

Физика ядерного взрыва

И. П. Мордовец

Введение

Ядерный взрыв — неуправляемый процесс высвобождения большого количества тепловой и лучистой энергии в результате цепной ядерной реакции деления или реакции термоядерного синтеза за очень малый промежуток времени.

По своему происхождению ядерные взрывы являются либо продуктом деятельности человека на Земле и в околоземном космическом пространстве, либо природными процессами на некоторых видах звёзд.

Искусственные ядерные взрывы — мощное оружие, предназначенное для уничтожения крупных наземных и защищённых подземных военных объектов, скоплений войск и техники противника (в основном тактическое ядерное оружие), а также полное подавление и уничтожение противоборствующей стороны: разрушение больших и малых населённых пунктов с мирным населением, стратегической промышленности, крупных транспортных узлов, деловых центров (стратегическое ядерное оружие).

Цепная реакция деления

Атомные ядра некоторых изотопов химических элементов с большой атомной массой (например, урана или плутония) при их облучении нейтронами определённой энергии теряют свою устойчивость и распадаются с выделением энергии на два меньших и приблизительно равных по массе осколка — происходит реакция деления атомного ядра. При этом наряду с осколками, обладающими большой кинетической энергией, выделяются ещё несколько нейтронов, которые способны вызвать аналогичный процесс в соседних таких же атомах. В свою очередь, нейтроны, образовавшиеся при их делении, могут привести к делению новых порций атомов — реакция становится цепной, приобретает каскадный характер. В зависимости от внешних условий, количества и чистоты расщепляющегося материала её течение может происходить по-разному. Вылет нейтронов из зоны деления или их поглощение без последующего деления сокращает число делений в новых стадиях цепной реакции, что приводит к её затуханию. При равном числе расщеплённых ядер в обеих стадиях цепная реакция становится самоподдерживающейся, а в случае превышения количества расщеплённых ядер в каждой последующей стадии в реакцию вовлекаются всё новые атомы расщепляющегося вещества. Если такое превышение является многократным, то в ограниченном объёме за очень короткий промежуток времени образуется большое количество атомных

ядер-осколков деления, электронов, нейтронов и квантов электромагнитного излучения с очень высокой энергией. Единственно возможной формой их существования является агрегатное состояние высокотемпературной плазмы, в ступок которой превращается весь расщепляющийся материал и любое другое вещество в его окрестности. Этот ступок не может быть сдержан в своём первоначальном объёме и стремится перейти в равновесное состояние путём расширения в окружающую среду и теплообмена с ней. Поскольку скорость упорядоченного движения составляющих ступок частиц намного выше скорости звука как в нём, так и в окружающей его среде (если это не вакуум), расширение не может иметь плавного характера и сопровождается образованием ударной волны — то есть носит характер взрыва.

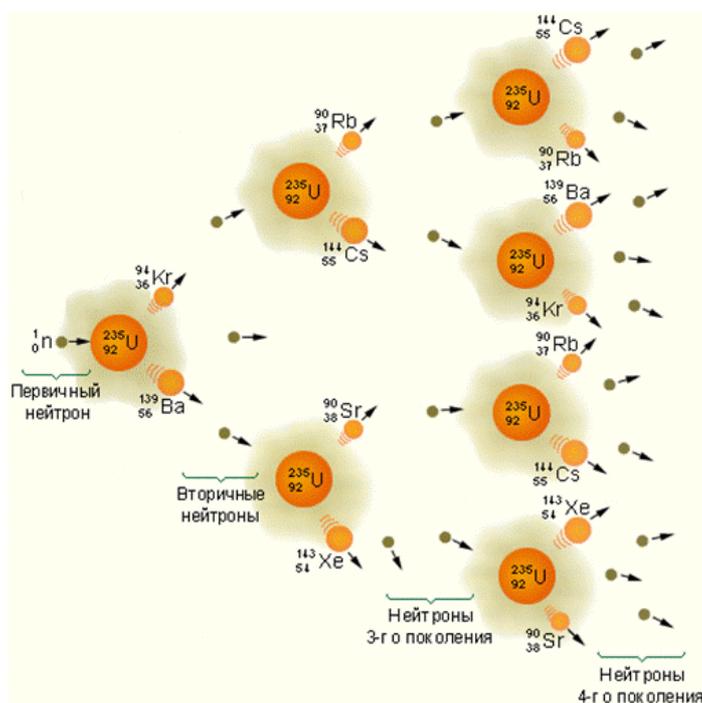


Рис.1. Схема деления ядра урана-235.

