергии к рабочему газу происходит через промежуточные ступени, например, разгоняется поршень, а затем кинетическая энергия поршня превращается в потенциальную энергию сжатого газа и т. д.

Многоступенчатые легкогазовые установки принципиально отличаются от обычных артиллерийских орудий тем, что в них введены дополнительные ступени, задачей которых является подогрев и сжатие лёгкого газа. Наиболее типичной установкой этого типа является двухступенчатая поршневая установка. На рис. приведена схема такой установки. В камере 4 находится лёгкий газ, сжатие которого производится поршнем 2, приводимым в движение пороховыми газами. После того как давление в легкогазовой камере достигнет расчётной величины, борт снаряда 5 срезается и происходит выстрел. В

двухступенчатой установке скорость снаряда сильно зависит от массы порохового заряда. Так, для того, чтобы разогнать снаряд весом 5 г до скорости 8 км/с необходим заряд пороха массой 2,5 кг.

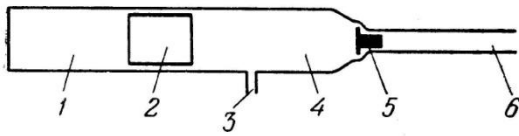


Рис. 1. Схема двухступенчатой поршневой легкогазовой установки

1 – заряд; 2 – поршень; 3 – отверстие для впуска газа; 4 – газовая камера; 5 – снаряд; 6 – ствол.

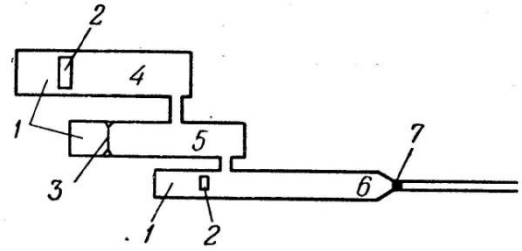


Рис. 2. Схема многоступенчатой легкогазовой установки

1 – пороховые газы; 2 – поршень; 3 – диафрагма; 4 – первая (поршневая) ступень; 5 – вторая (ударная) ступень; 6 – рабочая (поршневая) ступень; 7 – снаряд.

На рис. 2 приведена одна из возможных схем многоступенчатой легкогазовой установки, в которой для разгона метаемого тела используется только механическая и химическая форма энергии. Принцип работы таких установок состоит в следующем. Сжатие лёгкого газа производится последовательно несколько раз, причём после каждого сжатия производится расширение газа в камеру сжатия следующей ступени. Сжатие может производиться как с помощью ударных волн, так и с помощью тяжёлых и лёгких поршней. Например, установка, состоящая только из камер 5 и 6, будет установкой с ударным подогревом; а если в камере 5 поставить поршень, то получится установка с поршневым двукратным подогревом.

Жидкие метательные вещества (ЖМВ) разгоняют снаряд хуже газообразных, но их лучшие эксплуатационные характеристики могут перевесить все плюсы легкогазовых пушек. По крайней мере, в обозримой перспективе. К тому же, ЖМВ не так сильно нагружают конструкцию ускорителя массы, позволяют достаточно просто и плавно менять начальную скорость боеприпаса от выстрела к выстрелу, в отличие от легкогазовых пушек могут разгонять тяжёлый снаряд без существенной потери скорости разгона и в перспективе могут быть легче, чем легкогазовые и пороховые системы. Бинарные ЖМВ (т.е. состоящие из двух компонентов) более безопасны при транспортировке и хранении. У порохов тоже есть свои преимущества, - при прочих равных, пороховые системы проще по конструкции и надёжнее, чем ускорители, использующие другие метательные ВВ, - но вероятнее всего, что жидкие метательные вещества всё же вытеснят пороха из артиллерии. Однако, стрелковое оружие ещё долго будет "епархией" порохов.

Ну, и в заключении разговора о химических ускорителях нужно сказать несколько слов о таком физическом эффекте, как взрыв тонкого проводника импульсным током. Этот физический процесс очень энергетически насыщен. А если проводник поместить в жидкость, то в результате химической реакции между материалом проводника и жидкостью энерговыход ещё более возрастет. Энергии будет выделяться даже больше, чем было запасено в конденсаторной батарее. Плотность этой энергии весьма высока и составляет примерно $300'000 \text{ Дж/см}^3$.

Для сравнения, плотность энергии при взрыве тротила составляет около $6'800 \text{ Дж/см}^3$, т.е. энергия взрыва проводника в 44 раза превышает энергию, выделяющуюся при взрыве тротила. Это данные современных экспериментов. В будущем эту величину наверняка можно будет увеличить в разы, а то и на порядки. Но и это ещё не всё. Температура плазмы, образующейся в процессе взрыва, составляет порядка 40 миллионов градусов! Сочетание такой высокой энергонасыщенности процесса с достаточно умеренной скоростью его протекания (меньше, чем скорость детонации тротила) даёт основания полагать, что в будущем вполне возможно создание ускорителя массы, который сможет разгонять твердотельные снаряды и плазменные сгустки до

скоростей порядка несколько десятков километров в секунду. На рис. 3 показана экспериментальная установка, использующая данный принцип ускорения снаряда.

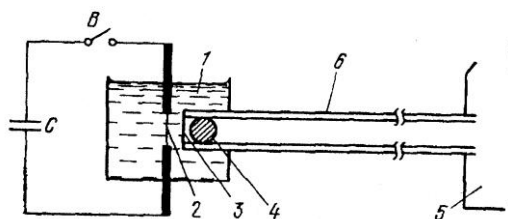


Рис. 3. Ускоритель, использующий взрыв тонкого проводника импульсным током

1 – сосуд с водой; 2 – проволочка; 3 – диафрагма; 4 – снаряд (стеклянный шарик); 5 – вакуумная камера; 6 – стеклянная трубка (ствол)

Проволочка 2 помещается в воду около торца тонкой стеклянной трубки 6, служащей стволом. После взрыва проволочки горячая плазма прорывала диафрагму 3, которой был закрыт конец трубки, и, устремляясь в трубку, толкала снаряд, расположенный сразу за диафрагмой. Инерция и малая сжимаемость воды не позволяла газам разлетаться во все стороны, поэтому почти вся масса газа устремлялась в ствол. Для стеклянных шариков массой 1,1 мг были получены максимальные скорости порядка 30 км/с. КПД пушки достигал 5 – 10%.

Электромагнитные ускорители массы. Мы будем рассматривать два типа этих ускорителей: **Gauss gun** и **Rail gun** (пушка Гаусса и рельсотрон).

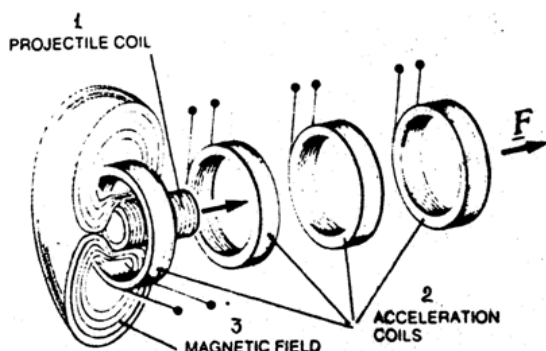


Рис 4. Принцип работы пушки Гаусса

1 - катушка снаряда; 2 - катушки ускорения; 3 - магнитное поле; F - сила Лоренца

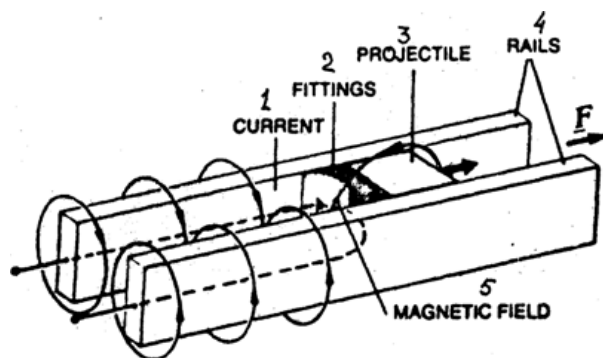


Рис. 5. Рабочий принцип рельсовой пушки

1 - ток; 2 – разгоняющая арматура или плазменный поршень; 3 - снаряд; 4 - рельсовые направляющие; 5 - магнитное поле; F- сила Лоренца

Принцип действия **пушки Гаусса** состоит в следующем (рис. 4). В цилиндрической обмотке (соленоиде) при протекании через неё электрического тока возникает магнитное поле. Это магнитное поле начинает втягивать внутрь соленоида снаряд из магнитного материала, который от этого начинает разгоняться. Если в тот момент, когда снаряд окажется в середине обмотки ток в последней отключить, то втягивающее магнитное поле исчезнет и снаряд, набравший скорость, свободно вылетит через другой конец обмотки. Чем сильнее магнитное поле и чем быстрее оно отключается – тем быстрее вылетает снаряд.

Однако, одноступенчатые системы (т.е. состоящие из одной катушки) обладают достаточно низким КПД. Это объясняется рядом факторов. Инерционность самого соленоида, самоиндукция которого вначале препятствует втягиванию снаряда, а затем после выключения тока, тормозит его движение. Инерционностью снаряда, обладающего значительной массой. Силой трения, которая вначале, при разгоне снаряда весьма велика. Для достижения ощутимых результатов требуется делать обмотки соленоидов с чрезвычайно большой удельной мощностью, что весьма нежелательно, ибо приводит в лучшем случае к перегреву, а в худшем к их перегоранию.

Разработка и создание многоступенчатых систем поможет решить все эти проблемы. Благодаря постепенному, а не импульсному ускорению снаряда удельную мощность обмоток можно снизить и, следовательно, уменьшить их нагрев и продлить

срок службы. В многоступенчатых системах достигается более высокий КПД, что связано с постепенным снижением трения и с более высоким коэффициентом передачи энергии на последующих ступенях. Это означает, что чем больше начальная скорость снаряда, тем большее количество энергии он может взять от соленоида. Иными словами, если в первой ступени снаряду передается 1 – 3 % энергии магнитного поля, то в последней практически вся энергия поля переходит в кинетическую энергию ускоряемого снаряда.

КПД простейших многоступенчатых систем больше, чем одноступенчатых и может достигать 50 %. Но и это не предел! Многоступенчатые системы позволяют добиться более полного использования энергии импульсных источников тока, что даёт возможность в перспективе увеличить КПД системы до 90% и более.

Рельсотрон функционирует немного иначе (рис. 5). В ней проводящий снаряд движется между двух рельс – электродов, по которым подаётся ток. Источник тока подключается к рельсам у их основания, поэтому ток течёт как бы вдогонку снаряду и магнитное поле, создаваемое вокруг проводников с током, полностью сосредоточено за проводящим снарядом. В данном случае снаряд является проводником с током, помещённым в перпендикулярное магнитное поле, созданное рельсами. На снаряд по всем законам физики действует сила Лоренца, направленная в сторону противоположную месту подключения рельс и ускоряющая снаряд. С изготовлением рельсового ускорителя масс связан ряд серьезных проблем – импульс тока должен быть настолько мощным и резким, чтобы возникла бы ускоряющая сила, разгоняющая снаряд и он не успел бы при этом испариться (ведь через него протекает огромный ток!). Поэтому материал снаряда и рельс должен обладать как можно более высокой проводимостью, снаряд как можно меньшей массой, а источник тока как можно большей мощностью и меньшей индуктивностью. Это в самом простом случае. И если в "гауссовках" увеличение массы снаряда как правило приводит к увеличению КПД, так как более массивный снаряд втягивается магнитным полем обмотки сильнее, то в случае с рельсовым ускорителем дела обстоят совершенно наоборот. КПД простейшего рельсового ускорителя составляет примерно 10%. Следовательно, особенность рельсового ускорителя в том, что он способен разгонять сверхмалые массы до сверхбольших скоростей.

Возможна и более сложная конструкция. Кардинальным образом проблема с разогревом снаряда решается при использовании в качестве проводящего материала плазмы. Поражающий элемент в данном случае представляет собой легкий снаряд из диэлектрического материала, на заднюю поверхность которого нанесено проводящее напыление. При выстреле под действием огромного тока напыление моментально переходит в состояние высокотемпературной плазмы с очень высокой проводимостью, обеспечивая собой протекание тока между электродами. Такое плазменное облако становится своеобразным поршнем для снаряда, который должен быть электрически изолирован от плазмы. Под действием силы Лоренца плазма выталкивает снаряд вперед.

Еще одним немаловажным конструктивным решением при создании рельсового ускорителя является дополнительное подмагничивание пространства между рельсами. Дело в том, что все проблемы с омическим нагревом снарядов вызваны тем, что ускоряющая сила зависит как от тока, так и от величины магнитного поля, образованного этим же током. С увеличением тока она растет одновременно с нагревом проводников. Если же поместить по обе стороны от зазора между рельсами сильные постоянные магниты, создающие перпендикулярно движению снаряда мощное постоянное магнитное поле, идентичное тому, которое возникает при протекании тока по рельсам, то ускоряющая сила при неизменном токе значительно возрастает. В итоге снаряд покидает пространство между рельсами быстрее, двигаясь с более высокой скоростью, тепловые потери становятся гораздо меньше, а общий КПД системы значительно возрастает.

Что касается формы снарядов, то при использовании снаряда с плазменным проводящим поддоном он может иметь любую требуемую форму, с одним лишь условием: чтобы образовавшаяся позади него плазма не могла прорваться вперед снаряда. Соответственно, поперечное сечение снаряда должно хорошо перекрывать зазор между рельсами.

Использование некоторых технических решений позволяет поднять КПД рельсового ускорителя (до 20, а в перспективе до 40% и выше), увеличить массу снаряда при некотором снижении его скорости. Дело в том, что простейший рельсотрон представляет собой неполный виток с током: две рельсы и снаряд. Если же соединить последовательно несколько пар рельс, расположив их одна над другой, а снаряд сделать из набора проводящих и диэлектрических слоёв, то в итоге получится нечто вроде вытянутого соленоида, одна из стенок которого подвижна (снаряд). При пропускании тока магнитный поток будет выталкивать единственную подвижную часть. При этом сила разгона, по сравнению с обычной "рельсой", будет больше во столько раз, сколько пар рельсов запараллелено. Хотя такое решение и позволяет увеличить массу снаряда при приемлемом КПД, но оно не является панацеей против омического нагрева.

Кроме того "рельсу" можно относительно легко превратить в "плазмомёт". Для этого достаточно, чтобы снаряд между рельсами превратился в сгусток плазмы. Этот сгусток будет разгоняться магнитным полем как обычный снаряд. У рэйлгана есть и ещё одно преимущество. Он может стрелять снарядами совершенно разных калибров. Нужно только менять расстояние между рельсами соответственно калибру снаряда.

В настоящее время в США испытываются прототипы корабельных рельсотронов, предназначенных для метания твердотельного снаряда массой около 3 кг на дистанцию до 185 км, а в перспективе и до 400 км (рис. 6 и 7)



Рис. 6. Так рельсовая пушка должна выглядеть на палубе корабля (иллюстрация BAE Systems)

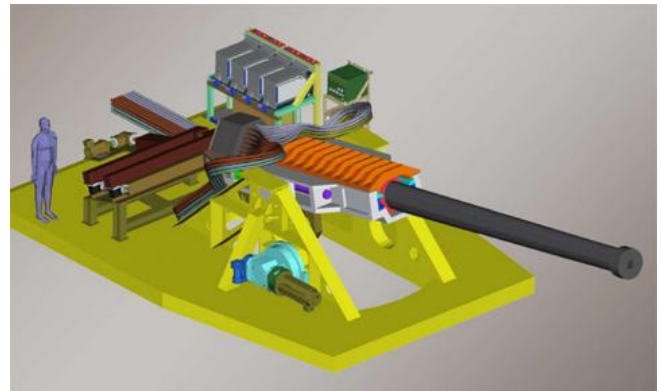


Рис. 7. Схема рельсовой пушки, показанной на рис. (иллюстрация BAE Systems)

Однако кроме очевидных преимуществ у рельсовых ускорителей есть и свои недостатки. Из-за более низкого КПД, он будет потреблять больше энергии, чем "гауссовка". По этой же причине рельсотрон, при прочих равных условиях, разгоняет снаряд меньшей массы, чем "гауссовка". Прочностные характеристики рельсотрона классической конструкции также требуют доработки. Уменьшить этот недостаток можно путём перехода к коаксиальной конструктивной схеме (рис. 17-б). Кроме того, существует проблема завершения разгона. Чтобы снаряд оторвался от плазменного поршня, последний должен исчезнуть или замедлиться. В простых схемах рельсовых ускорителей замедление невозможно, а для исчезновения плазменного поршня требуется разрыв электрической цепи. Разрыв высоковольтной электрической цепи приводит к большим перенапряжениям и пробоям. В результате снаряд может получить дополнительный случайный импульс, обладающий перпендикулярной составляющей, что резко ухудшает угловую точность стрельбы. Наконец, само движение плазменного поршня подвержено действию многочисленных плазменных неустойчивостей, которые трудно предусмотреть и устранить заранее.

Использование высокотемпературной сверхпроводимости позволит в перспективе в существенной мере избавиться от тех недостатков, которые присущи сейчас электромагнитным ускорителям масс.

Если сравнивать между собой химические и электромагнитные ускорители массы, то при одинаковом техническом уровне, при равной скорости и массе поражающего элемента, ЭМ-ускорители будут массивнее и менее надежными. Однако они смогут

разгонять поражающие элементы до очень высоких скоростей – в десятки, а возможно и в сотни километров в секунду для снарядов малой массы. "Гауссовки" при этом потенциально могут развивать очень высокий темп стрельбы. Кроме того, ЭМ-ускорители оснащаются возобновляемыми источниками энергии, а у химических систем запас метательного вещества ограничен.

Боеприпасы для ускорителей массы

Наверняка, не все виды современных боеприпасов ствольной и реактивной артиллерии будут использоваться в будущем, а те, которые сохранятся – претерпят существенные изменения. Мы начнём наш обзор с **твердотельных боеприпасов**, поскольку до настоящего момента при рассмотрении ускорителей массы под понятиями "снаряд" или "поражающий элемент" имелся в виду сплошной твердотельный снаряд. Ведь только его можно разогнать на небольшой дистанции до тех максимальных скоростей, которые приведены в примерах выше. Любые другие боеприпасы более сложной конструкции, имеющие определённую внутреннюю структуру, не выдержат тех ускорений, которые сможет выдержать простая болванка.

