

# Лекция 8

# Теория горения и взрывов

доктор технических наук, профессор  
Лепешкин Олег Михайлович

---

# **Тема 3: Классификация процессов горения газов, жидкостей и твердых веществ**

## **3.2. Переход горения в детонацию. Взрыв**

### **Учебные вопросы**

- **ВЗРЫВ**
-

## Учебная литература:

- 1. Зинченко А.В. Теория горения и взрыва, 2016.  
URL:  
[http:// elib.spbstu.ru/dl/2/s16-138.pdf](http://elib.spbstu.ru/dl/2/s16-138.pdf)**
-

ВЗРЫВ

---

**Взрывом называют** физическое или/и химическое превращение вещества, при котором его энергия быстро переходит в энергию сжатия и движения самого вещества или продуктов его превращения и окружающей среды. Энергия взрыва может быть различной. Выделение химической, электрической, ядерной, термоядерной, тепловой, кинетической энергии, энергии упругого сжатия способно сопровождаться взрывными процессами.

Таким образом, под взрывом понимается явление, связанное с внезапным изменением состояния вещества, сопровождающееся резким звуковым эффектом и быстрым выделением энергии, приводящим к разогреву, движению и сжатию продуктов взрыва и окружающей среды.

При взрыве выделяющаяся энергия приводит к развитию двух основных процессов:

- дефлаграции;
  - детонации.
-

**Дефлаграция** - процесс дозвукового горения, при котором образуется быстро перемещающаяся зона (фронт) химических превращений.


В большинстве перемешанных газопаровоздушных смесей при возникновении горения со взрывом распространение пламени по исходной смеси происходит со сравнительно низкой скоростью, соответствующей нескольким метрам в секунду.

В самоподдерживающейся волне этого процесса, фронт реакции которого продвигается по горючей смеси благодаря теплопроводности и конвекции в направлении от сгоревшего газа к не сгоревшему. При этом в открытом пространстве не происходит повышения давления, обусловленного ускорением реакции. В замкнутом же объеме повышение давления носит пространственно равномерный характер и является в основном результатом роста в нем температуры смеси. Такое повышение среднего давления для типичных углеводородо-воздушных смесей достигает 0,6-0,8 М Па, что в условиях замкнутого объема может привести к разрушению ограждающих очаг горения сплошных конструкций.

Дефлаграция способна симметрично распространяться во все стороны от источника зажигания. Она характеризуется генерацией низкой волны давления, не обладающей ударным действием.

Взрыв в форме дефлаграционного горения также называют **тепловым взрывом**.

---



**Тепловой взрыв** — явление горения, возникающее при самовоспламенении системы и сопровождающееся выделением большого количества теплоты.

При тепловом самовоспламенении причиной ускорения реакции окисления и возникновения горения является превышение скорости выделения теплоты в системе над скоростью теплоотвода.

Возникающие при таком горении химические экзотермические реакции развиваются с большими скоростями, ускоряя процессы самовоспламенения. При этом система взрывается с выделением большого количества теплоты, приводя к тепловому взрыву.

При тепловом взрыве передача энергии от одного слоя горючего вещества к другому происходит путем теплопроводности. Такие взрывы характерны, например, для горения легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), горючих жидкостей (ГЖ), смесей газов и паров с воздухом, а также порохов и пр.

---

**Детонация** (от средневекового латинского *detonatio* — взрыв; латинского *detono* — гремлю) — распространение со сверхзвуковой скоростью зоны быстрой экзотермической химической реакции, следующей за фронтом ударной волны.

**Взрыв в форме детонации** — это процесс передачи энергии, обусловленный прохождением ударной волны со сверхзвуковой скоростью.

В случае детонационного взрыва газы образуются очень быстро, давление возрастает мгновенно до больших величин. Возникновение повышенного давления в области взрыва вызывает образование в окружающей среде ударной волны с сильным разрушающим действием.

**Ударная волна** — тонкая переходная область, распространяющаяся со сверхзвуковой скоростью, в которой происходит резкое увеличение плотности, давления и температуры вещества.

Явление дефлаграции и детонации наблюдается при взрывах, в основном, в газо-, паровоздушных смесях.



# Разновидности взрывов

## Химические взрывы

К химическим взрывам относятся процессы быстрого химического превращения вещества, проявляющиеся горением и характеризующиеся выделением тепловой энергии за короткий промежуток времени и в таком объеме, что образуются волны давления, распространяющиеся от источника взрыва.

Химические превращения происходят в результате следующих реакций:

- разложения;
- окислительно-восстановительных;
- поляризации, изомеризации и конденсации.

По характеру взрывного процесса в пространстве все химические взрывы подразделяются на:

- точечные (сосредоточенные);
  - объемные.
-

# Разновидности взрывов



**Точечными взрывами** являются, в основном, взрывы твердого или жидкого вещества, занимающие малый объем относительно зоны воздействия. Примером может служить взрыв заряда взрывчатого вещества, например, тринитротолуола и др.