Виды схем устройства ядерного заряда

Существуют две основные схемы детонации: пушечная, иначе называемая баллистической, и импловивная. Отметим, что практически во всех современных «зарядах» используются оба принципа в их комбинации. «пушечная» схема представляет собой метод набора критического состояния сборки (либо других вариантов управления, например «глушения» аварийного) путем введения в неё различных регулировочных элементов (как в абсолютно любом реакторе). Импловивная схема — это метод удержания газа (плазмы) в определённом объёме. Помимо удержания

взрывной волной, можно указать удержание плазмы например электромагнитным излучением.

Пушечная схема

«Пушечная схема» использовалась в некоторых моделях ядерного оружия первого поколения. Суть пушечной схемы заключается в выстреливании зарядом пороха одного блока делящегося материала докритической массы («пуля») в другой — неподвижный («мишень»). Блоки рассчитаны так, что при соединении с некоторой расчётной скоростью их общая масса становится надкритической, массивная оболочка заряда обеспечивает выделение значительной энергии (десятки килотонн Т. Э.) раньше, чем блоки испарятся. Конструкция заряда также обеспечивала предотвращение испарения «снаряда и мишени» до момента развития необходимой скорости, также в ней были приняты меры по снижению этой скорости с 800 м/с до 200—300 м/с, что позволило значительно облегчить конструкцию. Также были приняты специальные меры по предотвращению разрушения «снаряда» в момент «выстрела», так как перегрузки при его разгоне по столь короткому «стволу» были значительными.

Данный способ детонации возможен только в урановых боеприпасах, так как плутоний имеет на два порядка более высокий нейтронный фон (этот факт позволяет сделать важный вывод. раньше плутоний был интересен как материал для импульсных реакторов и «бомб» (разрушающихся импульсных реакторов) из-за этого фона, теперь же благодаря обширным технологиям по генерированию нейтронов от чрезвычайно дорогого и вредного плутония вполне можно отказаться), что резко повышает вероятность преждевременного развития цепной реакции до соединения блоков. Это приводит к неполному выходу энергии (т. н. «шипучка», англ. *fizzle*). Для реализации пушечной схемы в плутониевых боеприпасах требуется увеличение скорости соединения частей заряда до технически недостижимого уровня. Кроме того, уран лучше чем плутоний выдерживает механические перегрузки. Поэтому плутониевые бомбы используют импозивную схему подрыва, которая технически значительно более сложная и требует большого объёма инженерных расчётов.

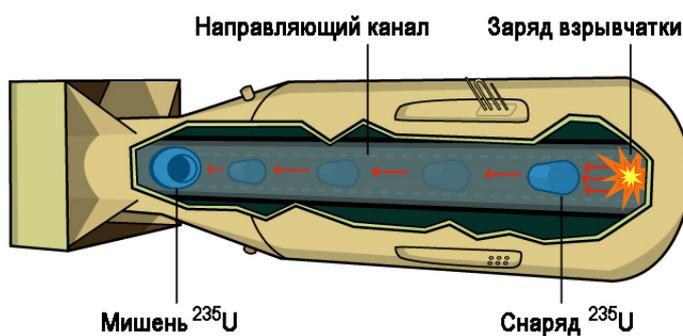


Рис.2. Устройство бомбы с пушечной схемой.