Теперь перейдём к рассмотрению физических процессов, происходящих в веществе твердотельного снаряда при его контакте с целью на различных скоростях соударения. Природа явления высокоскоростного удара очень сложна. Соударение двух тел сопровождается различными процессами, возникновение и относительная роль которых зависит от геометрических размеров взаимодействующих тел, физико-механических характеристик материалов, и что более существенно, от скорости соударения. Полное описание высокоскоростного удара потребовало бы привлечения практически всех разделов механики сплошных сред. Естественно, что в нашем случае такая подробная проработка вопроса избыточна. Мы ограничимся упрощённым рассмотрением вопроса, но без ущерба для качественной картины взаимодействия поражающего элемента и мишени. В таблице 1 как раз и приведён качественный характер изменений свойств материалов в зависимости от условий соударения.

Таблица 1

Скорость соударения, км/с	Свойства (поведение) материала
менее 0,05	Преобладают упругие деформации. Возможно появление вмятин в пластичных материалах и трещин в хрупких.
0,05 – 0,5	Преобладают пластические деформации. На поверхности мишени из пластичного материала образуется вмятина с отношением глубины к диаметру $H/D \leq 0,1$. Ударник заметно деформируется. Существенно влияние механической прочности материала мишени и поражающего элемента.
0,5 – 1,5	Проявляются свойства вязкости, а также вязко-пластические свойства материала. Остаётся существенным влияние механической прочности материала мишени и поражающего элемента.
1,5 – 4	Проявляется гидродинамическое поведение твёрдых тел. Определяющий параметр материала мишени – его плотность.
4 – 12	Необходим учёт сжимаемости. Происходят процессы плавления вещества мишени и ударника. При меньших скоростях возможны лишь процессы деформации и механического разрушения ударника и мишени. Расплавленный материал выдавливается из кратера и при застывании образует вокруг него валик (бруствер). Глубина кратера постепенно увеличивается до $H/D \sim 1$, а дно кратера приобретает полусферическую форму.
12 – 25	Происходит испарение вещества с частичной термической ионизацией образующегося пара. Испарение вещества из области удара носит взрывной характер, при котором растёт диаметр кратера D , а глубина H изменяется незначительно.
свыше 25	Очень интенсивно идёт процесс термической ионизации, в результате чего из области соударения выбрасывается облако плазмы, имеющей температуру $\sim 10^4$ К. С дальнейшим увеличением скорости соударения постепенно уменьшается масса твёрдой фазы и увеличивается доля вещества, перешедшего в состояние плазмы.

Если, что называется, "простыми словами" описать динамику соударения при различных относительных скоростях, то получится следующая картина.

При малых скоростях (от 0 до 1,5 км/с) определяющую роль во взаимодействии играют механические характеристики материалов снаряда и мишени. Именно в этом диапазоне скоростей соударения работают такие технологические приёмы как цементация (т.е. насыщение углеродом поверхностного слоя стального изделия), термообработка, легирование и т.п., которые позволяют в разы увеличить стойкость материалов к ударным нагрузкам. Если снаряд всё же пробивает защиту цели, то диаметр отверстия почти равен калибру снаряда, а его масса после пробития преграды практически равна исходной массе.

По понятным причинам, в настоящее время наиболее проработанным с научной и практической точек зрения является именно этот диапазон скоростей соударения снаряда и преграды. Виды разрушения преграды при скоростях соударения от 0,1 до 1 км/с показаны на рис. По-видимому, этот диапазон скоростей один из наиболее сложных – в нём проявляется большое разнообразие различных форм деформирования и видов разрушения преграды.

Несмотря на то, что в реальности разрушение преграды является комбинацией видов, представленных на рис. 8, при решении практических задач выделяют основной механизм разрушения, а другими пренебрегают или учитывают их частично.

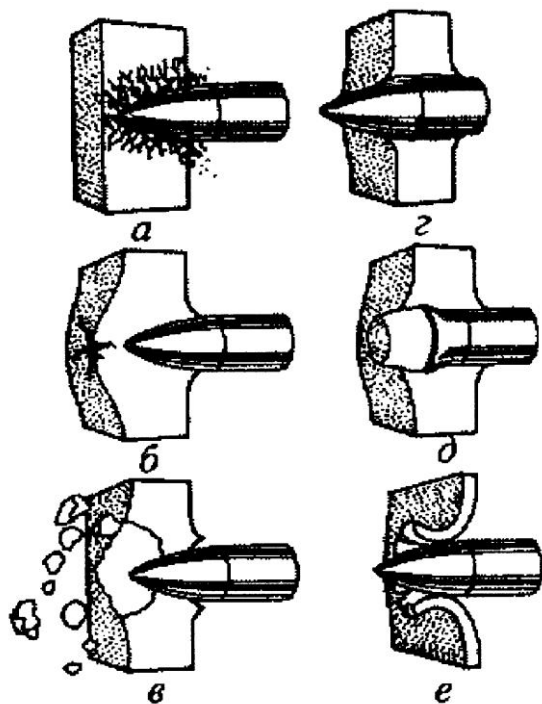


Рис. 8. Виды разрушения преграды

а – хрупкое разрушение; б – разрушение с образованием радиальных трещин; в – дробление; г – прокол; д – выбивание пробки; е – образование лепестковой пробойны



Рис. 9. Фазовая диаграмма, характеризующая соударение снаряда и преграды

снаряд – сталь, диаметр 6,35 мм, оживальная головная часть; преграда – алюминий, толщина 6,35 мм

Результаты экспериментальных исследований взаимодействия снаряда и преграды удобно представлять графически в виде зависимостей между такими переменными, как скорость снаряда, толщина преграды, угол соударения, кинетическая энергия снаряда и т.д. Часто зависимости строят в безразмерном виде. В этом случае соответствующие характеристики относят к диаметру или длине снаряда, скорости звука в материале,

некоторым критическим значениям энергии и т.п. На рис. 9 приведён пример фазовой диаграммы характеризующей взаимодействие стального ударника и алюминиевой преграды. Баллистическим пределом на рис. называется предельная скорость, ниже которой снаряд не в состоянии пробить преграду навывлет.

Если скорость соударения будет возрастать, то технологические "приёмчики" почти перестают работать. Определяющую картину в процессе взаимодействия снаряда и преграды начинают играть плотности материалов, из которых они сделаны. Прочностные свойства материалов снаряда и преграды проявляют себя лишь на заключительной стадии проникания. Кроме этого начинает проявлять себя эффект перехода в тепло части массы снаряда в процессе пробития им преграды, что несколько увеличивает диаметр отверстия после пробития. В результате снаряд лишается части своей исходной массы.

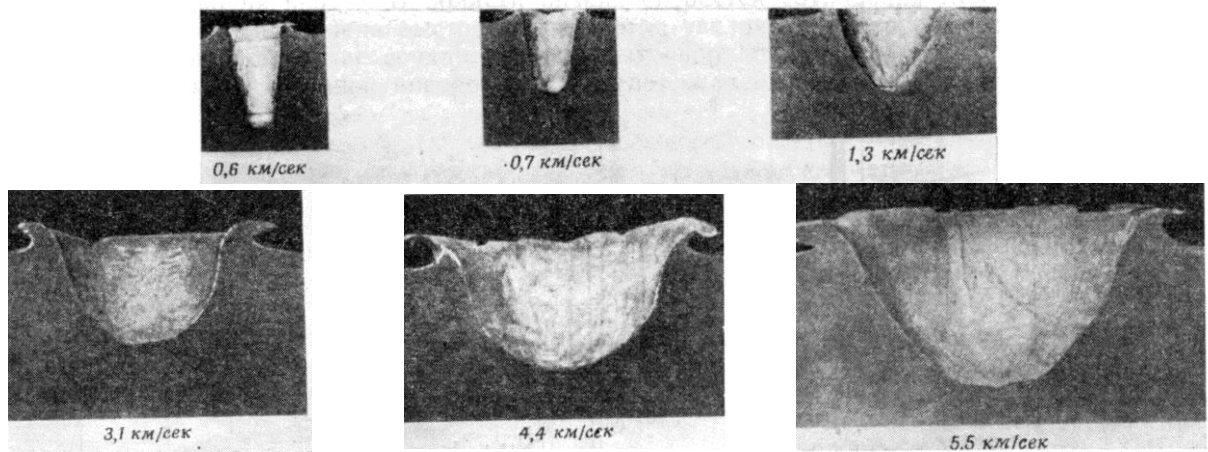


Рис. 10. Фотографии сечений кратеров (образованных в свинцовых преградах стальными снарядами, имеющими одинаковую массу, но разные скорости), иллюстрирующие изменение формы кратера по мере возрастания скорости удара

На скоростях свыше 3 – 4 км/с физика процесса снова меняется. Чем больше скорость удара, тем большую роль начинают играть ударные волны и волны разряжения, возникающие при взаимодействии снаряда и преграды. Эти волны разбрасывают материал взаимодействующих тел в разные стороны. Поэтому снаряды малой массы (десятые доли – единицы граммов), даже пробив преграду, разрушаются на множество мелких частиц. На этом явлении построена система противометеорной защиты космических кораблей. Одна из конструктивных схем такой защиты выглядит следующим образом. Она состоит из первой преграды, которая представляет собой пластину алюминиевого сплава толщиной 1 – 2 мм, или же делается из стальной сетки. Вторая защитная преграда состоит из нескольких слоёв бронезиловатной ткани (некстел, кевлар). Общая толщина преграды составляет не более 110 мм. Преграды такого типа называются разнесёнными. Даже если метеор пробивает первую преграду, то он разрушается практически в пыль, частичкам которой уже не хватает энергии для пробития второй преграды. Более крупные снаряды (десятки граммов и более) тоже дробятся на множество осколков, проникающая способность которых относительно невелика. Диаметр отверстия в преграде растёт ещё больше.

Зависимость суммарной толщины разнесённых преград, пробиваемых одним и тем же поражающим элементом, от скорости удара приведена на рис. Материал преграды – алюминий, материал снаряда – сталь. Из этой зависимости следует, что увеличение скорости встречи приводит к уменьшению, а не к увеличению пробиваемости разнесённой преграды.

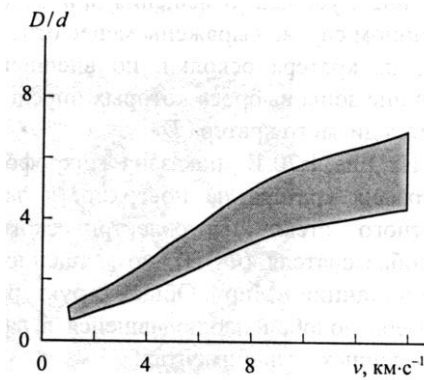


Рис. 11. Зависимость отношения диаметра кратера D к диаметру снаряда d от скорости снаряда v .

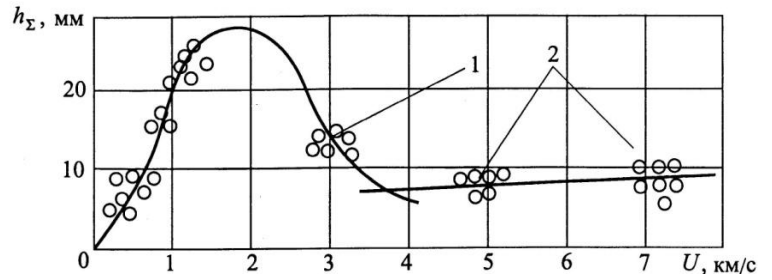


Рис. 12. h_{Σ} – суммарная толщина разнесённой преграды; U – скорость удара; 1 и 2 – экспериментальные точки

Когда скорость соударения переваливает за 10 км/с, то снаряд и преграда ведут себя уже не как твёрдые тела, а как жидкости. Снаряд "расплёскивает" материал мишени и сам при этом "срабатывается". Именно так действует кумулятивная струя. Из-за высоких температур происходит частичная ионизация вещества в зоне соударения. Диаметр канала в веществе мишени существенно (в 4 – 5 раз и более) превышает калибр снаряда. При дальнейшем увеличении скорости процесс ионизации идёт всё более интенсивно. Интересно отметить, что именно на такой скорости (10,2 км/с) предполагалась встреча медного ударного модуля, в виде шарового сегмента массой 370 кг, с ядром кометы Tempel 1 в рамках эксперимента Deep Impact, выполненного в июле 2005 г. Ожидалось, что диаметр кратера составит 80 – 100 м, а глубина 30 – 40 м. После столкновения оценки изменились – диаметр кратера 200 м, а глубина 50 м.

Высокоскоростной удар при скоростях соударения больших 20 км/с (так называемый гиперскоростной удар) изучен недостаточно. Качественная картина состоит в том, что в пределе (на очень большой скорости соударения порядка сотен км/с) картина взаимодействия поражающего элемента и преграды, по всей видимости, стремится к картине, которая характерна для воздействия на вещество плазменных сгустков. Но при прочих равных условиях, поражающий эффект такого соударения всё же больше, поскольку всё вещество снаряда практически мгновенно превратится в плазму более плотную, чем та, которую можно получить в специальных ускорителях плазмы. Косвенно результат гиперскоростного удара мы можем оценить по размерам кратеров на поверхности ближайших к нам планет без атмосферы – Луны и Меркурия.

Из вышеизложенного следует, что в общем случае, при достаточно высокой скорости соударения, в области удара вещество присутствует одновременно в твёрдом, жидком и газообразном состояниях, причём пар может быть сильно ионизирован. Схема этого процесса изображена на рис. 13.

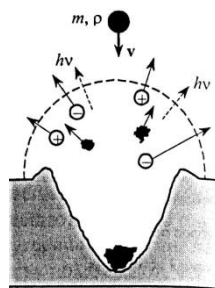


Рис. 13. Схема образования кратера в пластичной мишени

На этом рисунке обозначены процессы выброса фрагментов вещества, эмиссии заряженных частиц и квантов электромагнитного излучения, а также показаны остатки снаряда на дне кратера.

Завершая разговор о твердотельных боеприпасах, хотелось бы дать определённые пояснения по поводу примеров, приведённых для иллюстрации взаимодействия твердотельного снаряда с преградой. С одной стороны, на рис. 10 приведены фотографии кратеров, образованных в преграде стальным снарядом при столкновении на скоростях 0,6 – 5,5 км/с. С другой стороны, в тексте говорится о том, что на скоростях 3 – 10 км/с снаряд разрушается, пробивая тонкую преграду.

Дело в том, что на фото показан результат взаимодействия снаряда с так называемой полубесконечной преградой, а в тексте описывается воздействие снаряда на преграду конечной толщины. В контексте высокоскоростного удара под полубесконечной понимают преграду настолько толстую, что это позволяет пренебречь интерференцией ударных волн и волн разгрузки, которые возникают при отражении первичной ударной волны от противоположной стороны преграды. Наиболее наглядное различие при взаимодействии снаряда и преграды на высоких скоростях состоит в том, что диаметр кратера в полубесконечной преграде больше, чем диаметр отверстия в преграде конечной толщины. Ещё одним отличием этих двух видов преград является то, что в преграде конечной толщины в результате удара может возникнуть откол материала с тыльной стороны преграды (рис. 14).



Рис. 14. Образование откола на тыльной поверхности преграды толщиной L

Откол приводит к тому, что твердотельный снаряд, даже не пробив преграду, может нанести повреждения оборудованию и экипажу цели. Подобный эффект может возникнуть не только в результате воздействия твердотельного снаряда, но и при воздействии на преграду ударной волны, плазменного сгустка, мощного импульса лазерного или микроволнового излучения, а также пучка заряженных частиц. Кроме того, согласно эмпирическому правилу, из-за откола, а также по другим причинам, связанным с распределением ударных нагрузок, твердотельный снаряд, имеющий одну и ту же скорость, способен пробить в 1,5 раза большую преграду конечной толщины, чем глубина проникания этого же снаряда в полубесконечную преграду.

Кумулятивные снаряды это снаряды, предназначенные для поражения цели путём создания узконаправленной струи продуктов взрыва ВВ и металла облицовки кумулятивной выемки с высокой пробивной способностью. Как уже говорилось выше, скорость кумулятивной струи очень высока (10 – 15 км/с). Кумуляцией называется эффект концентрации энергии в определённом направлении или в определённом месте. Этот эффект получается при использовании зарядов, имеющих на одном из концов полость – кумулятивную выемку, которая покрывается металлической облицовкой для усиления эффекта кумуляции. Разновидностью кумулятивных снарядов являются снаряды, которые формируют не кумулятивную струю, а так называемое ударное ядро. Это компактная металлическая форма, образующаяся в результате сжатия металлической облицовки кумулятивного заряда продуктами его детонации. Скорость ударного ядра не так высока, как у кумулятивной струи (2 – 4 км/с), однако масса более значительна – до 95% от массы облицовки (кумулятивная струя, пробивающая преграду, имеет массу порядка 10 – 20% от массы облицовки). Кумулятивная струя может пробить стальную преграду, толщиной 9 – 10 калибров снаряда (т.е. снаряд калибром 100 мм может пробить 900 – 1000 мм стали). Ударное ядро не обладает столь высокой пробивной способностью (0,5 – 0,8 калибров снаряда), однако вполне возможно подобрать параметры кумулятивного заряда таким образом, чтобы получить сочетание приемлемой глубины проникания с достаточной массой формируемого поражающего элемента.

Вместе с тем, вполне возможно формирование так называемых распылённых (не сплошных, фрагментированных) кумулятивных струй, движущихся со скоростями порядка

многих десятков километров в секунду. Так в середине прошлого века были описаны эксперименты с получением кумулятивных струй, скорость которых достигала 90 км/с.

Недостатки кумулятивного снаряда проявляются, прежде всего, в том, что в момент контакта с целью необходимы строго определённые геометрические соотношения системы "снаряд – преграда", для того, чтобы глубина проникания струи была максимальной. Кумулятивный заряд должен сработать на так называемом "фокусном расстоянии" от преграды, иначе глубина внедрения струи резко уменьшится. В меньшей степени это относится к снарядам, образующим ударное ядро, однако и им нужно некоторое время и пространство для формирования этого самого ударного ядра. Это делает кумулятивный снаряд чувствительным к высокоскоростному контакту с целью, ограничивая максимально допустимую скорость контакта временем и условиями формирования струи. Ударного ядра это касается в меньшей степени.

Другим негативным фактором, уменьшающим глубину проникновения кумулятивной струи в преграду, является её расфокусировка в том случае, если кумулятивный боеприпас в момент подрыва быстро вращается. При скорости вращения 20'000 об/мин глубина проникания кумулятивной струи современных боеприпасов может уменьшаться на 60%, а в некоторых случаях и более. Примерный порог скорости вращения современного кумулятивного заряда, не приводящий к потере глубины пробития, составляет 1000 – 1500 об/мин. Ударное ядро тоже теряет пробивную способность при быстром вращении, но в гораздо меньшей степени, чем кумулятивная струя (потери не более 30% при 20'000 об/мин).