**Объемный взрыв** представляет собой взрыв газо-, паро- или пыле-воздушного облака, занимающего значительный относительно зоны воздействия объем. При таком взрыве образуется значительное паро-, газозоудушное облако.

**Облако** представляет собой разогретую горящую смесь, называемую огненным шаром.

**Огненный шар** — это крупномасштабное диффузное пламя сгорающей массы горючего или парового облака, поднимающегося над поверхностью земли (ГОСТ Р 12.3.047—98). Огненный шар распространяется в среде со значительной скоростью.

---

## **Физические взрывы**

К физическим взрывам относятся процессы, приводящие к возникновению внутреннего давления, которое превышает предельно допустимые значения для оборудования.

### К физическим относятся взрывы:

- сосудов, работающих под давлением;
- оборудования из-за увеличения давления внутри него выше нормы;
- электрические;
- за счет энергии фазового перехода <<жидкость—кристалл>>, а также физическая детонация.

## **Взрывы сосудов, работающих под давлением**

### Причины, вызывающие взрывы:

- снижение прочности стенок сосуда;
- заполнение емкости сосуда сверх нормы;
- дефекты, допущенные при монтаже, ремонте сосуда;
- конструктивные недостатки сосуда;
- коррозия стенок сосуда, т. е. разрушение материала, вещества вследствие физико-химического воздействия на них других веществ, находящихся в сосуде или внешней среде;
- эрозия материала сосудов, т. е. разрушение материалов стенок вследствие механического воздействия находящихся в сосуде веществ и материалов или вследствие электрических разрядов.

## **Взрывы оборудования из-за увеличения давления внутри него**

Причины возникновения таких взрывов:

- внезапное уменьшение или прекращение расхода воды в паровых котлах;
- поломка приборов автоматики, контролирующей подачу пара;
- нарушение температурного режима оборудования, приводящее к нагреванию паров или газов выше установленного режима;
- снижение уровня воды (упуск) в паровых котлах.

Упуском воды называется такое нарушение работы котла или другого оборудования, при котором уровень воды в них снижается настолько, что часть поверхности нагрева оборудования перестает омываться водой и начинает перегреваться.

---

## Электрические взрывы

**Электрические взрывы** — это мощные искровые разряды в газах (например, молния) и взрывы металлических проводников (ЭВП) при пропускании через них токов большой плотности (порядка  $10^7$  А/см<sup>2</sup>) за  $10^{-5}$ — $10^{-7}$  с.

При газовых разрядах разность электрических потенциалов выравнивается за малые промежутки времени, так что плотность выделяемой при этом энергии соизмерима с параметрами ядерных взрывов.

Взрыв металлических проводников (проволочек) обусловлен быстрым испарением металла и переходом его в плазменное состояние с последующим расширением плазмы и преобразованием тепловой энергии в потенциальную энергию сжатия. Чрезвычайно быстрый нагрев проволочек до температуры  $10^4$

К способствует их существенному перегреву выше точки кипения металла, при этом наблюдается быстрое расширение паров металла с образованием ударных волн.

Электрический взрыв проводников (ЭВП).

**Таким образом, ЭВП** — это резкое изменение физического состояния металла в результате интенсивного выделения в нем энергии, приводящее к нарушению металлической электропроводности и сопровождающееся образованием ударной волны и электромагнитного излучения.

## **Взрывы за счет энергии фазового перехода «жидкость—кристалл»**

Причины, вызывающие взрывы:

- вскипание расплава;
- быстрая (мгновенная) перекристаллизация расплава, т. е. быстрое образование кристалла.

Исследования механизмов таких взрывов показали, что их не удастся объяснить с позиции «вскипания» жидкости с последующим образованием метастабильного состояния. Энергия таких взрывов определяется энергией скрытого перехода в системе «жидкость-кристалл»>>.

---

## **Физическая детонация**

При смешении горячей и холодной жидкостей, когда температура одной из них значительно превышает температуру кипения другой (например, при выливании расплавленного металла в воду), может возникать физическая детонация (physiral detonation, vapour explosion).

Механизм протекания физической детонации заключается в быстром (взрывном) испарении парожидкостной смеси, образовавшейся при смешении горячей и холодной жидкостей. При этом наблюдается процесс фрагментации капель расплава, обеспечивающий быстрый теплоотвод и перегрев холодной жидкости. В результате возникает ударная волна с избыточным давлением в жидкой фазе, достигающим тысячи атмосфер.

Физическая детонация происходит также при попадании холодных сред на нагретые до высоких температур поверхности.

---



## Комбинированные взрывы

Взрывы комбинированные, т. е. взрывы, сопровождающиеся выделением энергии и образованием сжатых газов в результате последовательного протекания физического и химического взрывов (или сначала химического взрыва, затем физического), работа которых полностью или частично суммируется.