Классическим примером пушечной схемы является бомба «Малыш» («Little Boy»), сброшенная на Хиросиму 6 августа 1945 г. Уран для её производства был добыт в Бельгийском Конго (ныне Демократическая Республика Конго), в Канаде (Большое Медвежье озеро) и в США (штат Колорадо). Этот уран, напрямую добытый из шахт, использовать в столь простой и технологичной бомбе было нельзя. В действительности, природный уран требовал операции обогащения. Для получения обогащённого урана по технологиям тех лет потребовалось возвести огромные производственные здания протяжённостью до километров и стоимостью в миллиарды тогдашних долларов. Выход же высокообогащённого урана был довольно невелик, а процесс его получения был невероятно энергозатратным, что и определяло огромную стоимость каждого боеприпаса. Тем не менее, конструкция первой «пушечной» бомбы по существу представляла собой некоторую доработку серийного артиллерийского орудия. Так в бомбе «Little Boy» использовался укороченный до 1,8 м ствол морского орудия калибра предположительно 164 мм. При этом урановая «мишень» представляла собой цилиндр диаметром 100 мм и массой 25,6 кг, на который при «выстреле» надвигалась цилиндрическая «пуля» массой 38,5 кг с соответствующим внутренним каналом. Такая, на первый взгляд, странная конструкция была выбрана для снижения нейтронного фона мишени: в нём она находилась не вплотную, а на расстоянии 59 мм от нейтронного отражателя (тампера). В результате риск преждевременного начала цепной реакции деления с неполным энерговыделением снижался до нескольких процентов.

Имплозивная схема

Имплозивная схема детонации использует обжатие делящегося материала сфокусированной ударной волной, создаваемой взрывом химической взрывчатки. Для фокусировки ударной волны используются так называемые взрывные линзы. Подрыв производится одновременно во

многих точках с высокой точностью. Это достигается при помощи детонационной разводки: от одного взрывателя по поверхности сферы расходятся сеть канавок заполненных взрывчатым веществом. Форма сети и её разветвление подбирается таким образом, чтобы в конечных точках взрывная волна через отверстия в сфере достигала центров взрывных линз одновременно. Формирование сходящейся ударной волны обеспечивалось использованием взрывных линз из «быстрой» и «медленной» взрывчаток — ТАТВ (триаминотринитробензол) и баратола (смесь тринитротолуола с нитратом бария), и некоторыми добавками. Создание подобной системы расположения взрывчатки и подрыва являлось в своё время одной из наиболее сложных и трудоёмких задач. Для её решения потребовалась выполнить гигантский объём сложных вычислений по гидро- и газодинамике.

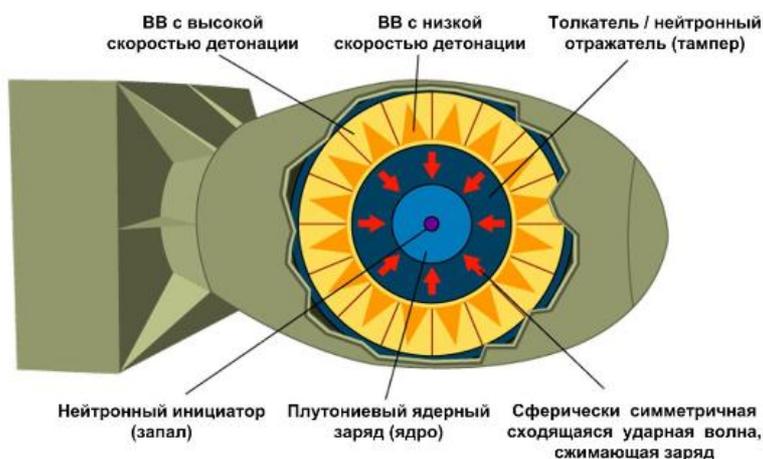


Рис.3. Устройство бомбы с имплозивной схемой.