Фугасные снаряды это боеприпасы, предназначенные для поражения цели ударной волной. В их теперешнем виде (металлический корпус + взрывчатка + взрыватель) они вряд ли будут востребованы для боя в космосе. Слишком широк диапазон скоростей встречи с целью для того, чтобы можно было обеспечить прочность и своевременный подрыв фугасного снаряда современной конструкции. Но этот вывод касается современных снарядов. Вполне возможно, что в будущем удастся создать взрывчатое вещество с такими же механическими свойствами, как у высокопрочных сплавов. Этакий "взрывающийся металл". На основе такой взрывчатки уже можно попытаться создать фугасный боеприпас, пригодный для космических баталий. Однако это даже не главное. Ударная волна образуется от передачи энергии детонации окружающей газовой атмосфере. В космосе атмосферы нет, поэтому классические фугасные снаряды потеряют практически всю свою боевую эффективность.

Другой вариант – плазменный фугасный снаряд. Его принцип действия может быть основан на эффекте взрыва проводника сильным электрическим током. Об этом эффекты мы уже упоминали ранее, когда речь шла о химических ускорителях массы. Упрощённо конструкция такого боеприпаса выглядит следующим образом.

В корпус помещается проволочная сборка, жидкость специального химического состава, конденсаторная батарея (условно назовём накопитель энергии так) и взрывательное устройство. Конденсаторная батарея снаряда может заряжаться в разное время: перед выстрелом, в процессе выстрела, или при контакте с целью. Поражающим фактором такого снаряда служит высокотемпературная плазма, образующаяся после подрыва проволочной сборки электрическим током в среде специальной жидкости. Как уже говорилось, энергетический эффект плазменного боеприпаса может в десятки и сотни раз превышать аналогичное действие обычной взрывчатки.

Кто знает, возможно, в будущем удастся объединить оба эти типа боеприпасов. К примеру, создать "металлическую взрывчатку", которая превращается в плазму при воздействии мощного импульса электрического тока, или другой вариант – специальный материал, обеспечивающий взрыв при контакте с целью.

Кроме того, возможно, что в будущем будет востребован фугасный боеприпас на основе объёмно детонирующих взрывчатых веществ (ОДВВ). Ещё бытует такое вульгарное название этого оружия как "вакуумная бомба".

Действует боеприпас, оснащённый ОДВВ так: в воздухе расплывается горючее, а потом это облако топливовоздушной смеси подрывается. По фугасному действию ОДВВ в 4 – 6 раз мощнее тротила даже несмотря на то, что скорость детонации последнего в 2 – 4

раза больше. Это потому, что у "объёмной взрывчатки" гораздо дольше длится импульс давления. Естественно, возникает вопрос, насколько эффективным будет такой боеприпас в космосе? Откуда возьмётся ударная волна? Тут не всё так безнадежно, как в случае с обычным фугасным снарядом. Дело в том, что распылять ОДВВ в стороне от цели в космическом пространстве действительно нет смысла. Эффект будет нулевой. Однако, имеет смысл перед подрывом "окутать" цель облаком такой взрывчатки. Давление внутри облака может достигать до нескольких десятков тонн на квадратный сантиметр, и размеры оно может иметь весьма солидные. Так, для заряда ОДВВ массой 33 кг диаметр облака достигает 30 м. Что же касается необходимости воздуха (т.е. окислителя) для формирования облака, то специальный космический боеприпас может иметь горючее и окислитель, как говорится, "в одном флаконе". Более трудным представляется процесс формирования в космосе газовой смеси с нужной концентрацией реагентов. Но это чисто техническая проблема. Как вариант – простейший способ: формирование смеси в тонкой, прочной и эластичной оболочке больших размеров. Этот "мешок" облегает цель и подрывается.

А ещё крупнокалиберные боеприпасы объёмного взрыва могут служить источником серьёзного психологического эффекта при их применении на планетах с атмосферой. Ведь только специалист может отличить взрыв мощного объёмно детонирующего боеприпаса от ядерного взрыва.

Однако, кроме достоинств, у боеприпасов объёмного взрыва есть и недостатки. Во-первых, скорость сближения боеприпаса с целью играет немаловажную роль для эффективного применения такого оружия. Она не должна быть слишком большой для того, чтобы все процессы образования и подрыва облака ОДВВ успели произойти правильно. Во-вторых, их не имеет смысла делать малого калибра из-за особенностей процессов, приводящих к возникновению детонации во взрывчатом облаке. Поэтому ОДВВ больше подходят для начинки "космических бомб", чем артиллерийских снарядов.

Теперь перейдём к рассмотрению наиболее мощных, на сегодняшний день, фугасных боеприпасов – ядерных. Чаще всего нам давали следующую разбивку распределения энергии наземного ядерного взрыва по его поражающим факторам: ударная волна – 50%, световое излучение – 35%, радиоактивное заражение – 10%, проникающая радиация – 4%, электромагнитный импульс – 1%. А между тем, в космосе ядерные боеприпасы чисто фугасными являются далеко не всегда.

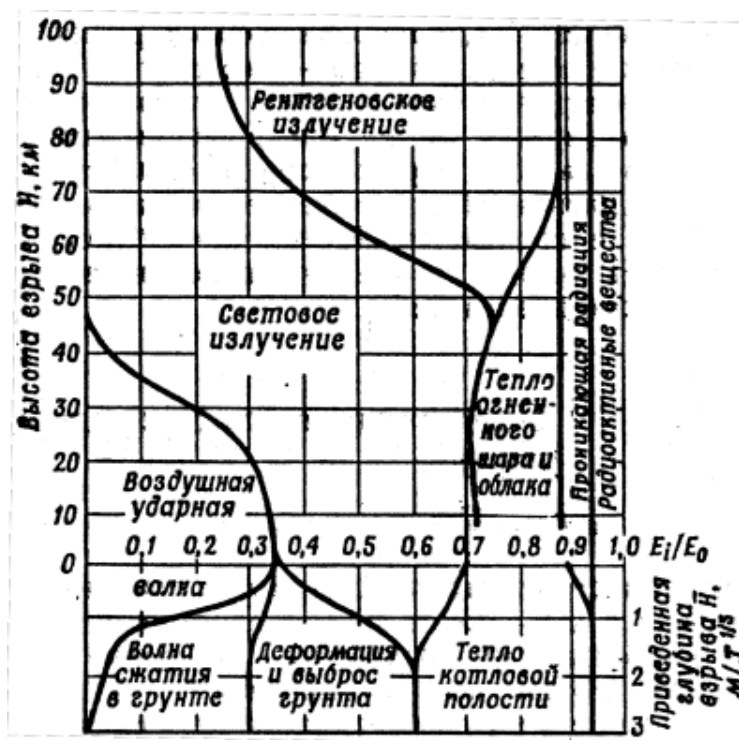


Рис. 15. Фазовая диаграмма распределения энергии ядерного взрыва

На рис. 15 показана фазовая диаграмма, показывающая доли энергии ядерного взрыва, приходящиеся на его поражающие факторы в разных условиях применения. Из этой диаграммы понятно, что в космосе ядерное оружие работает совсем не так, как в атмосфере.

В космосе, где нет воздуха, а стало быть, и полностью отсутствует ударная волна на первое место выходят нейтроны и гамма-лучи. При взрыве термоядерной боевой части мощностью 1 Мт высвобождается огромная энергия ($4 \cdot 10^{15}$ Дж), которая превращает корпус боевой части в плазму с температурой 10^7 К. Плазменный шар-вспышка является источником жёстких рентгеновских лучей. Гамма-лучи соседствуют по частоте с этими лучами, поэтому деление излучений на виды в процессе взрыва – процесс малоизученный и чисто условный. Эти лучи составляют примерно 67% всей энергии взрыва. В результате в космосе на удалении 7,2 км от места взрыва рентгеновские лучи доставляют на 1 см^2 площади цели около $4 \cdot 10^4$ Дж в одну миллионную долю секунды. Кроме того, взрыв такой мощности создаёт поток нейтронов, способный вывести из строя полупроводниковые радиоэлектронные системы такого защищённого объекта, как ядерная боеголовка, на расстоянии 29 км и привести к серьёзным неполадкам в них на дальности 100 км. А ведь хрущёвская "Кузькина мать" (самая мощная термоядерная бомба за всю историю человечества) имела мощность почти в 60 Мт! Сделать бомбу хоть в 100, хоть в 1000 Мт не проблема уже сейчас. А в будущем наверняка найдут возможность не только поднять тротиловый эквивалент, но и увеличить процентный выход рентгеновского излучения при ядерном взрыве. Необходимо отметить, что при взрыве в дальнем космосе доля энергии в виде рентгеновского излучения ещё более вырастет и составит 70 – 80% от полной энергии взрыва. Ещё 8 – 10% выделится в виде нейтронного излучения.

Но и это ещё не всё. При прямом попадании или при близком взрыве ядерная боеголовка может поразить цель потоком плотной плазмы, которая образуется из вещества корпуса боеголовки. Не смотря на то, что при поверхностном взрыве в цель уходит менее 10 % его энергии, этого вполне достаточно для уничтожения цели с любой степенью защиты. В перспективе вполне могут быть созданы специальные ядерно-плазменные боеприпасы с толстым корпусом и большим выходом плазмы при взрыве, рассчитанные на прямое попадание в цель, а также ядерно-кумулятивные боеприпасы, способные концентрировать энергию взрыва в каком-то определённом направлении подобно тому, как это делают современные кумулятивные заряды.

В заключении разговора о ядерных боеприпасах нужно сказать пару слов о таком поражающем факторе ядерного взрыва, как электромагнитный импульс. При взрыве в атмосфере он проявляет себя очень ярко, выводя из строя электронные приборы на достаточно большом расстоянии от места взрыва. Природа этого поражающего фактора такова: гамма-лучи выбивают из атомов окружающего газа быстрые электроны, которые и формируют электромагнитный импульс, выводя из строя окрестную аппаратуру. А поскольку в атомах недостатка нет, то и электронов выбивается много. Импульс получается мощным. В космосе же "вышибать" эти быстрые электроны не из чего, кроме как из цели, которую поражает ядерный боеприпас, да из корпуса этого самого боеприпаса. Этого явно недостаточно для получения мощного потока электронов, поэтому импульс получается "хиленьким" и им вполне можно пренебречь.

Осколочные снаряды. Как следует из названия – основным поражающим фактором таких боеприпасов является поток твердотельных осколков. Воздействие потока осколков на цель отличается от воздействия одиночного осколка. При множественном воздействии проявляется эффект накопления ущерба, в результате чего общий итог воздействия на цель оказывается выше (глубина проникания выше на 10 – 20%) простой суммы отдельных эффектов, что порождается следующими причинами:

- наложением (интерференцией) серии ударных волн, которые вызываются в конструктивных элементах цели каждым попавшим осколком;
- взрывными реакциями, происходящими из-за испарения части материала при проникновении поражающего элемента в цель (явление особенно заметно, когда оно возникает во внутренних полостях цели и когда серия попаданий осколков вызывает почти постоянное избыточное давление в этих полостях);
- гидроударом, возникающим при попадании осколка в ёмкость с жидкостью.

Для снаряжения осколочных снарядов, в отличие от снарядов фугасных, не нужно применять слишком мощные взрывчатые вещества, поскольку избыточно мощная взрывчатка очень сильно дробит корпус снаряда. Осколки получаются слишком лёгкие и не обладают нужной проникающей способностью. Частично решают эту проблему готовые осколки (поражающие элементы), но и они боятся чрезмерно энергонасыщенных процессов. Поэтому старая добрая обычная взрывчатка будет здесь очень даже кстати. Конструктивно осколочные снаряды могут быть выполнены очень по-разному. Нас могут интересовать несколько возможных конструктивных схем.

Снаряды, дающие направленные осколочные потоки. Нас в основном будет интересовать снаряд с осевым поражающим действием. В нём поток готовых осколков направлен вперёд по ходу движения снаряда вдоль его продольной оси, следовательно, скорость осколков складывается со скоростью снаряда. Наиболее широко известный снаряд такого типа это шрапнель.

Мультикумулятивный снаряд. Этот боеприпас состоит из множества кумулятивных зарядов, которые могут быть расположены как вдоль продольной оси, так и перпендикулярно к ней. Подобная схема применена в боевой части ракеты ЗРК С-200. Кумулятивные заряды дают увеличенную скорость поражающих элементов по сравнению с классической конструктивной схемой.

Боеприпасы с изменяемой геометрией осколочного поля. Они способны формировать осколочное поле в нужном направлении без отклонения боеприпаса от траектории. Однако, в данном случае боеприпас должен быть оснащён устройством, определяющим направление на цель.

Броневой снаряд с повышенным заброневым осколочным действием (FAP – Frangible Armour Piercer). Конечно, по современной классификации это не осколочный, а броневой снаряд. Он не содержит взрывчатки и предназначен для поражения легко бронированных целей. После пробития брони вольфрамовый сердечник снаряда фрагментируется и даёт широкий сноп осколков, поражающих экипаж и оборудование боевой машины. Однако, в нашем случае мы вполне можем отнести этот снаряд к осколочным.

Кассетные снаряды. Они являются дальними родственниками осколочных боеприпасов. Но в отличие от последних, они не поражают цель осколочным полем, а доставляют к ней подкалиберные поражающие элементы (суббоеприпасы). А вот эти самые суббоеприпасы уже и поражают цель. То есть, кассетный снаряд – это контейнер с поражающими элементами, которые в определённый момент выбрасываются из корпуса и наносят ущерб на достаточно большой площади. Причём эти элементы могут иметь очень разное конструктивное исполнение и предназначение. В одном случае, это могут быть простые болванки, похожие на сердечники современных противотанковых подкалиберных снарядов, а в другом – весьма сложные боеприпасы, имеющие собственные головки самонаведения, реактивные ускорители, взрывчатку в виде "наполнителя" и т.п.

Достоинством кассетных боеприпасов является возможность одним выстрелом убить много "зайцев", но их не рационально делать малокалиберными.

Нелетальные боеприпасы. Применяются в том случае, если стоит задача не уничтожить цель, а заставить её прекратить делать то, что она делала до сих пор, не причинив при этом серьёзных повреждений. В основном такие "штуки" применяет полиция (а могут применять и пираты), а не армия. Выражаясь современным языком – это спецсредства.

К ним относятся различные взрывные генераторы электромагнитного поля, предназначенные для функционального поражения электроники противника, т.е. в первую очередь "ослепления и оглушение" цели. Под функциональным поражением понимают временное выведение из строя, а не физическое уничтожение. Сюда же могут относиться всяческие средства лишение цели возможности маневрировать – блокировка возможности охлаждать двигатели или их временное "глушение". Лишение цели возможности применять оружие, не уничтожая турели и пусковые установки, а блокируя их. И так далее. Снаряды ускорителей массы вполне могут быть носителями подобного оборудования.

Корректируемые снаряды. Это боеприпасы, которые могут изменять первоначальную траекторию полёта для компенсации ошибок наведения и увеличения вероятности попадания в цель. Для этого на них устанавливается простейшая система управления и система изменения траектории полёта. Отличие корректируемых и самонаводящихся боеприпасов состоит в том, что первые могут изменять свою траекторию в достаточно ограниченных пределах. Возможность применения корректируемых боеприпасов в артиллерии обусловлена тем, что аппаратура таких снарядов способна выдержать очень высокие перегрузки (несколько десятков тысяч единиц) и обладает малыми габаритами. Корректируемыми можно сделать снаряды практически любого назначения, используемые в боекомплекте ускорителей массы.

Неуправляемые реактивные снаряды (НРС). Это простейшие ракеты, состоящие из реактивного двигателя, боевой части и устройства стабилизации снаряда в полёте. В атмосфере для придания снаряду устойчивости могут быть использованы как аэродинамические стабилизаторы (маленькие крылышки в хвосте снаряда), так и газодинамическая система, стабилизирующая снаряд путём придания ему быстрого вращения вокруг продольной оси. В космосе для этих целей подходит газодинамическая система или придание снаряду вращения в пусковой установке механическим способом при движении по спиралевидной направляющей.

Двигатель реактивного снаряда должен быть дешёв, надёжен, прост в производстве и эксплуатации. Всем этим требованиям отвечает твердотопливный реактивный двигатель. Однако, он обладает малым удельным импульсом, – менее 3'000 м/с, – и вряд ли стоит рассчитывать в будущем на существенный рост этого параметра. Удельный импульс – характеристика реактивного двигателя, равная отношению создаваемого им импульса (количества движения) к расходу топлива (обычно массовому, но может соотноситься и, например, с весом или объёмом топлива). Чем больше удельный импульс, тем меньше топлива надо потратить, чтобы получить определённое количество движения. Теоретически удельный импульс равен скорости истечения продуктов сгорания, фактически может от неё отличаться. Поэтому удельный импульс называют так же эффективной (или эквивалентной) скоростью истечения. Так вот, современные твердотопливные двигатели обладают наименьшим удельным импульсом, из всех использующихся в настоящее время реактивных двигателей. Для сравнения – у жидкостных реактивных двигателей удельный импульс может достигать до 5'000 м/с, у ядерных реактивных двигателей он более 10'000 м/с, а у электроракетных двигателей свыше 20'000 м/с. Однако, все эти двигатели менее надёжны, сложнее в производстве и эксплуатации, а также дороже по стоимости, чем двигатели твердотопливные. Все перечисленные факторы делают твердотопливный двигатель наиболее предпочтительной силовой установкой для неуправляемых реактивных снарядов.

Повысить удельный импульс двигателя при приемлемом увеличении его стоимости позволяет использование так называемых гибридных ракетных двигателей (ГРД). Это химические ракетные двигатели, использующие компоненты ракетного топлива, находящиеся в разных агрегатных состояниях. К примеру, окислитель может быть жидким, а горючее твёрдым (а может быть и наоборот). На рис. 16 приведена схема реактивного снаряда с ГРД. Удельный импульс ГРД может превышать 4'000 м/с.

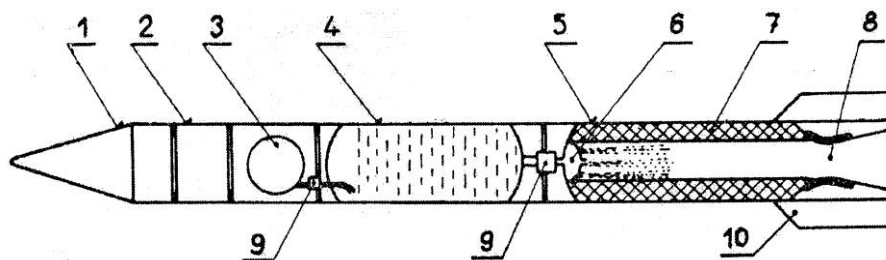


Рис. 16. Схема реактивного снаряда с гибридным ракетным двигателем

1 – боевая часть; 2 – блок управления (отсутствует у НРС); 3 – баллон со сжатым газом; 4 – бак с окислителем; 5 – камера сгорания; 6 – форсунка окислителя; 7 – твёрдое горючее; 8 – сопло с графитовой вставкой в критическом сечении; 9 – газовый редуктор; 10 – аэродинамические стабилизаторы

В качестве боевой части на реактивный снаряд можно устанавливать все без исключения вышеперечисленные виды боеприпасов, в том числе и ядерные. Кроме того, в неуправляемом реактивном снаряде в качестве взрывчатого вещества могут быть использованы несгоревшие остатки специального твёрдого топлива, обладающего способностью детонировать.

Для запуска НРС не требуется тяжёлого, сложного и дорогого орудия, а достаточно лёгкой и недорогой пусковой установки, которая, к тому же, может быть многоствольной, позволяющей вести залповый огонь.

Недостатками неуправляемых реактивных снарядов являются малая скорость движения (около 1 км/с) и не слишком хорошие показатели точности стрельбы. Это делает НРС оружием ближнего боя.

Ускорители плазмы

В контексте космического оружия это устройства для получения и ускорения плазменных сгустков до скоростей порядка 10 – 1000 км/с и более. Плазменные потоки с большими скоростями можно получить разными способами. Например, воздействием лазерного луча на твёрдое тело. Однако к собственно плазменным ускорителям относят лишь устройства, в которых ускорение и (обычно) одновременное приготовление плазмы осуществляются за счёт электрической энергии. Ускорители плазмы, применяемые как оружие, являются разновидностью электромагнитных ускорителей массы, поскольку плазменный сгусток можно рассматривать как сплошную среду. На нижнем пределе энергии ускорители плазмы соседствуют с генераторами низкотемпературной плазмы – плазматронами, а на верхнем с коллективными ускорителями заряженных частиц (в них ускорение достигается не внешним магнитным полем, а с помощью полей, создаваемых другими частицами). То есть ускорители плазмы являются переходной ступенью между ускорителями массы и оружием направленной передачи энергии. Имеется достаточно много конструктивных схем, в соответствии с которыми достигается эффект ускорения плазменных потоков и плазменных сгустков.

Поскольку плазменный поток это оружие "ну очень ближнего боя", то нас будут интересовать только ускорители плазменных сгустков, конструктивное исполнение которых может быть весьма различным. Мы упомянем только некоторые из них.

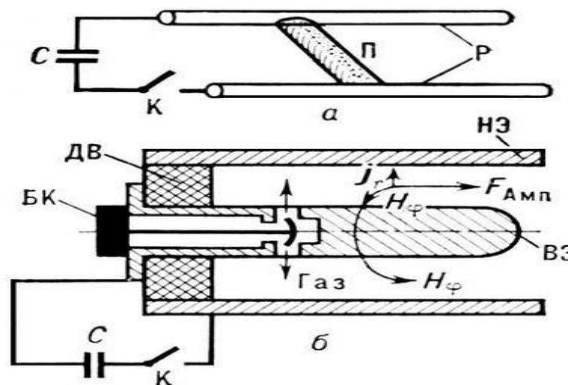


Рис. 17. Схемы рельсотронов

а – классическая схема рельсотрона: Р – рельсы; П – плазменная перемычка; С – ёмкость; К – ключ;
б – схема коаксиального импульсного плазменного ускорителя. Быстродействующий клапан БК подаёт газ в зазор между внутренним ВЭ и наружным НЭ электродами (ДВ – диэлектрическая вставка между электродами). После замыкания ключа К в цепи возникает ток, который ионизует газ.

Ускорители плазмы на основе рельсотрона. Такие системы можно создавать как на основе классической "рельсы", так и на основе коаксиальной схемы. В последнем случае ускорение сгустка плазмы происходит под действием силы Ампера, возникающей при взаимодействии радиальной составляющей тока с азимутальным собственным магнитным полем. Такие ускорители уже нашли широкое применение и позволяют

получать сгустки со скоростями до 10'000 км/сек и общим числом частиц до 10^{18} (для неона это порядка 2-х миллиграммов в массовом эквиваленте). В будущем эти параметры могут быть существенно повышены.

Кроме рельсотрона, ускорители плазмы можно создавать и на основе "гауссовки". Они называются **индукционными ускорителями**. Ускорение плазменного сгустка в них происходит за счёт давления электромагнитной волны, падающей на этот плазменный сгусток.

Основным поражающим фактором плазменного сгустка является внедрение в мишень ионов плазмы с последующим распылением вещества мишени за время порядка 10^{-11} – 10^{-10} с. Эффективность этого процесса обычно характеризуется коэффициентом распыления, равным отношению числа распылённых атомов к числу падающих ионов. Этот коэффициент растёт с ростом атомной массы ионов. Так при воздействии на мишень ионов газа неон коэффициент распыления почти на два порядка больше, чем при воздействии ионов гелия (для неона он равен 6, а для гелия <0,1 при условии, что материал мишени - медь).

Глубина проникновения ионов плазменного сгустка в вещество мишени может достигать нескольких сантиметров и зависит от химического состава, скорости столкновения и температуры плазменного сгустка. Кроме того, в результате воздействия плазменного сгустка вещество мишени плавится, а также возникают мощные волны растяжения и сжатия, что приводит к ещё большим разрушениям.

После вылета сгусток сохраняет целостность из-за его остаточной намагниченности. Однако время жизни плазменного сгустка невелико. Это происходит из-за того, что в процессе движения его характеристики меняются. Некоторое время (доли секунды) после вылета из ускорителя форма и размеры сгустка поддерживаются в исходном состоянии за счёт эффекта так называемой "вмороженности" магнитного поля в вещество сгустка. Затем, из-за уменьшения напряжённости магнитного поля, наблюдается общее "разбухание" сгустка с потерей его удельной энергетике. Кроме этого, происходит уменьшение его энергосодержания из-за потерь на излучение и рекомбинацию (процесс, обратный ионизации – захват свободного электрона ионом). Это ограничивает дальность стрельбы таких систем и является главным недостатком ускорителей плазмы. Однако, в будущем эти проблемы будут в во многом решены. Оптимизм здесь внушает такой природный эффект, как шаровая молния, являющаяся долгоживущим плазменным образованием. Изучение шаровой молнии ведётся уже давно. Исследования начал ещё Никола Тесла в конце XIX века. А пока что, при прочих равных условиях предпочтительно, чтобы размер плазменного сгустка был достаточно большим из-за того, что его время жизни увеличивается пропорционально квадрату характерного размера сгустка.

Оружие направленной передачи энергии

Под оружием направленной передачи энергии мы будем подразумевать такое оружие, поражающее действие которого осуществляется излучаемой энергией, сконцентрированной в узком пучке и использующее в качестве основного поражающего фактора термомеханическое воздействие на живую силу и военную технику с поверхностным и объёмным характером поражения.

Преимуществами ОНПЭ являются:

- очень высокая скорость переноса энергии соизмеримая со скоростью света (а в случае лазерного оружия равная ей);
- гравитационные поля очень мало влияют на траекторию пучков релятивистских частиц;
- большая дальность поражения, ограниченная лишь невозможностью создать строго параллельный пучок электромагнитных волн или заряженных частиц.

В этом документе мы рассмотрим три разновидности такого оружия.

1. Оружие направленной передачи энергии с выделением энергии в поверхностном слое мишени (ОНПЭП).
2. Оружие направленной передачи энергии с глубоким проникновением энергии в материал мишени (ОНПЭГ).
3. Энергетическое оружие на основе мощных импульсов электромагнитного излучения (СВЧ оружие).

Оружие направленной передачи энергии с выделением энергии в поверхностном слое мишени (ОНПЭП). Под поверхностным слоем мишени мы будем понимать слой толщиной не более десятых долей миллиметра. Ведь именно в таком слое за время действия импульса ОНПЭП происходит расплавление и/или испарение вещества мишени.

В эту группу оружия направленной передачи энергии следует отнести лазеры и другие виды энергетического оружия с аналогичным воздействием на материал цели, например такое оружие, которое использует частицы сравнительно небольших энергий. Поскольку подобное оружие эффективно воздействует на поверхностный слой материала, то его воздействие хорошо разрушает относительно тонкостенные оболочки.

Само название "лазер" это акроним, образованный от английской фразы light amplification by stimulated emission of radiation (усиление света посредством вынужденного излучения).

Диапазон излучения современных лазеров охватывает большой диапазон (рис. 18) – от инфракрасных волн до рентгеновского излучения. В будущем наверняка будут освоены диапазоны более коротких волн.

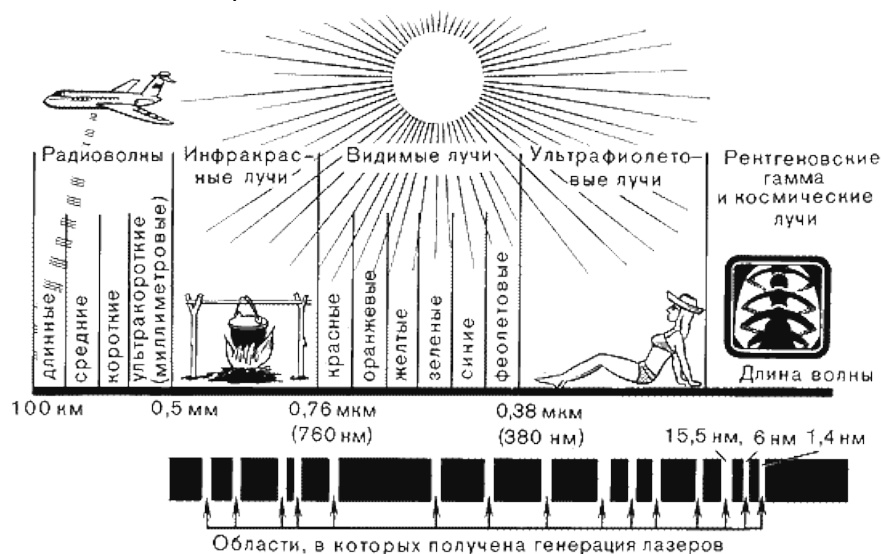


Рис. 18. Диапазон излучения современных лазеров

Несмотря на то, что лазерный луч является самым тонким и узким явлением в окружающей нас природе, однако и в нём фотоны не распространяются параллельно, а расходятся, подчиняясь законам оптики. Сузить луч можно только уменьшая рабочую длину волны лазера, что наглядно демонстрирует диаграмма на рис. 19.

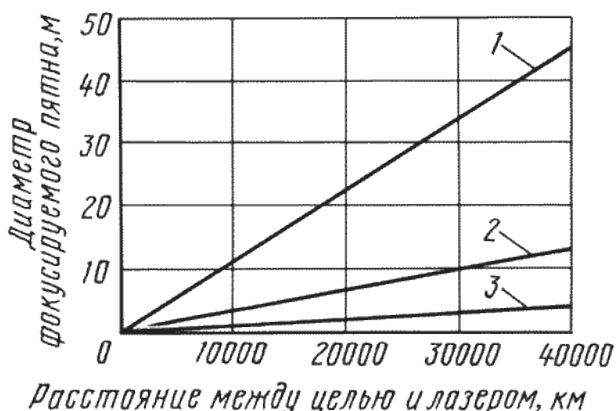


Рис. 19. Зависимость диаметра фокусируемого пятна от длины волны лазера
 1 – луч с длиной волны 50 мкм; 2 – луч с длиной волны 4 мкм; 3 – луч с длиной волны 0,5 мкм

Существует большое количество видов лазеров, работающих на разных физических принципах и использующих в качестве рабочей среды все агрегатные состояния вещества. Некоторые типы лазеров, могут генерировать целый набор частот в широком

спектральном диапазоне. Выходная мощность современных лазеров может изменяться от милливаттного уровня в маломощных непрерывных лазерах до нескольких мегаватт в мощных непрерывных лазерах и до 100 ТВт в импульсных лазерах. В будущем этот диапазон ещё более вырастет, особенно в сторону увеличения выходной мощности. Диапазон длительности импульсов, получаемый в современных лазерах, находится в пределах от миллисекунд (10^{-3} с) до фемтосекунд (10^{-15} с). Габариты различных видов лазеров изменяются в необычно широких пределах: от нескольких микрон до нескольких десятков метров (а один из самых длинных лазеров, который использовался в геодезии, имел длину 6,5 км!). Номенклатура видов лазеров весьма широка. Мы кратко упомянем только наиболее общую их классификацию.

Твердотельные лазеры. Это лазеры, активной средой которых является диэлектрический кристалл или стекло. Разновидностью твердотельных лазеров являются лазеры на центрах окраски, волоконные и полупроводниковые лазеры. В лазерах на центрах окраски активной средой служат ионные кристаллы с дефектами кристаллической решётки, поглощающими свет в той спектральной области, в которой собственное поглощение кристалла отсутствует. Эти дефекты и называются центрами окраски. В полупроводниковых лазерах в качестве рабочего вещества используется полупроводник, а в волоконных – оптическое волокно. Кроме этого к твердотельным лазерам относятся лазеры на вибронных кристаллах (например, титан-сапфировый лазер). Преимуществами твердотельных лазеров является простота конструкции и высокий КПД (у полупроводниковых лазеров).

Жидкостные лазеры (лазеры на красителях). К ним относятся лазеры, в которых активная среда представляет собой растворы определённых соединений органических красителей в жидком растворителе, таком как этиловый спирт, метиловый спирт или вода. В настоящее время их постепенно вытесняют твердотельные лазеры, однако, не будем зарекаться. В будущем всё может измениться.

Газовые лазеры. В этих лазерах в качестве активной среды используется вещество, находящееся в газообразном состоянии. Состоит из сосуда с газом помещенного в оптический резонатор. К достоинствам газовых лазеров относятся дешевизна вещества рабочей среды, высокая энергетическая эффективность и возможность работы в непрерывном режиме. Разновидностями газового лазера являются газодинамические лазеры, химические лазеры и эксимерные лазеры. К этому же виду лазеров относятся лазеры на вращательных переходах, лазеры на колебательно-вращательных переходах и лазеры на электронных переходах в газовой среде.

Рентгеновские лазеры. Это источники когерентного электромагнитного излучения в рентгеновском диапазоне волн. В рентгеновских лазерах в качестве активной среды обычно используется горячая плазма, получаемая с помощью ядерного взрыва, или мощного лазерного излучения.

Лазеры на свободных электронах. Принцип действия лазера на свободных электронах состоит в следующем. Электронный пучок, движущийся со скоростью, близкой к скорости света, пропускается через магнитное поле, создаваемое периодической структурой – набором магнитов, который называется «магнитной гребёнкой» или вигглером. Процесс вынужденного излучения происходит за счёт взаимодействия электромагнитного поля с релятивистскими электронами, движущимися в вигглере. Энергия электронов может меняться в самых широких пределах. Это позволяет сравнительно легко варьировать длину волны излучения от инфракрасного до жёсткого рентгеновского.

Гамма лазеры. Это лазеры, являющиеся источником электромагнитного излучения гамма диапазона и работающие на использовании энергии атомных ядер. В настоящее время ведутся теоретические исследования в области создания гамма лазеров, однако рабочего образца пока что создать не удалось. Это связано прежде всего с тем, что для гамма лазера очень трудно создать систему накачки достаточной эффективности. Подобное ограничение вызвано повышением частоты квантов на 4 – 5 порядков по сравнению с оптическим диапазоном. Кроме этого, на несколько порядков сложнее

добиться приемлемого коэффициента усиления для гамма излучения по сравнению с оптическим излучением.

На рис. 20 показаны диапазоны длин волн, перекрываемые существующими лазерами.

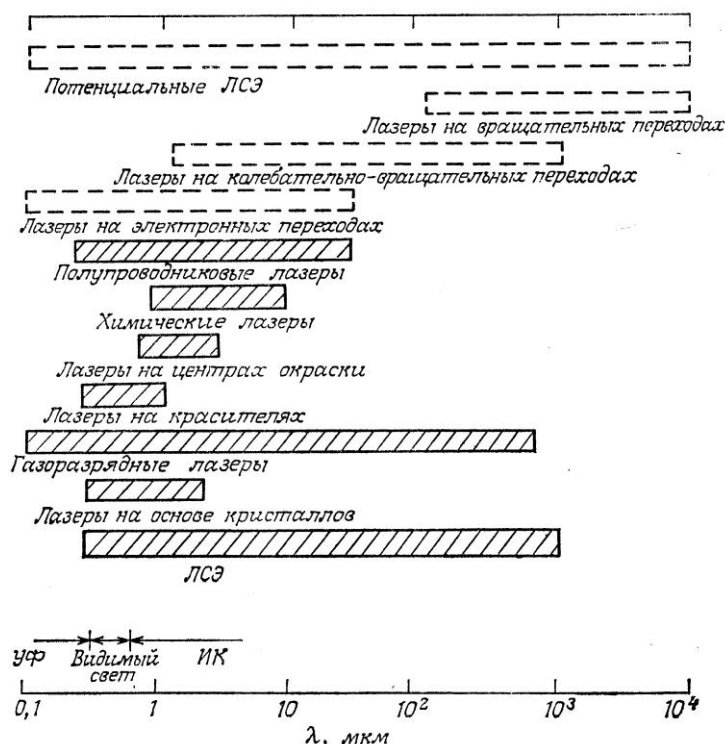


Рис. 20. Диапазон длин волн, перекрываемый существующими лазерами

В настоящее время лазеры в военных целях применяют достаточно широко. Однако о непосредственном боевом применении энергетических свойств лазерного излучения на сегодняшний день речи не идёт. В современных армиях широко используются лазерные дальномеры, локаторы, целеуказатели, линии связи – то есть вспомогательные средства, позволяющие повысить точность применения существующего оружия. Есть вполне реальная возможность использования лазеров как нелетального средства, ослепляющего живую силу противника. Однако в настоящее время такое оружие запрещено международными соглашениями.

Большая часть разработок лазерного оружия как средства силового поражения цели (разрушения, вывода из строя) было связано с американской программой Стратегической Оборонной Инициативы (СОИ), которая была более известна в широкой общественности как программа "Звёздных войн".

Наиболее перспективными с точки зрения физического разрушения межконтинентальных баллистических ракет и их боеголовок, по мнению разработчиков программы СОИ, были четыре типа лазеров.

1. Химические лазеры на фтористом водороде.
2. Экцимерные лазеры.
3. Рентгеновские лазеры с накачкой от ядерного взрыва.
4. Лазеры на свободных электронах.

Подобный выбор был обусловлен тем, что именно эти типы лазеров могут создавать достаточно высокую плотность энергии, обеспечивающую поражение баллистических ракет и их боеголовок. Так порог поражения корпуса ракеты, покрытого специальным "противолазерным" покрытием составляет 20 – 30 кДж/см², а порог поражения боеголовки может доходить до 100 кДж/см².