По такой схеме было исполнено первое ядерное взрывное устройство «Gadget» (англ. gadget — приспособление), взорванное на башне с целью проверки на практике работы имплозивной схемы в ходе испытаний «Trinity» («Троица») 16 июля 1945 года на полигоне неподалеку от местечка Аламогордо в штате Нью-Мексико. Вторая из применённых атомных авиабомб — «Толстяк» («Fat Man»), — сброшенная на Нагасаки 9 августа 1945 года, была исполнена по такой же схеме. Фактически, «Gadget» был лишённым внешней оболочки прототипом «Толстяка». В этой атомной бомбе в качестве нейтронного инициатора был использован так называемый «ёжик» (англ. *urchin*). Впоследствии эта схема была признана малоэффективной, и неуправляемый тип нейтронного инициирования почти не применялся в дальнейшем. Длительность реакции можно узнать из уравнения:

$$N \sim N_0 \cdot e^{\lambda t}$$

где N — число нейтронов без учёта потерь, требуемое для взрыва определённого энерговыделения и, соответственно число реакций деления; например для 10 кт это $1,45 \cdot 10^{24}$ нейтронов и реакций; N_0 — число нейтронов, изначально вступающих в реакцию; n — количество поколений нейтронов, длительность одного поколения $\sim 10^{-8}$ с ($5,6 \cdot 10^{-9}$ с для плутония при энергии нейтронов 2 МэВ).

Например, максимально длительный процесс с энерговыделением 10 кт, вызванный одним нейтроном ($N_0 = 1$), пройдёт в ~ 56 поколений и продлится $3,14 \cdot 10^{-7}$ с. Такая продолжительность может оказаться неприемлемой, так как не хватит времени детонационного обжаривания и плутоний разлетится без взрыва. Использование вспомогательного источника нейтронов позволяет значительно сократить потребное количество поколений и ускорить процесс: например, «впрыск» в зону реакции 10^{15} нейтронов сокращает время до $1,2 \cdot 10^{-7}$ с, а 10^{21} нейтронов — до $0,4 \cdot 10^{-7}$ с.

В ядерных зарядах на основе реакции деления в центре полый сборки обычно размещается небольшое количество термоядерного топлива (дейтерий и тритий), которое нагревается и сжимается в процессе деления сборки до такого состояния, что в нём начинается термоядерная реакция синтеза. Эту газовую смесь необходимо непрерывно обновлять, чтобы скомпенсировать непрерывно идущий самопроизвольный распад ядер трития. Выделяющиеся при этом дополнительные нейтроны инициируют новые цепные реакции в сборке и возмещают убыль нейтронов, покидающих активную зону, что приводит к многократному росту энергетического выхода от взрыва и более эффективному использованию делящегося вещества. Варьируя содержание газовой смеси в заряде получают боеприпасы с регулируемой в широких пределах мощностью взрыва.

Термоядерный синтез

Термоядерная реакция — разновидность ядерной реакции, при которой лёгкие атомные ядра объединяются в более тяжёлые за счёт кинетической энергии их теплового движения.

Для того, чтобы произошла ядерная реакция, исходные атомные ядра должны преодолеть так называемый «кулоновский барьер» — силу электростатического отталкивания между ними. Для этого они должны иметь большую кинетическую энергию. Согласно кинетической теории, кинетическую энергию движущихся микрочастиц вещества (атомов, молекул или ионов) можно представить в виде температуры, а следовательно, нагревая вещество, можно достичь ядерной реакции. Именно эту

взаимосвязь нагревания вещества и ядерной реакции и отражает термин «термоядерная реакция».