В будущем количество типов боевых лазеров, скорее всего, возрастет. К перечисленным выше добавятся твердотельные и газовые лазеры более совершенной конструкции, а также гамма лазеры. Однако, в номенклатуру вооружения космических кораблей скорее всего войдут только твердотельные лазеры, лазеры на свободных электронах и гамма лазеры. Это связано с тем, что принципиальным недостатком газовых лазеров всех типов является выделение тепла в их рабочем объеме. Это ограничивает повышение мощности на единицу массы таких лазеров. Они требуют интенсивного охлаждения и не могут обеспечить высокую плотность энергии на больших расстояниях порядка 100 тыс. километров. Кроме того, газовые лазеры не могут обеспечить малой длины волны излучения по сравнению с лазерами на свободных электронах и тем более гамма лазерами. Стремление использовать в лазерном оружии коротковолновое излучение связано с тем, оно обладает более высокой энергетикой и хорошо поглощается любыми материалами. Например, полированное титановое покрытие почти полностью отражает ИК-излучение, но поглощает ультрафиолет.

Теперь рассмотрим механизм воздействия мощного лазерного излучения на вещество. Особенностью такого излучения является высокая скорость энерговыделения. Ещё 40 лет назад в лазерной плазме были достигнуты мощность энерговыделения более 10^{12} Вт (сейчас она превышает 10^{18} Вт), плотность энергии примерно 10^7 Дж/см³, удельная скорость энерговыделения примерно 10^{17} Вт/см³. Для сравнения, соответствующие значения параметров самых мощных плазменных установок для резки металла составляют примерно 10^9 Вт, 10^4 Дж/см³, 10^{11} Вт/см³; удельная энергоёмкость обычных взрывчатых веществ типа гексогена или октогена (они почти в 2 раза мощнее тротила) равна примерно 10^4 Дж/см³, а удельная скорость энерговыделения на поверхности Солнца составляет примерно 10^4 Вт/см².

Чтобы иметь представление о состоянии вещества, которое получается в области воздействия лазерного излучения на твердотельную мишень, необходимо знать уровень плотности потока энергии лазерного излучения. При плотности потока менее 10^7 Вт/см² фазовых изменений материала мишени не происходит. С ростом плотности потока начинается плавление и испарение материала. Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что существует достаточно четко определённая критическая плотность потока, равная примерно 10^7 Вт/см², начиная с которой происходит интенсивное испарение вещества. При плотности потока примерно в 10^9 Вт/см² происходит образование волн напряжения большой амплитуды в материале мишени, а при ещё больших плотностях основным эффектом становится переход вещества мишени в состояние плазмы. Однако, результат воздействия мощных лазерных пучков на твердотельные мишени зависит не только от параметров излучения, но и от теплофизических свойств облучаемого вещества.

Процесс взаимодействия лазерного излучения с поверхностью мишени довольно сложен, поэтому стоит ограничиться схематичным его описанием. Есть два варианта развития событий в системе "лазерный пучок – вещество".

Разрушение материала мишени с помощью лазеров может произойти как в результате теплового, так и в результате ударного воздействия лазерного пучка. Как уже было сказано, поглощение излучения происходит в тонком поверхностном слое вещества. Здесь очень важны температуропроводность материала мишени и длительность лазерного импульса. Если температуропроводность велика, то даже за небольшое время длительности лазерного импульса успевает прогреться весьма значительная толщина поверхностного слоя. В случае низкой температуропроводности материала и/или малой длительности импульса вся энергия лазерного излучения выделяется в виде тепла только в том слое, где произошло поглощение излучения. Этот слой может успеть расплавиться, испариться и даже ионизироваться, а весь остальной материал может даже остаться холодным.

В первом случае (большая температуропроводность) в большинстве своём происходит тепловое поражение цели. Этот эффект достигается при непрерывном излучении лазера и в импульсном режиме при импульсах длительностью порядка 10^{-3} – 10^{-5} сек. Оценить тепловое поражение различных тонкостенных оболочек при этом довольно просто. Для этого необходимо, чтобы плотность энергии в пучке была больше теплоты плавления материала оболочки.

Если же взаимодействие лазерного излучения с материалом мишени пошло по второму пути, то воздействие лазерного пучка на цель приобретает ударный характер. Для этого нужна малая температуропроводность и/или малая длительность импульса (например, 10^{-8} сек.), а также высокая плотность энергии падающего пучка (порядка нескольких мегаватт на квадратный сантиметр), которая существенно выше теплоты испарения материала мишени. При этом поверхностный слой в месте падения пучка нагревается до температуры, которой соответствует средняя скорость молекул. Созданный газовый слой передаёт поверхности материала значительный импульс в результате которого частицы материала приобретают определённую скорость. Допустимая же скорость, не превышающая порога разрушения, должна составлять малую часть (порядка нескольких процентов) от скорости звука в веществе мишени.

Из изложенного выше вытекают условия поражения цели по тепловому или ударному типу. Если удельный энерговыход лазерного импульса существенно больше теплоты испарения материала, то происходит ударное поражение цели, а если он сравним или меньше, то тепловое. Или, если отталкиваться от длительности импульса, если время необходимое для прогрева всей толщины оболочки существенно меньше длительности импульса, то происходит обычный нагрев, а если наоборот, импульс существенно меньше времени прогрева, то взаимодействие будет характеризоваться ударной нагрузкой.

Оружие направленной передачи энергии с глубоким проникновением энергии в материал мишени (ОНПЭГ). Другое название ОНПЭГ – пучковое оружие. К этому виду относится оружие, использующее пучки частиц высоких энергий. Например, протоны. Ведь протон (это ядро атома водорода) в 1836 раз тяжелее электрона и, в отличие от лазерного излучения, обладает значительной проникающей способностью в вещество, поскольку каждая частица в пучке несет в миллионы раз больше энергии, чем фотон в луче лазера. Эти частицы, проникают в материал мишени, теряя при этом энергию на ионизацию атомов материала, что приводит главным образом, к различного рода радиационным эффектам. Такие эффекты принято характеризовать количеством энергии, поглощенной в единице объема (или массы) материала. В качестве единицы измерения поглощенной энергии обычно используется такая величина, как рад, соответствующий поглощению 100 эрг энергии в 1 г вещества. Часто используется мегарад, обозначающий поглощение 10 Дж в 1 г вещества. Скорость движения частиц высоких энергий, хоть и уступает скорости света, однако тоже весьма высока. Так, скорость атомов водорода при энергии 300 МэВ ($1 \text{ эВ} \sim 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$) составляет 65% от скорости света.

Необходимо отметить, что атом водорода не случайно был избран в качестве объекта исследования. Он самый лёгкий в природе и поэтому требующий для удержания в электромагнитном поле ускорителя и последующего разгона меньшего расхода энергии. В настоящее время ведутся исследования с пучками более тяжёлых частиц вплоть до ионов урана. На рис. 21 показана зависимость пробега ионов различной массы от энергии частиц в холодном веществе. Из рисунка видно, что на одинаковой полной длине пробега ион свинца выделяет на три порядка больше энергии, чем протон, а для выделения одинаковой энергии пучка в веществе массой 1г требуется на три порядка меньшая интенсивность тяжёлых ионов по сравнению с интенсивностью пучка протонов. Кроме того, ускорители тяжёлых ионов имеют больший КПД (в настоящее время ~25%), чем ускорители протонов. Однако производить фокусировку пучка тяжёлых ионов существенно сложнее, чем пучка протонов.

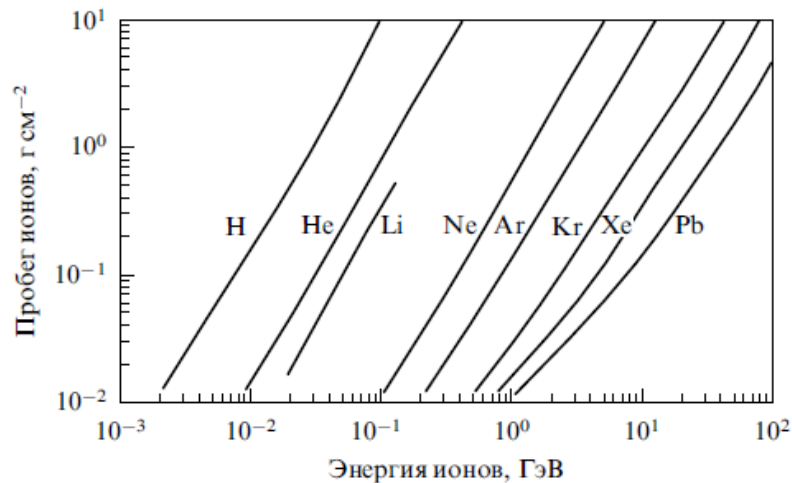


Рис. 21. Зависимость пробега ионов различной массы от энергии частиц в холодном веществе

Поражающих факторов у частиц высокой энергии несколько. После попадания в цель, такие частицы имеют значительную эффективную длину пробега в материале, исчисляемую сотнями г/см^2 с почти однородным энерговыделением вдоль значительной части длины пробега. К примеру, для стали глубина, равная 100 г/см^2 , означает, что излучение проникло вглубь материала более чем на 12 см. Физический пробег иона в веществе существенно зависит от заряда иона, а также от свойств тормозящей среды. На рис. приведены экспериментальный и расчётный профили энерговыделения пучка ядер углерода в мишени из меди.

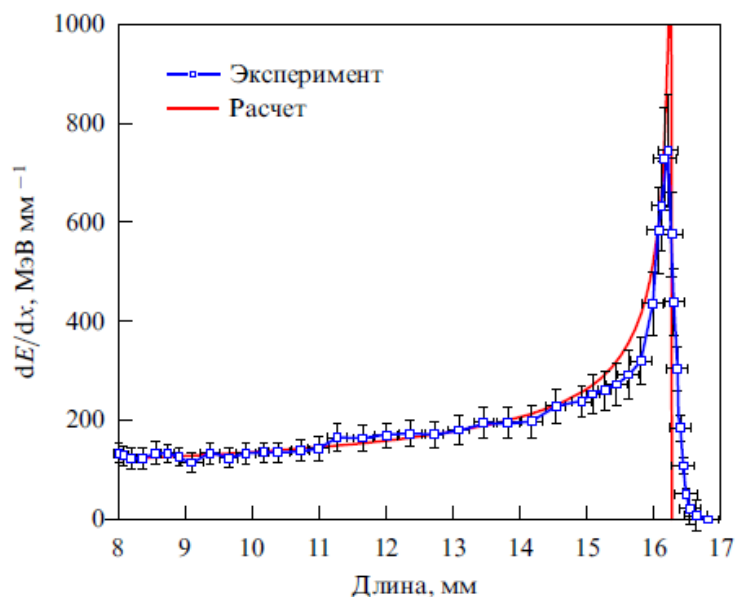


Рис. 22. Пробег иона в веществе

dE/dx – скорость энерговыделения пучка ионов в материале мишени.

Из рис. 22 следует, что торможение частиц достигает максимума перед их остановкой (так называемый брэгговский пик). Из-за этого всплеск энерговыделения происходит в глубине материала. При этом важной особенностью пучка заряженных ионов является строгая линейная направленность трека частицы. Подобными свойствами не обладает ни одно из других ионизирующих излучений. В результате материала цели от этого воздействия разогревается с последующим расплавлением, испарением и даже ионизацией. Кроме того, при торможении частиц пучка в металле возникнет так называемое "тормозное излучение", распространяющееся по ходу движения пучка. Это

кванты рентгеновского и гамма диапазонов. Также под воздействием пучка частиц высокой энергии в материале цели будут наводиться вихревые токи, рождающие электромагнитный импульс.

Таким образом, пучковое оружие обладает тремя поражающими факторами: механическое разрушение, направленное гамма-излучение и электромагнитный импульс. Однако, главным поражающим фактором является всё же механическое разрушение цели. Ведь наибольшей чувствительностью к радиационным эффектам обладают элементы полупроводниковой радиоэлектроники. Типичный уровень радиации, вызывающий заметные повреждения обычных полупроводниковых элементов, составляет несколько мегарад. Однако новые полупроводниковые элементы на основе арсенида галлия, по сравнению с кремниевыми, обладают на порядок более высокой радиационной стойкостью. А дозы порядка десятков мегарад уже близки к порогу теплового разрушения отдельных конструктивных элементов космических систем. Электромагнитный импульс, создаваемый пучком заряженных частиц также недостаточно силён, для того, чтобы нанести повреждения приборам цели, тем более, созданным, к примеру, по фотонным технологиям (это системы, в которых информация переносится фотонами, а не электронами, как сейчас).

Нужно отметить, что электромагнитный импульс и ионизирующее излучение являются дополнительными поражающими факторами не только пучков высоких энергий, но и лазерного излучения. Однако и в лазерных системах они не играют существенной роли в поражении цели. Но не будем зарекаться. Возможно, что на смену полупроводниковой и фотонной электронике придёт электроника квантовая, работающая на основе достижений квантовой механики. Мы пока не знаем, насколько такие приборы будут устойчивы к второстепенным поражающим факторам пучкового и лазерного оружия.

Если мы говорим о поражающей способности пучкового оружия, то полезно было бы сравнить этот показатель с твердотельным снарядом при воздействии на разнесённую преграду, как наиболее типичную для космической техники. Выше мы уже выяснили, что твердотельный снаряд малой массы (десятые доли - единицы грамма) на скорости 7 - 9 км/с не сможет пробить разнесённую преграду, первый слой которой представляет собой алюминиевую пластину толщиной 1 – 2 мм, а второй – бронежилетную ткань. Рассмотрим этот пример при следующих начальных условиях.

Твердотельный снаряд: стальной шарик диаметром 4 мм, скорость снаряда в момент столкновения с преградой – 8,52 км/с, кинетическая энергия при данных условиях взаимодействия – 9,55 кДж, угол встречи с преградой – 90° .

Протонный пучок: диаметр – 2 мм, кинетическая энергия частиц – 15 МэВ, максимальный ток – 10 кА, суммарная энергия пучка – 9,55 кДж, длительность импульса – 10^{-7} с., угол встречи с преградой – 90° .

Преграда: алюминиевая пластина, толщиной 1 мм и несколько слоёв бронежилетной ткани на некотором расстоянии от пластины.

Как мы уже знаем, при данных условиях твердотельный снаряд, пробивая первую преграду, разрушается "в пыль", которая уже неспособна пробить бронежилетную ткань. Энергия соударения распространяется вдоль пластины и приводит к существенному росту диаметра отверстия в ней по сравнению с диаметром снаряда.

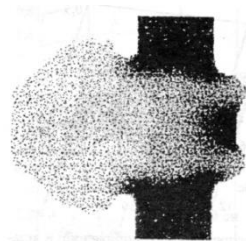


Рис. 23. Распределение плотности вещества в расчётной области на момент окончания действия протонного пучка

А что же протонный пучок? В результате нагрева алюминиевой пластины ионным пучком часть материала преграды плавится и испаряется. Ионизованные пары разлетаются в виде плазменного факела навстречу пучку со скоростью порядка нескольких десятков километров в секунду. В области энерговыклада формируется ударная волна, которая распространяется в осевом и радиальном направлениях от зоны энерговыклада. Вглубь зоны энерговыделения распространяется волна разрежения. По разреженному материалу ионный пучок проникает на глубину большую длины его первоначального поглощения. В первую очередь такое более глубокое проникание пучка происходит на периферии зоны поглощения, поскольку именно эта область прежде всего подвергается действию боковых волн разрежения.

К моменту окончания действия пучка фактически происходит сквозное "прожигание" пластины в виде трубчатого канала радиуса примерно равного радиусу пучка (рис. 23).

Таким образом, у тыльной стороны пластины формируется полая трубка сильно нагретого вещества, благодаря чему ударные волны в этой области распространяются как по направлению от оси пучка, так и, схлопываясь, к оси. Указанные явления приводят к сильному сжатию материала на оси, в то время как в боковой части пластины сжатие остается умеренным. Образовавшаяся пробка (ударное ядро) массой $2 \cdot 10^{-4}$ г выталкивается из пластины высоким давлением, а её скорость достигает 20 км/с. Как и в случае с твердотельным снарядом, боковые ударные волны, распространяясь в радиальном направлении по пластине, также разрушают её и диаметр образующегося отверстия значительно превышает первоначальный диаметр пучка. Ионный пучок, пройдя через пластину, на выходе из неё, из сплошного цилиндрического превращается в трубчатый. Это происходит потому, что за время действия пучка плотность вещества существенно падает именно в боковых волнах разгрузки, что приводит к увеличению глубины проникания пучка в вещество до величины существенно превышающей длину пробега одиночного иона в холодном материале пластины. В глубине пластины происходит сильное кумулятивное сжатие вещества сходящимися к оси ударными волнами и выброс этого сгустка вещества в направлении распространения пучка.

Далее, трубчатый ионный пучок и пробка из материала пластины контактируют с кевларовой тканью. Естественно, что энергия пучка уже сильно растрачена, однако и кевларовая нить уступает по плотности алюминию примерно в два раза ($1,4 - 1,5 \text{ т/м}^3$ против $2,7 \text{ т/м}^3$), а плотность ткани из этой нити ещё меньше. Поэтому, у ионного пучка и ударного ядра есть много шансов "набездобразничать" в толще кевларовой ткани до того, как они полностью исчерпают свою энергию.

Кроме неоспоримых достоинств у систем, которые используют в качестве поражающего фактора заряженные частицы, есть и определённые недостатки. Дело в том, что протоны испытывают существенное кулоновское отталкивание, что приводит к высокой расходимости пучка после его выхода из ускорителя. Нейтроны же практически не подвержены кулоновскому отталкиванию, но эффективно ускорить можно только пучок заряженных частиц, так как нейтральные атомы практически не поддаются воздействию электромагнитного поля. Чтобы обойти это ограничение используют следующий приём. Для придания атомам электрического заряда вначале искусственно вводят в структуру атома дополнительный электрон. Далее полученный отрицательный ион водорода разгоняется в электромагнитном поле ускорителя. На выходе из ускорителя лишний электрон "снимают" с каждого иона, иначе пучок рассыплется в космосе по понятным причинам. Для этого применяют специальные нейтрализаторы заряда. Однако сейчас их КПД недостаточно высок, что существенно влияет на расходимость "не совсем нейтральных" атомов в пучке (удалось достичь максимум 60%-ной нейтрализации для ионов водорода). Поэтому пучок нейтральных атомов водорода с диаметром на выходе ускорителя один сантиметр, при распространении в космосе на дальности 1000 км будет иметь диаметр уже 20 м. Даже при создании очень высоких первоначальных энергий, плотность энергии на цели при таком диаметре явно недостаточна для её поражения. Получается, что ОНПЭГ пригоден для поражения целей на сравнительно небольшом расстоянии (менее 1000 км). Но это современные оценки... Что же касается более тяжёлых

ионов, то создать как ионизатор, так и нейтрализатор заряда для тяжёлых атомов на несколько порядков сложнее, чем для ионов водорода. Ведь тут нужно "навешивать" на атом далеко не один электрон, иначе будет тяжело разгонять такой слабо ионизированный массивный пучок, либо это потребует очень большого времени и больших энергий, а следовательно, и больших размеров ускорителя. Или же нужно использовать другую схему объёмной нейтрализации ионного пучка. Возможно, что в будущем эта задача будет успешно решена.

Кроме того, при движении в магнитном поле небесного тела, одна лишь нейтрализация объёмного заряда не даёт желаемого эффекта. Ведь благодаря наличию направленной скорости такой пучок будет сохранять свойства электрического тока и взаимодействовать с магнитным полем планеты или звезды, которое, к тому же, само по себе нестационарно и подвержено нерегулярным флуктуациям. Это ставит под сомнение возможность высокой точности наведения пучка. Поэтому, пока что, подобное оружие может применяться только вдали от небесных тел.

Энергетическое оружие на основе мощных импульсов электромагнитного излучения (СВЧ оружие). Сверхвысокочастотное оружие, это оружие, поражающим фактором которого является электромагнитное излучение СВЧ диапазона. Предназначается для поражения военной техники путём вывода из строя её радиоэлектронных элементов, чувствительных к электромагнитным полям, либо посредством физического разрушения конструкции цели тепловым воздействием.

Из определения СВЧ оружия напрямую следует, что сейчас его можно разделить на два подвида. Первый – это оружие, предназначенное для физического разрушения цели; второй – для выведения из строя установленной на цели аппаратуры наведения оружия и обнаружения целей с причинением минимального ущерба конструкции цели. Такое деление относится именно к современному положению вещей, поскольку создать приемлемые по характеристикам образцы первого подвида пока не удалось. В будущем оружие первого подвида сможет выполнять задачи как по физическому уничтожению цели, так и по выведению из строя её аппаратуры, т.к. диапазон мощностей СВЧ излучения можно будет варьировать в широких пределах.

С поражающими факторами мощных электромагнитных импульсов все хорошо знакомы по описанию поражающих факторов ядерного взрыва. При этом всегда говорится о том, что импульс электромагнитного излучения (ЭМИ) хорошо выводит из строя радары и другие электронные приборы. Всё так. Однако это оружие ненаправленного действия: оно поражает и ослепляет не только электронные средства противника, но и свои собственные. Естественным шагом в его развитии явилось использование направленных генераторов микроволновых колебаний, которые считается одним из перспективных видов космического оружия. Обычно микроволновое излучение подразделяют на четыре диапазона (см. таблицу 2).

Таблица 2

Диапазон частот	Частота, ГГц	Длина волны, см
Ультравысокие, УВЧ	0,3 – 3	100 – 10
Сверхвысокие, СВЧ	3 – 30	10 – 1
Крайне высокие, КВЧ	30 – 300	1 – 0,1
Гипервысокие, ГВЧ	300 – 3000	0,1 – 0,01

В небольших дозах микроволновое излучение используется медиками в лечебных целях для местного разогрева человеческого тела (УВЧ-терапия). Мощные его дозы могут поражать как человека, так и технику. Уже разработаны генераторы микроволнового излучения мощностью в сотни мегаватт. Далеко не последней проблемой при использовании этого оружия являются габаритные размеры оборудования, необходимого для фокусировки и направления луча на большие расстояния. Так как микроволновое излучение, как и луч лазера, полностью подчиняется законам рассеяния (явление дифракции), то диаметр зеркала излучающей антенны будет внушительных размеров. Так, если длина волны микроволнового излучения примерно в 1000 раз больше, чем у ИК-лазера, то для получения одинакового пятна на цели диаметр антенны СВЧ источника

должен быть также примерно в 1000 раз больше зеркала лазера. Поэтому для создания микроволнового луча с раствором 10^{-7} радиан, как это предусмотрено для некоторых лазеров, работающих на частоте 30 ГГц (длина волны 1 см), диаметр антенны СВЧ оружия должен быть около 10 км! Даже у параболической антенны диаметром 10 - 15 метров пучок миллиметровых волн имеет расходимость 10^{-4} радиан. На расстоянии 1000 км такой пучок образует пятно диаметром 100 м. Плотность потока мощности при этом даже от генератора в 1000 МВт падает до 10 Вт/см², что не может причинить серьезного ущерба цели. Чтобы использовать микроволновое излучение как оружие физического разрушения цели, видимо, придётся продвигаться в область субмиллиметровых волн (ГВЧ) и создавать более мощные генераторы. Уже давно разработаны генераторы миллиметровых волн (например, так называемые гироконы) с мощностью в пределах 0,1 – 1 ГВт. КПД первых гироконов составлял 50 – 70 %, но это далеко не предел. Вполне возможно увеличить его до 85 – 95%.

Другим способом создания мощных пучков СВЧ излучения является использование излучающих элементов (магнетронов) в составе фазированной решётки, которая позволяет усиливать излучение в каком-то одном направлении и даёт большие возможности по управлению пучком СВЧ энергии. В конце 80-х начале 90-х годов прошлого века проводились испытания двух источников излучения общей мощностью 1,5 ГВт и планировалось решить проблему объединения в фазированную решётку шести и более магнетронов. Достоинством фазированных решёток является возможность получения мощного потока излучения при достаточно скромных мощностях каждого отдельного магнетрона, входящего в фазированную решётку. Но всё же возможность физического разрушения конструкции цели тепловым воздействием это, пока что, только перспектива. Поэтому перейдём к рассмотрению второго подвида СВЧ оружия.

Источники СВЧ излучения очень эффективны при воздействии на элементы телекоммуникационных систем и систем обнаружения. Они на порядок эффективнее мощного лазерного излучения. И это понятно, поскольку действие лазерного излучения сводится к тепловому воздействию, поэтому оно пропорционально интенсивности потока, в то время как действие СВЧ излучения проявляется в виде полевого пробоя в элементах и этот эффект пропорционален электрическому полю в потоке СВЧ волны, вследствие чего это воздействие намного эффективнее. В качестве целей для ЭМИ оружия могут рассматриваться цепи питания и управления самонаводящихся боеприпасов, антенны и цепи управления кораблей и боевых станций.

Механизм действия ЭМИ оружия достаточно прост. Под воздействием его импульсов на поверхности цели протекают токи большой силы. Эти токи могут проникать внутрь объекта не только через антенну или оптическую систему, но и через провода по цепям питания, через различные технологические люки, зазоры, трещины, отверстия и тому подобные неоднородности на корпусе цели. Иногда про такие пути говорят, что СВЧ излучение проникает через точки "черного входа" и создаёт в оборудовании импульсные наводки, приводящие его в негодность.

Кроме того, все преимущества СВЧ оружия (как, впрочем, и другого ОНПЭ) можно использовать именно в космосе. Ведь на планетах с атмосферой дальность поражения электроники не может превышать размер источника излучения более чем в 1000 раз, иначе излучение вызовет разряд в окружающей атмосфере и вся его энергия уйдёт на образование плазменного экрана. Из этого следует, что источники узких пучков электромагнитного излучения (микроволновые пушки) всегда будут проигрывать равным по габаритам артсистемам в дальности и эффективности поражения цели. Пучок излучения не заставишь искривиться, поэтому нельзя стрелять с закрытых позиций. Если к этому добавить немалые габариты микроволновых пушек, то понятно, что шансов на планетарном поле боя у них нет. Поэтому, не сбрасывая со счетов использование СВЧ генераторов в будущем в качестве оружия, разрушающего цель, в настоящий момент более реалистично рассматривать эти генераторы в значительной степени как нелетальное оружие, используемое для следующих целей:

- создание помех микроволновым радарам противника (такое воздействие получило название "лишение информации"), для чего необходима удельная мощность излучения $10^{-8} - 10^{-6}$ Вт/см²;
- передача энергии на отдельные датчики и другое оборудование вместо использования бортовых источников питания или кабелей (необходимая удельная мощность излучения 0,01-0,1 Вт/см²);
- нарушение работы датчиков и электронного оборудования (необходимая удельная мощность излучения 10-100 Вт/см²);
- на ближней дистанции нагрев цели в течение короткого времени (необходимая удельная мощность излучения 1-10 кВт/см²).

Таким образом, СВЧ оружие "нерентабельно" использовать на больших дальностях для физического разрушения объектов противника. По крайней мере, пока. Тем не менее, на малых дистанциях с его помощью вполне можно создавать достаточно высокие плотности энергии. Но основной задачей СВЧ оружия пока всё же будет функциональное поражение электроники противника, т.е. лишение его информации, поскольку для силового воздействия есть гораздо более эффективные средства.

В связи с этим необходимо более подробно рассмотреть термин "функциональное поражение" и наполнить его конкретным содержанием. Выше уже приводилось упрощённое описание механизма воздействия СВЧ оружия на цель. Мы углубим и расширим это описание.

В отличие от оружия направленной передачи энергии, использующего мощные потоки заряженных частиц, либо узконаправленное лазерное излучение сверхвысоких уровней энергии и предназначенного для физического уничтожения живой силы и техники противника, поражающее действие СВЧ оружия функционального поражения нацелено на разрушение чувствительных элементов приёмников (датчиков) информации. В этом смысле такое оружие является оружием информационной борьбы.

В настоящее время важная объективная предпосылка оснащения Вооруженных сил СВЧ оружием функционального поражения обусловлена тем обстоятельством, что по мере развития и совершенствования электронной техники снижаются уровни рабочих напряжений и мощностей, требуемых для работы элементов микросхем. Одновременно уменьшаются уровни энергии внешнего воздействия, способные вызвать нарушения в работе этой техники.

На рис. 24 представлена динамика изменения уровней энергии, вызывающей нарушения функционирования радиоэлектронной аппаратуры (кривая 1) и напряжения питания схем этой аппаратуры (кривая 2) за три с половиной десятилетия.

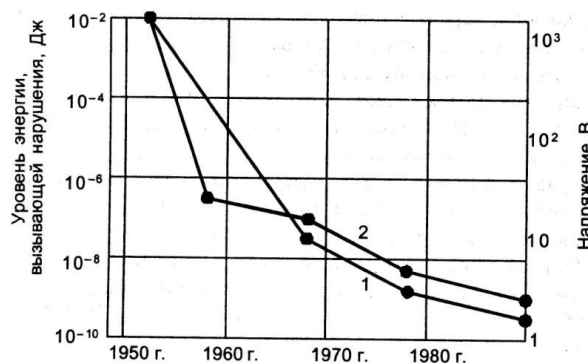


Рис. 24. динамика изменения уровней энергии, вызывающей нарушения функционирования радиоэлектронной аппаратуры (кривая 1) и напряжения питания схем этой аппаратуры (кривая 2)

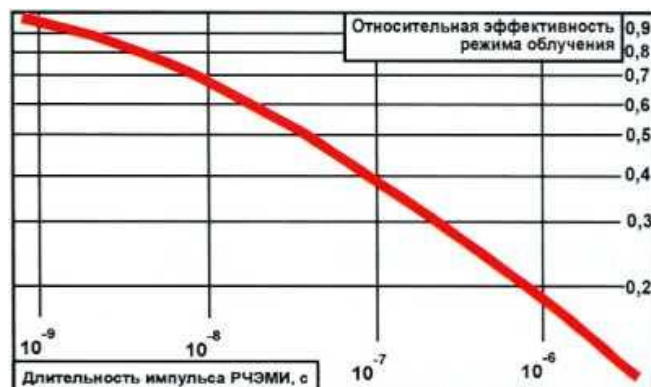


Рис. 25. Относительная эффективность облучения электроники СВЧ импульсами различной длительности

Из рис. 24 следует, что за период с 1950-го до середины 80-х годов уровень энергии, необходимой для нарушения работы электронной аппаратуры, обусловленного выходом из строя элементной базы этой аппаратуры, снизился с 10^{-2} до 10^{-9} Дж. Широкое

распространение получила цифровая техника, весьма чувствительная к возмущениям импульсного характера. Таким образом, платой за колоссально возросшие возможности аппаратуры явилось возрастание уязвимости её элементов от мощного электромагнитного излучения, вызывающего большие токи в электрических цепях, причём, прежде всего в цепях тех электронных систем, которые имеют высокую степень интеграции.

Сам эффект функционального поражения проявляется в трёх видах. Во-первых, прекращение работы отдельных элементов радиоэлектронных средств (РЭС) или этих средств в целом, вызванное разрушением структуры их элементов. Разрушение структуры приводит к невосстанавливаемым (катастрофическим, необратимым) отказам РЭС или их элементов. Это разрушение происходит вследствие выделения тепла при прохождении через полупроводниковые элементы токовых импульсов, и обычно наблюдается при воздействии сравнительно длительных (микросекундных) импульсов или их последовательности. Если же СВЧ импульсы короткие (наносекунды и менее), то наблюдается другой эффект: пробой "р-п" переходов и неоднородных структур, вследствие чего происходит утрата полупроводниковыми элементами своих функций. На рис. 25 показано, что с уменьшением длительности СВЧ импульса эффективность его воздействия на радиоэлектронную аппаратуру растёт.

Во-вторых, нарушение работы отдельных электронных элементов или РЭС в целом, вызванное изменением физической структуры этих элементов. Такое нарушение приводит к восстанавливаемым (временным, обратимым) отказам, сопровождаемым ухудшением параметров РЭС после их восстановления, либо к сохранению этих параметров, если со временем структура элементов восстановится полностью. Интервал выхода из строя элементов РЭС изменяется в широких пределах — от единиц миллисекунд до десятков минут (а иногда и часов). Восстанавливаемые отказы могут привести к срыву боевой задачи, но это происходит не во всех случаях. Дело в том, что обработка информации в системах оружия носит циклический характер. Если, например, в системе наведения ракеты происходит сбой в течение одного или немногих таких циклов, то такой эффект не может сорвать выполняемую целью боевую задачу, поскольку у системы наведения остаётся достаточно времени, для повторного "захвата". Вследствие более мощного воздействия происходит "перенасыщение" полупроводников пространственными зарядами, что делает невозможной их нормальную работу в течение длительного времени. Работоспособность цели после облучения восстановится, но она уже не сможет выполнить свою боевую задачу.

В-третьих, будут присутствовать функциональные нарушения работоспособности РЭС, характерные для традиционных видов помех (ложные срабатывания и сбои в работе исполнительных схем, искажения выходных сигналов обнаружительных и анализирующих устройств и т. д.).

СВЧ оружие функционального поражения обладает внеполосным воздействием, т. е. поражает радиоэлектронные средства любого класса даже тогда, когда рабочая частота мощного СВЧ излучения далеко отстоит от полосы пропускания приёмника поражаемого РЭС. Это позволяет обеспечить поражение широкой номенклатуры радиоэлектронных средств самого различного функционального назначения с помощью СВЧ оружия одного типа. В этом смысле оружие функционального поражения является универсальным.

Причина такого явления заключается в том, что при использовании СВЧ оружия воздействие не сводится только к изменению свойств элементов радиоэлектронных средств, а ведёт главным образом к изменению физической структуры этих элементов. В результате СВЧ оружие способно поражать узлы и элементы таких электронных средств, которые не подвержены воздействию традиционных видов помех, а именно: передающие устройства, блоки питания, инерциальные системы наведения, вычислительные средства, элементы антенно-фидерных трактов, волоконно-оптические линии связи и т.п.

Кроме того, воздействие мощного СВЧ излучения на радиоэлектронную аппаратуру, даже находящуюся в обесточенном состоянии на складах и в арсеналах,

вызывает ускоренное старение этой аппаратуры: при её однократном облучении параметры полупроводниковых структур ухудшаются примерно в 2 - 3 раза за время порядка одного месяца

Важным является и тот факт, что воздействие на радиоэлектронные средства мощного СВЧ излучения отличается от воздействия электромагнитного импульса ядерного взрыва (ЭМИ). Теоретически рассчитанный энергетический спектр ЭМИ имеет максимум около 10^{-6} Дж/м² на частоте 20 кГц. На частоте 20 МГц интенсивность излучения падает до 10^{-12} Дж/м². Отсюда следует, что для антенн дециметрового и сантиметрового диапазонов волн ЭМИ не представляет угрозы (см. рис. 26). Кроме того, эффективность экранировки СВЧ импульсов снижается в сотни раз по сравнению с таковой для электромагнитных импульсов. Во столько же раз возрастает цена различных мер защиты электроники от воздействия мощных СВЧ импульсов. Существенно увеличивается и вес экранов. Таким образом, применительно к функциональному поражению импульсы СВЧ излучения имеют преимущества перед электромагнитными импульсами.



Рис. 26. Спектральные плотности мощности электромагнитного излучения, генерируемое источниками различных классов в радиочастотном диапазоне

СВЧ оружие имеет также определенные преимущества по сравнению с подобным лазерным оружием, которое тоже можно использовать для функционального поражения цели. Во-первых, лазерное оружие функционального поражения предъявляет существенно более высокие требования к точности наведения и удержания лазерного пятна на определённом элементе цели, чем СВЧ системы. Во-вторых, действие СВЧ оружия в гораздо меньшей степени зависит от состояния атмосферы и погодных условий, чем действие лазеров. В-третьих, лазерные излучатели воздействуют на цель точно, а СВЧ излучатели — объёмно, как уже говорилось, проникая внутрь цели с "чёрного хода".

К настоящему времени сформировались два направления разработки и использования СВЧ оружия функционального поражения. Первое направление предполагает создание мобильного СВЧ оружия многоразового применения на базе генераторов мощного импульсного СВЧ излучения. Второе направление — это создание СВЧ оружия одноразового применения на основе электромагнитных боеприпасов самого разнообразного применения. Скорее всего, это деление сохранится и в будущем.

СВЧ оружие многоразового применения способно воздействовать одновременно на несколько целей и обеспечивать защиту охраняемого объекта одновременно с нескольких направлений за счёт быстрого перенацеливания луча фазированной антенной решётки (она излучает СВЧ волны в направлении цели). Таким образом, СВЧ оружие многоразового применения имеет преимущества по сравнению с аналогичным оружием

одноразового применения по пропускной способности, быстродействию, управляемости и многократности боевого применения.

По оценкам специалистов, производительность одного боевого беспилотника с СВЧ оружием на борту составит примерно 10^5 импульсов за полёт. Чтобы гарантированно поразить радиоэлектронную систему, СВЧ оружие должно генерировать серию импульсов. Если предположить, что каждая цель будет облучаться тысячей импульсов, то беспилотный летательный аппарат мог бы успешно воздействовать на 100 целей за один полёт.