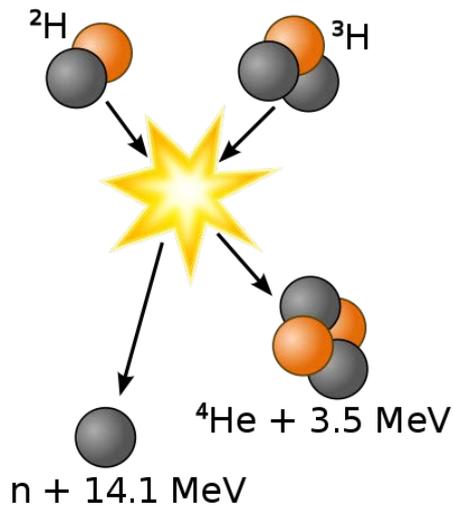


Рис.4. Схема реакции дейтерий-тритий

Термоядерное взрывное устройство может быть построено как с использованием жидкого дейтерия, так и газообразного сжатого. Но появление термоядерного оружия стало возможным только благодаря разновидности гидрида лития — дейтериду лития-6. Это соединение тяжёлого изотопа водорода — дейтерия и изотопа лития с массовым числом 6.

Дейтерид лития-6 — твёрдое вещество, которое позволяет хранить дейтерий (обычное состояние которого в нормальных условиях — газ) при плюсовых температурах, и, кроме того, второй его компонент — литий-6 — это сырьё для получения самого дефицитного изотопа водорода — трития. Собственно, ${}^6\text{Li}$ — единственный промышленный источник получения трития.

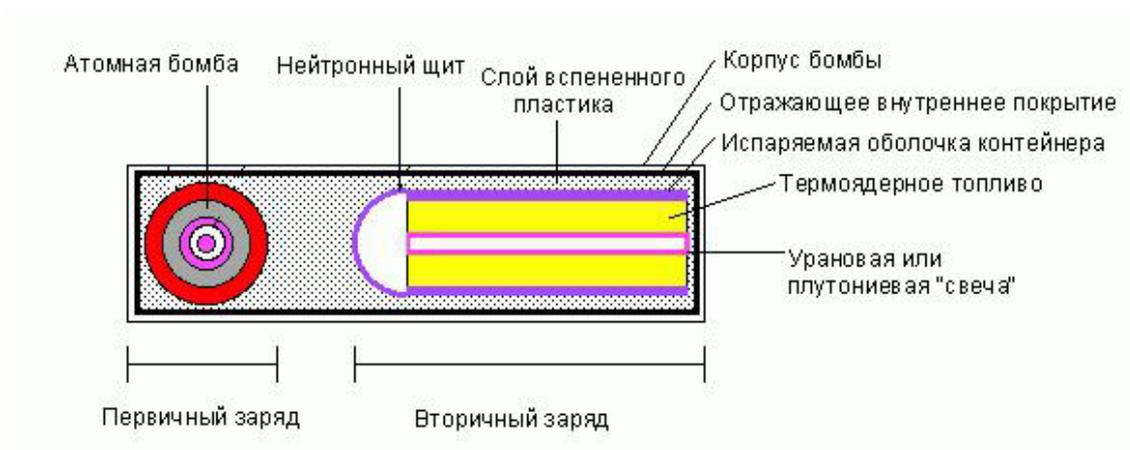


Рис.5. Устройство термоядерного боеприпаса.

В ранних термоядерных боеприпасах США использовался также и дейтерид природного лития, содержащего в основном изотоп лития с массовым числом 7. Он также служит источником трития, но для этого нейтроны, участвующие в реакции, должны иметь энергию 10 МэВ и выше.

Термоядерная бомба, действующая по принципу Теллера-Улама, состоит из двух ступеней: триггера и контейнера с термоядерным горючим.

Триггер — это небольшой плутониевый ядерный заряд с усилением мощностью в несколько килотонн. Назначение триггера — создать необходимые условия для инициирования термоядерной реакции — высокую температуру и давление.

Контейнер с термоядерным горючим — основной элемент бомбы. Внутри него находится термоядерное горючее — дейтерид лития-6 — и, расположенный по оси контейнера, плутониевый стержень, играющий роль запала термоядерной реакции. Оболочка контейнера может быть изготовлена как из урана-238 — вещества, расщепляющегося под воздействием быстрых нейтронов ($>0,5$ МэВ), выделяющихся при реакции синтеза, так и из свинца. Контейнер покрывается слоем нейтронного поглотителя (соединений бора) для защиты термоядерного топлива от преждевременного разогрева потоками нейтронов после взрыва триггера. Расположенные соосно триггер и контейнер заливаются специальным пластиком, проводящим излучение от триггера к контейнеру, и помещаются в корпус бомбы, изготовленный из стали или алюминия.