Устройства СВЧ оружия одноразового применения могут размещаться на управляемых и неуправляемых средствах поражения (ракетах, бомбах, снарядах). Все эти средства поражения, оснащённые источниками мощного СВЧ излучения, принято называть электромагнитными боеприпасами (ЭМБ).

Эффективность применения ЭМБ против оснащённых современной техникой армий может на порядок превышать эффективность действия обычных фугасных и осколочных боеприпасов аналогичного калибра. Разумеется, уничтожить электронное средство можно и обычным боеприпасом. Однако он должен с высокой точностью попасть в цель, чтобы поразить её осколками или ударной волной.

ЭМБ даже небольшого калибра создают излучение с энергией 20 – 40 Дж в импульсе длительностью ~1 мкс. Пиковая плотность потока мощности импульса вблизи эпицентра взрыва имеет порядок мегаватт на квадратный метр, что делает ЭМБ эффективным в радиусе нескольких десятков метров. Например, радиус поражения современной крылатой ракеты 120-мм электромагнитным боеприпасом может составить 60 метров, что в десять раз дальше, чем осколочно-фугасным снарядом аналогичного калибра. Кроме того, при взрыве электромагнитного боеприпаса калибров 100 – 120 мм электронным приборам могут быть нанесены следующие повреждения:

- на удалении 6 – 10 м от цели происходит подрыв детонаторов обычных боеприпасов;
- на удалении 30 м выводится из строя система государственного опознавания целей и блокируется пуск зенитных управляемых ракет переносных зенитных ракетных комплексов;
- на удалении 50 м выводятся из строя противотанковые магнитные мины.

По сравнению с оружием многоразового применения, одноразовые ЭМБ компактнее, существенно дешевле и могут развивать гораздо бóльшую мощность в импульсе, чем многоразовые системы.

Кроме военного применения СВЧ излучатели и лазеры могут найти важное применение в народном хозяйстве. Их предполагается использовать для передачи из космоса на Землю энергии орбитальных солнечных электростанций. Вероятно, станет возможным снабжать энергией и мобильные средства: в конце 80-х специалисты НАСА сконструировали самолёт, который питался электроэнергией от наземных станций с помощью микроволновых лучей. Мощность излучателя – 2 МВт. Планировалось, что этот беспилотный самолёт с размахом крыла 45 м и двигателем 40 л.с., сможет находиться в воздухе до 3 месяцев без посадки. Он должен был летать по замкнутому маршруту на высоте 22,5 км и использоваться для контроля воздушной среды; он должен был также выполнять задачи в качестве элемента воздушной системы раннего оповещения более дешёвого, чем ИСЗ, и более надёжного, чем дирижабль или привязной аэростат. "Дневной" прототип такого самолёта был создан и летал, используя энергию солнечных элементов, размещённых на крыльях. Создание космических микроволновых станций сделает такие аппараты "круглосуточными".

Комбинированные системы

Под комбинированной системой мы будем понимать сочетание в одном устройстве конструктивных решений, применяемых в разных видах как космических артиллерийских систем, так и боеприпасов для них. Например, сочетание электромагнитного и механического ускорителей массы. Комбинированные решения

применяются в том случае, когда они позволяют добиться увеличения эффективности артиллерийской системы по сравнению с "чистым" вариантом. Конструктивных комбинаций может быть великое множество. Ниже приведены только некоторые из них – наиболее интересные с точки зрения автора и не слишком сложные с конструктивной точки зрения.

Химический ускоритель массы с комбинированным метательным зарядом. Под комбинированным метательным зарядом в данном случае понимается сочетание порохового заряда или заряда ЖМВ и бризантного метательного ВВ. Работает такое сочетание следующим образом. Пороховой заряд или ЖМВ начинает разгон твердотельного поражающего элемента, а бризантное метательное вещество его заканчивает. В конце прошлого века прорабатывалось несколько проектов защиты Земли от астероидов с помощью специальных баллистических систем (пушек). Один из проектов предполагал разгон снаряда массой 1,5 кг до скорости 12 км/с. Начальный разгон до скорости 1,5 км/с обеспечивала нарезная пороховая пушка. Затем снаряд попадал в вакуумированный баллистический канал, на стенки которого предварительно был нанесён слой бризантного ВВ. Сообщение снаряду дополнительной скорости достигалось в результате последовательного подрыва взрывчатого вещества синхронно с движением снаряда по баллистическому каналу. Общая длина этой баллистической установки должна была составлять порядка 150 м.

Ускоритель массы + реактивный двигатель. В этом сочетании у нас получится уже давно известное безоткатное орудие. Эффект отсутствия отката может достигаться разными способами. Наиболее распространённым из них является отвод части пороховых газов через специальное сопло в казённой части ствола, в результате чего создаётся реактивная сила, уравнивающая силу отдачи. Естественно, что подобный способ компенсации отката требует увеличения расхода метательного вещества, причём, весьма существенного. Уменьшить этот недостаток помогает другое противооткатное устройство – дульный тормоз, который в современных орудиях может компенсировать до 60% энергии отдачи. Наличие дульного тормоза позволяет значительно уменьшить расход метательного вещества в боеприпасе к безоткатному орудю.

Однако, создание уравнивающей силы может быть достигнуто не только за счёт дульного тормоза и реактивной силы газов заряда метательного вещества. Подобного эффекта можно добиться с помощью выброс в сторону, противоположную направлению выстрела, определённой массы, компенсирующей импульс, приобретаемый снарядом во время выстрела (проектирование подобного боеприпаса было целью дипломной работы автора этого документа). Причем не обязательно, чтобы эта противомасса была в виде твёрдой болванки, способной причинить вред своим силам. Вполне можно подобрать такие физико-механические свойства состава противомассы, которые приводят её к превращению в пыль по окончании процесса компенсации отката и сводят вероятность причинения ущерба своим к минимуму.

Применение противомассы является более предпочтительным способом компенсации силы отдачи в электромагнитных и механических ускорителях массы.

Ускоритель массы + реактивный снаряд. В данном случае речь идёт не о безоткатном, а об обычном орудии, стреляющим реактивными снарядами. Естественно, что такое орудие не является безоткатным. Преимуществом этого сочетания является более равномерное распределение давления газов метательного вещества по длине ствола орудия. Кроме того, никто не мешает сочетать снаряд с реактивным двигателем и добавочное дожигание определённых порций метательного вещества обычным способом по мере продвижения снаряда по каналу ствола. Если выполнить корпус реактивного двигателя из горючего материала, то на выходе из ствола мы получим обычный снаряд без довеска в виде пустого корпуса отработавшего своё реактивного двигателя.

Химический ускоритель массы + лазер / ионная пушка. Поскольку скорость снаряда химического ускорителя массы зависит, кроме прочих факторов, от температуры тех газов, в которые превращается метательное вещество, то можно использовать энергетику лазерного излучения или ионного пучка для повышения температуры

метающих газов. Максимальная температура газа при выделении химической энергии составляет 3'000 – 4'000 К. Нагрев газа при выделении электрической энергии может достигать 8'000 – 10'000 К. Лазерное излучение или ионный пучок дают возможность получить температуру газа 100'000 К и выше. Однако, при таких температурах ограничивающим фактором выступает термическая прочность конструкции ускорителя массы. Кроме того, общий КПД системы понижается из-за малого КПД современных лазеров.

Электротермический ускоритель массы. Представляет собой комбинацию химического ускорителя массы и ускорителя плазмы. Принципиальная схема показана на рис. 27. А на рис. 28 приведён один из вариантов электротермического ускорителя массы, который был реализован "в железе".

Принцип действия такого ускорителя заключается в следующем. Перед выстрелом твердотельный снаряд устанавливается в казённой части ствола (около анода). Там же размещается материал для образования плазмы. Другим электродом (катодом) является ствол ускорителя. В момент выстрела происходит электрический взрыв материала, предназначенного для образования плазмы, снаряд получает начальный импульс, затем образуется плазменный жгут, который и разгоняет снаряд с близким к постоянному ускорением, находясь при этом в контакте с обоими электродами.

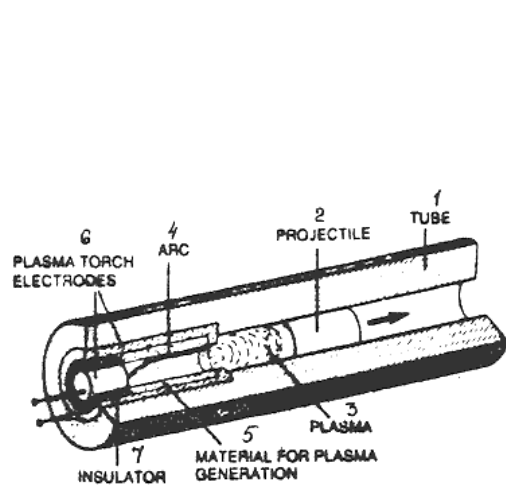


Рис. 27. Принцип действия электротермического ускорителя массы

1 - ствол; 2 - снаряд; 3 - плазма; 4 - дуга; 5 - материал для образования плазмы; 6 - электроды для воспламенения плазмы; 7 - изолятор

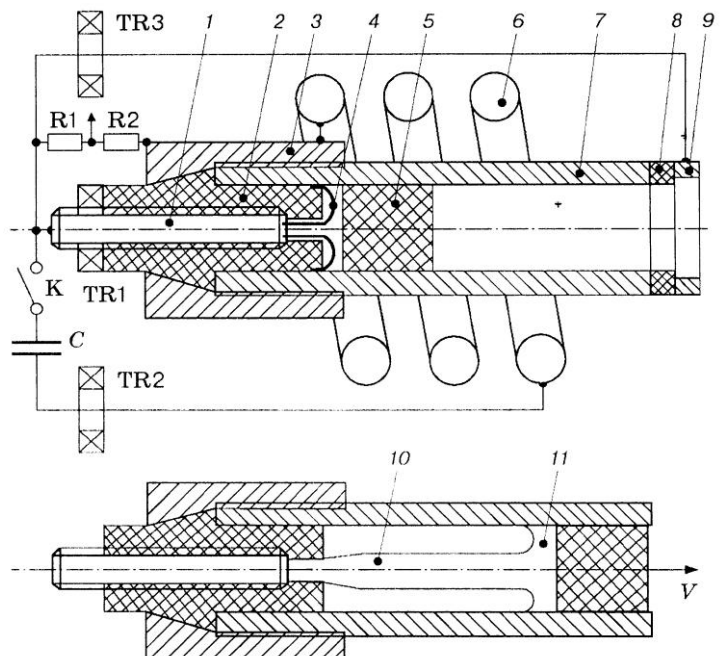


Рис. 28. Схема гибридной электротермической пушки

1 - центральный электрод; 2 - изолятор с газогенерирующим каналом; 3 - корпус пинч-ускорителя; 4 - электровзрывающийся проводник; 5 - метаемое тело; 6 - соленоид; 7 - электрод-ствол; 8 - изолятор; 9 - дополнительный электрод; 10 - плазменный жгут-пинч; 11 - плазменная перемычка-поршень; К - электрический ключ; С - ёмкостный накопитель энергии; TR1, TR2, TR3 - измерительные трансформаторы Роговского; R1, R2 - малоиндуктивные резисторы омического делителя напряжения.

Поскольку плазменный жгут в обычном состоянии недостаточно устойчив, то применяют специальные меры по стабилизации состояния его плазменной структуры. Одним из стабилизирующих факторов является магнитное поле соленоида, обозначенного на рис. цифрой 6.

Преимуществом электротермических систем перед химическими ускорителями заключается в том, что они дают возможность существенно увеличить скорость снаряда по сравнению с пороховыми системами, оставаясь при этом в приемлемых габаритах. Кроме того, если сравнивать электротермические системы с газовыми пушками, то первые более надёжны и безопасны.

Рельсотрон + взрывомагнитный генератор. Эта комбинация даёт возможность получения мощных импульсов электрического тока для питания рельсотрона.

Пушка Гаусса + ускоритель массы. Подобная комбинация позволяет увеличить КПД "гауссовки" за счёт предварительного разгона снаряда с помощью механического или химического ускорителя массы. Ведь слабым местом пушки Гаусса (да и рельсотрона тоже) как раз и является малый КПД в начале разгона снаряда. Механическая система в данном случае была бы более предпочтительной, поскольку она позволяет частично утилизировать энергию отдачи, возникающую при выстреле "гауссовки".

Ускоритель массы + лазер или СВЧ излучатель. Преимуществом этой комбинации является возможность увеличения скорости твердотельного снаряда, выпущенного из ускорителя массы, с помощью лазерного излучения. Для того, чтобы это было возможно, в донной части снаряда помещается специальное устройство, представляющее из себя сопловой насадок в который помещён лазерный реактивный движитель (ЛРД). В качестве горючего в этом движителе используется многослойный материал со специально организованной внутренней структурой, который под воздействием лазерного излучения превращается в плазму, создающую реактивную тягу.

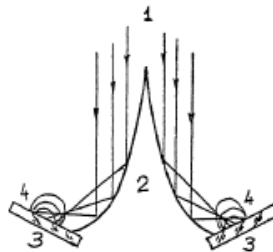


Рис. 29. Принцип действия лазерного реактивного движителя
1 – лазерный луч; 2 – зеркальный отражатель; 3 – мишень; 4 – плазменный факел.

Уже сейчас подобные лазерные движители имеют удельный импульс порядка 5'000 – 6'000 м/с, что превосходит характеристики как твердотопливных (менее 3'000 м/с), так и жидкостных (порядка 5'000 м/с) реактивных двигателей. В будущем удельный импульс ЛРД будет только расти. Подобного эффекта можно добиться не только с помощью лазерного, но и с помощью СВЧ излучения.

В настоящее время существуют проекты использования ЛРД для разгона ракеты, выводимой на околоземную орбиту. Всего предложено несколько типов лазерных движителей. Конструктивная схема в этих проектах отличается от описанной выше, но принцип остаётся неизменным. Рассмотрим некоторые из них.

Существует ЛРД, в котором для вывода ракеты на орбиту она оснащается системой фокусировки СВЧ или лазерных лучей, которая направляет энергию излучения на теплообменник на борту ракеты. Теплообменник передаёт энергию жидкому топливу, скорее всего водороду, превращая его в горячий газ, который и выталкивается из сопла, обеспечивая реактивную тягу. Непрерывная подсветка лазерным лучом позволит вывести такой космический аппарат на орбиту примерно за 8-10 минут, а микроволны сделают это ещё быстрее – за 3-4 минуты.

В другом проекте (рис. 29) за счёт концентрации лазерного излучения специальными зеркалами, находящимися на борту корабля, происходит оптический пробой воздуха, своеобразная рукотворная молния. Образуется плазма, возникают ударные волны, которые, и обеспечивают движение, отталкиваясь от стенок сопла.

Третий вариант заключается в том, что испарившееся от воздействия лазерного импульса специальное вещество вступает в химическую реакцию, например, с воздухом и в результате этой реакции его частицы приобретают дополнительную скорость. За пределами атмосферы такой ЛРД использует принцип испарения специального материала. В противном случае газ, дающий дополнительную тягу, приходится везти с собой на борту корабля.



Рис. 30. Макет аэрокосмического лазерного реактивного двигателя для полетных экспериментов



Рис. 31. Макет ЛРД на стартовой площадке при воздействии одиночного лазерного импульса

На рис. 30 и 31 показан действующий макет ЛРД, который разрабатывают в Научно-исследовательском институте оптико-электронного приборостроения.

Конструктивное исполнение комбинации лазера или СВЧ излучателя с ускорителем массы может быть разным. Лазер может быть установлен соосно со стволом ускорителя, а может быть смонтирован позади и посылать свои импульсы через канал ствола ускорителя. Для того, чтобы избежать увеличения рассеивания снаряда, вызванного работой ЛРД, энергетический импульс может подаваться на лазерный движитель когда снаряд ещё находится в стволе ускорителя.

Достаточно интересной комбинацией выглядит такое сочетание: пушка Гаусса + лазер + механический ускоритель массы. Здесь лазер монтируется в едином корпусе с механическим ускорителем, который начинает разгонять снаряд, "гауссовка" продолжает разгон, а завершает его лазер пока снаряд ещё в стволе, либо после того, как он его покинет. Отдача выстрела "гауссовки" взводит механический ускоритель и хотя бы частично заряжает энергоаккумулятор лазера.

Ускоритель плазмы + лазер или ионная пушка. Такое сочетание позволяет получать высокотемпературный плазменный сгусток большой плотности, который служит снарядом для ускорителя плазмы. Данная комбинация может быть востребована в мощных ускорителях плазмы, поскольку в них возможны трудности при привычных (электрических) способах формирования плазменного сгустка большой массы и высокой плотности.

Электромагнитный боеприпас + электротермическая пушка. Представляет собой одноразовый взрывомагнитный генератор, в который встроена электротермическая пушка. Такая "пушка-патрон" уже сейчас способна разогнать небольшой снарядик до 4–5 км/с, одновременно поражая электронику цели мощным электромагнитным импульсом.

Твердотельный снаряд + реактивный или взрывной ускоритель. Как правило, представляет собой обычный снаряд, в донной части которого установлен специальный ускоритель. Этот ускоритель может срабатывать либо в самом начале полёта, либо на небольшом удалении от цели (как вариант – в момент контакта с ней). Это помогает набрать дополнительную скорость, которая, при стрельбе в атмосфере, в первом случае увеличивает дальности полёта снаряда, а во втором – его глубину проникания в преграду. В космосе это различие нивелируется. Конструктивно ускоритель может быть выполнен как в виде маленького реактивного двигателя, так и в виде кумулятивной воронки, покрытой специальным взрывчатым веществом.

В современном активно-реактивном снаряде реактивный ускоритель используется для увеличения дальности стрельбы.

Обобщения и выводы

После ознакомления с данным документом вполне может сложиться впечатление о том, что использование разных физических принципов при проектировании космических артиллерийских установок сильно усложнит их моделирование при

создании компьютерной игры. В самом деле: моделирование реактивных установок будет требовать одного набора физических величин, моделирование легкогазовых пушек – другого, моделирование лазеров – третьего, и так далее. Это верно лишь отчасти.

К примеру, во всех ствольных химических ускорителях массы, снаряд разгоняется горячим газом, вне зависимости от того, в каком агрегатном состоянии метательное вещество было перед выстрелом и в результате какого процесса (сгорания или детонации) оно перешло в газообразное состояние. Конечная скорость снаряда зависит от скорости звука в газе и от его температуры. Как правило, чем они выше – тем выше скорость метаемого тела.

Температура пороховых газов составляет примерно 2'500 – 3'000 К, а скорость звука в них – менее 4 км/с. Для сравнения: скорость звука в водороде при 15'000 К составляет 12 км/с. Реальный снаряд в реальной орудии можно разогнать до скорости в 1,8 – 2,5 раза большей, чем скорость звука в метаемом газе. Однако, эти значения относятся к современному уровню технологического развития. В будущем возможно существенное увеличение скорости метания, поскольку теоретически в идеальных условиях эта скорость может превышать скорость звука в газе в десятки раз. Что касается систем, использующих кумулятивный эффект, то предельная скорость кумулятивной струи, способной поражать преграду в 2,41 раза больше скорости звука в материале облицовки кумулятивной воронки. При соответствующих условиях могут образовываться газообразные струи, имеющие гораздо большую скорость. Однако, плотность таких струй настолько мала, что сколько-нибудь заметного поражающего действия они не производят. Если же отталкиваться от скорости детонации взрывчатого вещества, то скорость снаряда, разгоняемого бризантным ВВ может вдвое превышать эту скорость.

Если же мы посмотрим на электромагнитные системы, то магнитное поле вполне можно уподобить идеально лёгкому газу, скорость звука в котором равна скорости света. Подобное допущение может способствовать упрощению математического аппарата, используемого для моделирования электромагнитных ускорителей разных видов.

В общем, при желании можно найти много упрощений, допущений и интерпретаций, основанных на схожести математических выражений, используемых для описания различных физических законов и на аналогиях процессов их протекания.

Для того, чтобы облегчить нахождение оптимального игрового баланса, рассмотрим для примера следующий набор параметров артиллерийской установки.

- Исходная энергия боеприпаса (излучения).
- Скорость доставки поражающего фактора до цели.
- Мощность, развиваемая боеприпасом (излучением) в момент выстрела.
- Дистанция эффективного огня. Под этой дистанцией мы будем понимать дальность, на которой ещё сохраняются достаточно высокая вероятность поражения цели и достаточно эффективное действие поражающей энергии по данному типу целей при решении поставленной боевой задачи.
- Энергия отдачи артиллерийского орудия.
- Мощность, развиваемая энергией отдачи.
- Масса и габариты орудия.
- КПД артиллерийского орудия.
- Темп стрельбы (так называется техническая скорострельность).

Однако, присмотревшись, мы поймём, что это далеко не полный перечень характеристик. В него не вошли экономические показатели (стоимость самого орудия, выстрела из него, технического обслуживания и боеприпасов к нему), надёжность орудия, его ресурс, ограничения по тепловым режимам, ремонтпригодность, необходимый технологический уровень для возможности производства и т.д. Это значит, что мы не сможем применить критерий "стоимость – эффективность" при нахождении игрового баланса, поскольку первая его часть (стоимость) нами совершенно не учтена, да и список параметров при оценке эффективности далеко не полон. Значит, имеется серьёзная опасность создать "вундерваффе", при обладании которым прочие артиллерийские системы потеряют свою эффективность и станут ненужными.

Следовательно, думаю, что не открою большой тайны, если скажу, что при проработке игрового баланса артиллерии (и не только артиллерии) необходим учёт как тактико-технических, так и экономических параметров системы. Естественно, что далеко не всегда это можно сделать, более того, не всегда это целесообразно делать. Но в при этом, нужно принять меры по недопущению появления "вундерваффе" с помощью других геймдизайнерских приёмов. В любом случае, последнее слово в выборе решения остаётся за разработчиком.

Владимир Красавин (a.k.a. Gladius)

*Санкт-Петербург.
Май – Июнь 2012 г.*

Список источников

Книги

1. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях / под ред. Н.А. Златкина и Г.И. Мишина. – М.: Главная редакция физ.-мат. литературы изд-ва "Наука", 1974. – 344 с.
2. Артиллерия / под ред. маршала артиллерии М.Н. Чистякова. – М.: Военное Издательство Министерства Обороны Союза ССР, 1953. – 480 с.
3. Физика взрыва / под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – В 2 т. Т. 2. – М.: Физматлит, 2004. – 656 с.
4. Орленко Л.П. Физика взрыва и удара: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2008. – 304 с.
5. Балаганский И.А., Мерзневский Л.А. Действие средств поражения и боеприпасов: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2004. – 408 с. – (Серия "Учебники НГТУ").
6. Модель космоса: Научно-информационное издание: В 2т / под ред. М.И. Пансюка, Л.С. Новикова. – Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. – М.: КУД, 2007. – 1144 с.: табл., ил.
7. Williams A., Gustin E. Flying Guns. The Modern Era. The Crowood Press, 2004, 240 p.
8. Физика быстропротекающих процессов / под ред. Н.А. Златина. – В 3т. Т 2. – М.: Мир, 1971. – 252 с.
9. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Объёмные взрывы: монография. – СПб.: Астерион, 2008. – 374 с., ил.
10. Звелто О. Принципы лазеров: Пер с англ. – 3-е перераб. и доп. изд. – М.: Мир, 1990. – 560 с., ил.
11. Крылов К.И. и др. Основы лазерной техники: Учеб. пособие для студентов приборостроительных спец. вузов / К.И. Крылов, В.Т. Прокопенко, В.А. Тарлыков. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. – 316 с., ил.
12. Космическое оружие: дилемма безопасности / Под. ред. Е.П. Велихова, Р.З. Сагдеева, А.А. Кокошина. – М.: Мир, 1986. – 182 с., ил.
13. Шмыгин А.И. СОИ глазами русского полковника. М.: Мегатрон, 2000. – 398 с.
14. Сурдин В.Г. "Звездные войны": научно-технический аспект. М.: Знание, 1988. – 62 с. <http://www.astronet.ru/db/msg/1173134/index.html>
15. Штулингер Э. Ионные двигатели для космических полётов. М.: Воениздат, 1966. – 344 с.

16. Бойко В.И. и др. Взаимодействие импульсных пучков заряженных частиц с веществом. М.: Физматлит, 2003. – 288 с.
17. Беграмбеков Л.Б. Процессы в твёрдом теле под действием ионного и плазменного облучения: Учебное пособие. М.: МИФИ, 2008. – 196 с.
18. Ступицкий Е.Л. Динамика мощных импульсных излучений и плазменных образований. М.: Издательство физико-математической литературы, 2006. – 280 с.
19. Прищепенко А.Б. Шелест гранаты. М.: Моркнига, 2009. – 256 с., ил.
20. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / В.Д. Добыкин, А.И. Куприянов, В.Г. Пономарёв, Л.Н. Шустов; под ред. А.И. Куприянова. – М.: Вузовская книга, 2007. – 468 с., ил.
21. Физика ядерного взрыва: В 2т. Том 1. Развитие взрыва / Министерство обороны Российской Федерации. Центральный физико-технический институт. – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 528 с.
22. Ядерный взрыв в космосе, на земле и под землёй. (Электромагнитный импульс ядерного взрыва). Сб. статей. Пер. с англ. О. Петренко под ред. С. Давыдова. М.: Воениздат, 1974. – 235 с.
23. Защита от оружия массового поражения / Под ред. В.В. Мясникова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Воениздат, 1989. – 398 с., ил. – (Библиотека офицера).
24. Террористическое и нетрадиционное оружие. Справочное издание. Под ред. Дж.П. Салливена. М.: Моркнига, 2009. – 224 с., цв. ил.

Статьи

1. К. Дженкинс. Монерголи и диерголи – прогресс в разработке боеприпасов. Military Technology. 1988. No 7. http://btvt.narod.ru/1/zmv_pushki.htm
2. Л. Попов. Военные получили первую промышленную рельсовую пушку <http://www.membrana.ru/particle/17552>
3. Б.А. Клумов, В.В. Ким и др. Возможные наблюдательные эффекты в эксперименте Deep Impact. Успехи физических наук. Том 175, №7 (июль 2005). <http://ufn.ru/ru/articles/2005/7/f/>
4. Deep Impact атакует комету Temple 1. http://ufoleaks.su/news/deep_impact_atakuet_kometu_templ_1/2012-03-11-937
5. А.А. Гришаев. К вопросу о механизме детонации. <http://newfiz.narod.ru/detona.html>
6. Зубков П.И. и др. Распределение потенциалов в детонационной волне. В сб. Физика экстремальных состояний вещества - 2002, Эльбрус, 2002, стр.90.
7. Б.М. Манзон. Ускорение макрочастиц для управляемого термоядерного синтеза. Успехи физических наук. 1981. т 134, вып. 4, с. 611-639. http://ufn.ru/ufn81/ufn81_8/Russian/r818b.pdf
8. А.Н. Голубятников, Н.Е. Леонтьев, Н.Н. Пилюгин. Методы повышения эффективности легкогазовых баллистических установок. Успехи механики, Т. 2, №2 (апрель-июнь 2003 г.) <http://www.rusmechanics.ru/6/articles/golubyatnikov.pdf>
9. А. Шибанов. Ускорители вещества. Техника – Молодёжи. 1974. №5.
10. В.П. Кортхонджия. О взрыве проволоки в воде. Журнал технической физики, 2006, т. 76, вып. 12, стр. 98 – 100. <http://journals.ioffe.ru/jtf/2006/12/page-98.html.ru>
11. В.П. Кортхонджия. О роли экзотермической химической реакции при взрыве проволоки в жидкости. Письма в Журнал технической физики. 2003, т. 29, вып. 19. <http://journals.ioffe.ru/pjtf/2003/19/page-13.html.ru>
12. А. Kozak. Rakety s hybridnimi motory. АТОМ, 1980, №5.

13. К.С. Гуськов, С.Ю. Гуськов. Эффективность абляционного нагружения и предельная глубина разрушения материала под действием мощного лазерного импульса. Квантовая электроника, 2001, т. 31, № 4, стр. 305 – 310. http://www.quantum-electron.ru/php/paper_rus.phtml?journal_id=qe&paper_id=1940
14. Л.А. Ривлин. Ядерный гамма-лазер: эволюция идеи. Квантовая электроника. 2007, т. 37, № 8, стр. 723 – 744. http://www.quantum-electron.ru/php/paper_rus.phtml?journal_id=qe&paper_id=13541
15. А.А. Рухадзе. Мифы и реальность. О лучевом оружии в России (О целях и возможностях их достижения). <http://www.trinitas.ru/rus/doc/0016/001b/00160112.htm>
16. А. Домингес. Космическое оружие. Лучшие Компьютерные Игры, 2006, №8. <http://www.lki.ru/text.php?id=1300&print>
17. Э.Э. Лин, В.Ю. Мельцас и др. О механизме коллективного воздействия потока твердых частиц на преграду. Письма в Журнал технической физики, 2002, том 28, вып. 17, с. 90 – 94. <http://journals.ioffe.ru/pjtf/2002/17/p90-94.pdf>
18. В. Сыщенко. 10 фактов о взаимодействии частиц с веществом. <http://trv-science.ru/2011/07/19/10-faktov-o-vzaimodejstvii-chastic-s-veshchestvom/>
19. М.Марахтанов, А.Марахтанов. Металл взрывается. Наука и жизнь, 2002, №4. <http://www.nkj.ru/archive/articles/4072/>
20. В.Е. Фортов, Д. Хоффманн, Б.Ю. Шарков. Интенсивные ионные пучки для генерации экстремальных состояний вещества. Успехи физических наук, том 178, №2. (2008, №2). <http://ufn.ru/ru/articles/2008/2/a/>
21. В.З. Нечай и др. Ядерный взрыв вблизи поверхности астероидов и комет - II. Общее описание явления. Известия Челябинского научного центра. Космическая защита Земли. Специальный выпуск. 1997. http://csc.ac.ru/LANG=ru/news/1997_1/ar27.pdf
22. М.А. Лебедев, Б.В. Литвинов. Симметрия и характер взаимодействия при гиперскоростном ударе. Известия Челябинского научного центра. Космическая защита Земли. Специальный выпуск. 1997. http://csc.ac.ru/LANG=ru/news/1997_1/ar24.pdf
23. П.В. Крюков, В.К. Грибова. Баллистическая система противоастероидной обороны. Известия Челябинского научного центра. Космическая защита Земли. Специальный выпуск. 1997. http://csc.ac.ru/LANG=ru/news/1997_1/ar39.pdf
24. В.М. Грибанов, А.В. Острик. Воздействие рентгеновского и нейтронного излучений мощного взрыва на астероид. Известия Челябинского научного центра. Космическая защита Земли. Специальный выпуск. 1997. http://csc.ac.ru/news/1997_1/ar25.pdf
25. В.Е. Фортов. Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе. Успехи физических наук, том 179, №6. (2009, №6). <http://ufn.ru/ru/articles/2009/6/j/references.html>
26. Лазер забросит ракеты в космос. http://pakfa.ucoz.ru/news/lazer_zabrosit_rakety_v_kosmos/2011-01-31-1416
27. Аэрокосмический лазерный реактивный двигатель. <http://www.niiki.ru/pages/n-r-pr-lhrd.html>
28. Р.А. Лиукконен. Лазерная ракета. Письма в Журнал технической физики. 2001, т. 27, вып. 24. <http://journals.ioffe.ru/pjtf/2001/24/page-11.html.ru>
29. Р.А. Лиукконен, А.М. Трофимченко. Эффективность преобразования энергии излучения в механический импульс в реактивном лазерном двигателе. Письма в Журнал технической физики. 1992, т. 18, вып. 7. <http://journals.ioffe.ru/pjtf/1992/07/page-76.html.ru>

30. Р.А. Лиукконен, А.М. Трофимченко. Сила реактивной тяги в лазерном двигателе. Письма в Журнал технической физики. 1992, т. 18, вып. 7.
<http://journals.ioffe.ru/pjtf/1992/07/page-81.html.ru>
31. А.Прищепенко. Убийцы роботов: электромагнитные бомбы. Популярная механика, 2005, №3. <http://www.popmech.ru/article/3753-ubiysyi-robotov/>
32. Р.М. Гарипов. В.Н. Катаев и др. Сверхбыстрый разгон макротел в коаксиальном электромагнитном ускорителе. РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Саров.
<http://www.vniitf.ru/rig/konfer/9zst/s1/1-1.pdf>
33. А.А. Сивков. Гибридная электромагнитная система метания твёрдых тел. Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42. №1.
<http://www.sibran.ru/psb/phsb/papers/sivk.pdf>
34. Oerlikon Ammunition for New Defense Environment. NDIA 40-th Annual Armament Systems New Orleans, LA – April 25 – 28, 2005.
<http://www.dtic.mil/ndia/2005garm/tuesday/buckley.pdf>
35. А.Д. Сахаров. Взрывомагнитные генераторы. Успехи физических наук. Том 88, вып. 4 (апрель 1966). <http://ufn.ru/ru/articles/1966/4/e/>

Источники на электронных носителях

1. Физическая энциклопедия. На 2-х CD. Изд-во Большая Российская Энциклопедия, РМГ Мультимедиа, 2003 г.
2. Материалы из Википедии – свободной общедоступной мультязычной универсальной интернет-энциклопедии. <http://ru.wikipedia.org/>

Приложение

Иллюстративный материал. Видеоролики с youtube, где можно в действии посмотреть некоторые из артиллерийских систем и боеприпасов, упомянутых в данном документе.

1. Приведены картинки современной американской разработки в рамках обычной артиллерии Advanced Gun System (AGS) 155 мм, дальность стрельбы до 160 км, 3:47
http://www.youtube.com/watch?v=T5LYPMRMVUs&feature=player_embedded#
2. Кинетический твердотельный снаряд "земля-космос". Несуществующий ответ на существующую угрозу, 3:01.
http://www.youtube.com/watch?v=JURQYH669_g&feature=related
3. Взаимодействие пули с преградой (Здорово снято. Я аж засмотрелся), 10:00
<http://www.youtube.com/watch?v=5MRSEfgdSIU&feature=related>
4. Ударное ядро и кумулятивная струя, 6:06
http://www.youtube.com/watch?v=q2Q_FJm6wo
5. Кассетные боеприпасы Российской армии, 4:12
http://www.youtube.com/watch?v=VqyCQ7L0_Xo
6. Кассетный боеприпас BLU-108, 1:19
<http://www.youtube.com/watch?v=ua3nLmE7Kow&feature=related>; Более подробное видео, 6:19 - <http://www.youtube.com/watch?v=myuZUxS3Uww&feature=related>
7. Легкогазовая пушка для запуска на орбиту. на 53:47 анимация выстрела, 56:53
http://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=1IXYsDdPvbo
8. Railgun test fire. Короткий фрагмент, 0:55 <http://www.youtube.com/watch?v=DWHMlz-wTa4&feature=related> ; Более полное видео, 2:53
http://www.youtube.com/watch?v=1ix62_oBGtg

9. Rail Gun Naval Test Shot 5:33
<http://www.youtube.com/watch?v=y54aLcC3G74&feature=related>
10. Устройство рейлгана. Анимация, 2:18 <http://www.youtube.com/watch?v=PLeQ6R2S-Fs&feature=BFa&list=PLF68CAD9526DA964C>
11. Рейлган. Шатурский филиал института физики высоких температур, 7:46
<http://www.youtube.com/watch?v=-Kb33QfS5jI&feature=related>
12. Ударная волна ядерного взрыва, 1:01
<http://www.youtube.com/watch?v=KmK8FEjzTx4&feature=related> ; 0:29
<http://www.youtube.com/watch?v=ELhZ6SghVs>
13. Подрыв ОДБ, 1:15 <http://www.youtube.com/watch?v=FOCCBqrWRVY&feature=related>
14. Подрыв бомбы BLU-96 (хорошо виден процесс распыления ОДБВ и его подрыв)
0:44 <http://www.youtube.com/watch?v=GmRASCHJe2Q&feature=related>
15. Подрыв ОДБ в игре "World in Conflict", 0:31
<http://www.youtube.com/watch?v=TtI9FDxnm8&feature=related>
16. Лазерное оружие.NAVI, 5:26
<http://www.youtube.com/watch?v=vqLkpcHavZE&feature=related> ; Airborne, 1:59
http://www.youtube.com/watch?v=R2eehBk_DNQ&feature=related
17. Осторожно, лазер! Документальный фильм про лазерное оружие, 43:33
<http://www.youtube.com/watch?v=d7EzCI9qMzg>
18. Плазменное оружие, 2:00 <http://www.youtube.com/watch?v=oPsmN6dx9uM>
19. СВЧ оружие, 1:21 <http://www.youtube.com/watch?v=x54eGqRWrXA> ; 4:51
<http://www.youtube.com/watch?v=2I6rEB8jnCM>
20. Взрывамагнитный генератор, 0:47
<http://www.youtube.com/watch?v=INnP09jhtAY&feature=relmfu> ; надо смотреть 5:49 –
10:50 <http://www.youtube.com/watch?v=vBNTUiILOcg&feature=relmfu>
21. Кумулятивный эффект. Девчонки классно танцуют. Жалко, что качество видео не
очень. ☺ , 5:21 http://www.youtube.com/watch?v=3I7L_IE7tEA