Возможен вариант, когда вторая ступень делается не в виде цилиндра, а в виде сферы. Принцип действия тот же, но вместо плутониевого запального стержня используется плутониевая полая сфера, находящаяся внутри и перемежающаяся со слоями дейтерида лития-6. Ядерные испытания бомб со сферической формой второй ступени показали бóльшую эффективность, чем у бомб, использующих цилиндрическую форму второй ступени.

При взрыве триггера 80% энергии выделяется в виде мощного импульса мягкого рентгеновского излучения, которое поглощается оболочкой второй ступени и пластиковым наполнителем, который превращается в высокотемпературную плазму под большим давлением. В результате резкого нагрева урановой (свинцовой) оболочки происходит абляция вещества оболочки и появляется реактивная тяга, которая вместе с давлениями света и плазмы обжимает вторую ступень. При этом её объём уменьшается в несколько тысяч раз, и термоядерное топливо нагревается до огромных температур. Однако давление и температура ещё недоста-

точные для запуска термоядерной реакции, создание необходимых условий обеспечивает плутониевый стержень, который в результате сжатия переходит в надкритическое состояние — начинается ядерная реакция внутри контейнера. Испускаемые плутониевым стержнем в результате деления ядер плутония нейтроны взаимодействуют с ядрами лития-6, в результате чего получается тритий, который далее взаимодействует с дейтерием.

Классификация ядерных взрывов

Ядерные взрывы обычно классифицируют по двум признакам: *мощности заряда*, производящего взрыв, и *местоположению* точки нахождения заряда в момент подрыва (центр ядерного взрыва). Проекция этой точки на поверхность земли называется эпицентром ядерного взрыва. Мощность ядерного взрыва измеряется в так называемом тротиловом эквиваленте — массе тринитротолуола, при взрыве которого выделяется столько же энергии, сколько при оцениваемом ядерном. Наиболее часто используемыми единицами измерения мощности ядерного взрыва служат 1 килотонна (кт) или 1 мегатонна (Мт) тритилового эквивалента.

Классификация по мощности

Таблица 1. Классификация ядерных взрывов по мощности.

Мощность	Сверхмалая менее 1 кт	Малая 1—10 кт	Средняя 10—100 кт	Большая 100—1000 кт	Сверхбольшая свыше 1 Мт
Диаметр огненного шара	50—200 м	200—500 м	500—1000 м	1000—2000 м	свыше 2000 м
Максимум свечения	до 0,03 сек	0,03—0,1 сек	0,1—0,3 сек	0,3—1 сек	1—3 сек и более
Время свечения	0,2 сек	1—2 сек	2—5 сек	5—10 сек	20—40 сек
Высота «гриба»	менее 3,5 км	3,5—7 км	7—12,2 км	12,2—19 км	свыше 19 км
Высота облака	менее 1,3 км	1,3—2 км	2—4,5 км	4,5—8,5 км	свыше 8,5 км
Диаметр облака	менее 2 км	2—4 км	4—10 км	10—22 км	свыше 22 км

Классификация по нахождению центра взрыва

Приведённая высота (глубина) заряда в метрах на тонны тротилового эквивалента в кубическом корне (в скобках пример для взрыва мощностью 1 мегатонна):

- **космический**: свыше 100 км
 - **магнитосферный** — взрыв в пределах магнитосферы: от 400–500 км до магнитопаузы
 - **экзоатмосферный** — взрыв в экзосфере: от 400—800 км (экзобаза) до 100 тыс. км
- **атмосферные**:
 - **высотный**: более 10—15 км, но чаще считается на высотах 40–100 км, когда ударная волна почти не образуется
 - **высокий воздушный**: свыше $10 \text{ м/т}^{1/3}$, когда форма вспышки близка к сферической (свыше 1 км)
 - **низкий воздушный**: от 3,5 до $10 \text{ м/т}^{1/3}$ — огненная сфера в процессе роста могла бы коснуться земли, но вместо этого отбрасывается вверх отражённой от поверхности ударной волной и принимает усечённую форму (от 350 до 1000 м)
- **наземный** — от глубины $0,3 \text{ м/т}^{1/3}$ до высоты $3,5 \text{ м/т}^{1/3}$ — вспышка касается земли и принимает форму полусферы (от глубины 30 м до высоты 350 м):
 - **наземный с образованием вдавненной воронки без значительного выброса грунта**: ниже $0,5 \text{ м/т}^{1/3}$ (ниже 50 м)
 - **наземный контактный**: от глубины 0,3 до высоты $0,3 \text{ м/т}^{1/3}$ — когда грунт из воронки выбрасывается и попадает в светящуюся область (от высоты 30 м до глубины 30 м)
- **подземный** — полусферическая светящаяся область не образуется и воздушная ударная волна ослабляется с увеличением глубины:
 - **на выброс (выброс грунта и кратер в разы больше, чем при наземном взрыве)**
 - **малозаглублённый** — на глубине от 0,3 до $3,5 \text{ м/т}^{1/3}$ (глубина 30–350 м)
 - **взрыв рыхления** — в глубине образуется полость или столб обрушения, а на поверхности кольцеобразный вывал грунта (холм вспучивания), в центре которого провальная воронка
 - **камуфлетный**: глубже $7\text{--}10 \text{ м/т}^{1/3}$ — в глубине остаётся замкнутая (котловая) полость или столб обрушения; если столб обрушения достигает поверхности, то образуется провальная воронка без холма вспучивания (глубже 700—1000 м)

- **надводный** — на высоте над водой до $3,5 \text{ м/т}^{1/3}$ (до 350 м)
- **надводный контактный** — происходит испарение воды и образуется подводная ударная волна
- **подводный:**
 - на малой глубине: менее $0,3 \text{ м/т}^{1/3}$ — вода испаряется до поверхности и столб воды (взрывной султан) не образуется, 90 % радиоактивных загрязнений уходит с облаком, 10 % остаётся в воде (менее 30 м)
 - с образованием взрывного султана и облака султана: $0,25—2,2 \text{ м/т}^{1/3}$ (25—220 м)
 - глубоководный: глубже $2,5 \text{ м/т}^{1/3}$ — когда образующийся пузырь выходит на поверхность с образованием султана, но без облака, 90 % радиоактивных продуктов остаётся в воде в районе взрыва и не более 10 % выходит с брызгами базисной волны (глубже 250 м).

Явления при ядерном взрыве

Сопутствующие ядерному взрыву явления варьируют от местонахождения его центра. Ниже рассматривается случай атмосферного ядерного взрыва в приземном слое, который был наиболее частым до запрета ядерных испытаний на земле, под водой, в атмосфере и в космосе. После инициирования реакции деления или синтеза за очень короткое время порядка долей микросекунд в ограниченном объёме выделяется огромное количество лучистой и тепловой энергии. Реакция обычно заканчивается после испарения и разлёта конструкции взрывного устройства вследствие огромной температуры (до 10^7 К) и давления (до 10^9 атм.) в точке взрыва. Визуально с большого расстояния эта фаза воспринимается как очень яркая светящаяся точка.

Световое давление от электромагнитного излучения при реакции нагревает и вытесняет окружающий воздух от точки взрыва — образуется огненный шар и начинает формироваться скачок давления между воздухом, сжатым излучением, и невозмущённым, поскольку скорость перемещения фронта нагрева изначально многократно превосходит скорость звука в среде. После затухания ядерной реакции энерговыделение прекращается и дальнейшее расширение происходит за счёт разницы температур и давлений в области огненного шара и окружающего воздуха.

Происходящие в заряде ядерные реакции служат источником разнообразных излучений: электромагнитного в широком спектре от радиоволн до высокоэнергичных гамма-квантов, нейтронов, атомных ядер. Это излучение, называемое проникающей радиацией, порождает ряд характерных только для ядерного взрыва последствий. Нейтроны и высоко-

энергичные гамма-кванты, взаимодействуя с атомами окружающего вещества, преобразуют их стабильные формы в нестабильные радиоактивные изотопы с различными путями и периодами полураспада — создают так называемую наведённую радиацию. Наряду с осколками атомных ядер расщепляющегося вещества или продуктами термоядерного синтеза, оставшимися от взрывного устройства, вновь получившиеся радиоактивные вещества поднимаются высоко в атмосферу и способны рассеяться на большой территории, формируя радиоактивное заражение местности после ядерного взрыва. Спектр образующихся при ядерном взрыве нестабильных изотопов таков, что радиоактивное заражение местности способно длиться тысячелетиями, хотя интенсивность излучения падает со временем. На каждую килотонну мощности взрыва образуется примерно 37 г высокоактивных осколков, через 1 мин после ядерного взрыва их активность по гамма-излучению эквивалентна активности 30 000 т радия. Однако, продукты деления при ядерном взрыве, главным образом, представлены быстро распадающимися радионуклидами. Поэтому активность осколков в течение суток после взрыва снижается более чем в 3000 раз. Долговременное радиоактивное заражение местности после ядерного взрыва обуславливается активностью следующих долгоживущих продуктов деления (в скобках указаны периоды полураспада): ^{89}Sr (50,5 сут), ^{103}Ru (39,8 сут), ^{131}I (8,05 сут), ^{141}Ce (31,1 сут), ^{95}Zr (65 сут), ^{106}Ru (365 сут), ^{140}Ba (12,8 сут), ^{144}Ce (285 сут), ^{85}Kr (10,7 лет), ^{137}Cs (30 лет), ^{90}Sr (28 лет).

Высокоэнергичные гамма-кванты от ядерного взрыва, проходя через окружающую среду, ионизируют её атомы, выбивая из них электроны и сообщая им достаточно большую энергию для каскадной ионизации других атомов, вплоть до 30000 ионизаций на один гамма-квант. В результате под эпицентром ядерного взрыва остаётся «пятно» положительно заряженных ионов, которые окружены гигантским количеством электронного газа. В процессе рекомбинации порождаются сильные электрические токи, служащие дополнительным источником электромагнитного излучения. Весь этот комплекс явлений называется электромагнитным импульсом, и хотя в него уходит менее трети десятиллиардной доли энергии взрыва, происходит он за очень короткое время и выделяющаяся при этом мощность может достигать 100 ГВт.

Наземный ядерный взрыв в отличие от обычного также имеет свои особенности. При химическом взрыве температура грунта, примыкавшего к заряду и вовлечённого в движение относительно невелика. При ядерном взрыве температура грунта возрастает до десятков миллионов градусов и большая часть энергии нагрева в первые же мгновения излучается в воздух и дополнительно идёт в образование теплового излучения

и ударной волны, чего при обычном взрыве не происходит. Отсюда резкое различие в воздействии на поверхность и грунтовый массив: наземный взрыв химического взрывчатого вещества передаёт в грунт до половины своей энергии, а ядерный — считанные проценты. Соответственно размеры воронки и энергия сейсмических колебаний от ядерного взрыва в разы меньше оных от одинакового по мощности взрыва ВВ. Однако при заглоблении зарядов это соотношение сглаживается, так как энергия перегретой плазмы меньше уходит в воздух и идёт на совершение работы над грунтом.

1. Физика ядерного взрыва. В 5 т. — 3-е, дополненное / Министерство обороны РФ. 12 Центральный НИИ. — М.: Издательство физико-математической литературы, 2009. — Т. 1. Развитие взрыва.
2. Информационный ресурс “Ядерная физика в интернете”. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/>
3. Виртуальная энциклопедия “Википедия”. <https://ru.wikipedia.org>