Комбинированные взрывы по природе механизма возникновения энергии подразделяют следующим образом:

- явление BLEVE;
  - ядерные взрывы;
  - термоядерные взрывы.
-

**BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion)** — взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости.

Сущность этого явления заключается в следующем: при наличии источника воспламенения происходит перегрев горючей жидкости или сжиженного горючего газа. Резкое падение давления в сосуде вызывает вскипание находящейся в нем жидкости и образование воздушной ударной волны. Ударная волна вызывает разрушения оборудования, выброс газо-, паровоздушного облака.

Причины, вызывающие явление BLEVE:

- емкости под давлением, наполненные легкокипящей жидкостью (чаще всего - сжиженным горючим газом), подвергаются внешнему нагреву;
- в процессе нагрева отмечается рост внутреннего давления.

BLEVE - термин, который используется для описания целой совокупности явлений, сопровождающих внезапное разрушение сосуда (баллона, резервуара) с перегретой горючей жидкостью или со сжиженным горючим газом при наличии источника воспламенения. Например, причиной аварий на объектах СУГ (сжиженных углеводородных элементов) является образование огненных шаров и взрывные явления типа BLEVE.

## **Стадии образования расширяющихся паров вскипающей горючей жидкости:**

- действие пламени на сосуд, находящийся под давлением;
  - рост давления в сосуде;
  - перегрев и потеря прочности стенок, не смоченных жидкостью и, как следствие, их разрушение под действием внутреннего давления с образованием волны давления в окружающей среде;
  - выброс с одновременным диспергированием жидкости в окружающее пространство из сосуда и мгновенное ее испарение с образованием парового облака;
  - воспламенение этого облака с образованием волн давления и огненного шара.
-

## **Ядерные взрывы**

Ядерный взрыв основан на способности определенных изотопов тяжелых элементов урана или плутония к делению, при котором ядра исходного вещества распадаются, образуя ядра более легких элементов. При делении всех ядер, содержащихся в 50 г урана или плутония, освобождается такое же количество энергии, как и при детонации 1000 т тринитротолуола.

## **Термоядерные взрывы**

Существует другой тип ядерной реакции — **реакция синтеза легких ядер, сопровождающаяся выделением большого количества энергии.** Силы отталкивания одноименных электрических зарядов (все ядра имеют положительный электрический заряд) препятствуют протеканию реакции синтеза, поэтому для эффективного ядерного превращения такого типа ядра должны обладать высокой энергией. Такие условия могут быть созданы нагреванием веществ до очень высокой температуры. Процесс синтеза, протекающий при высокой температуре, называют термоядерной реакцией. При синтезе ядер дейтерия (изотопа водорода  $2\text{H}$ ) освобождается почти в три раза больше энергии, чем при делении такой же массы урана. Необходимая для синтеза температура достигается при ядерном взрыве урана или плутония.

---

## Взрывы в средах

Взрывы происходят в различных средах. В зависимости от места первоначального выделения энергии взрывы подразделяются:

- воздушный взрыв — это взрыв заряда в газе в отсутствии отражающих поверхностей;
- подземный взрыв — взрыв заряда в грунте;
- подводный взрыв — взрыв заряда в воде;
- наземный взрыв — взрыв заряда на поверхности грунта (поверхностный).

Действие взрыва зависит от характеристик среды и от условий его осуществления, таких как глубина (высота) под или над границей раздела фаз.

---

## **Случайные взрывы**

Неконтролируемые взрывы происходят случайно, поэтому их называют случайными.

Термин «случайный взрыв» включает широкий спектр взрывов, и каждый из них в отдельных своих проявлениях отличается от остальных. Причинами таких взрывов чаще всего являются процессы горения.

Случайные взрывы происходят:

- при изготовлении, хранении, транспортировке горючих, взрывоопасных веществ;
- нарушении технологических режимов, поломке оборудования.

Чаще всего взрывы имеют место в химической, нефтеперерабатывающей промышленности, при утечке природного газа и т. д.

## **Классификация случайных взрывов**

Случайные взрывы объединены в группы, каждая из которых имеет отличительные особенности.

Случайные взрывы подразделяются:

- на взрывы газов, паров и пыли в замкнутых объемах без избыточного давления;
  - взрывы сосудов с газом под давлением;
  - взрывы, вызванные горением;
  - взрывы емкостей с перегретой жидкостью;
  - взрывы неограниченных облаков пара;
  - физические (паровые) взрывы и др.
-

## **Взрывы паров горючего и пыли в замкнутых объемах**

Для возникновения таких взрывов необходимы следующие условия:

- высокая концентрация пыли в замкнутых объемах (помещениях реакторов, топочных устройствах, трубопроводах и пр.);
- спонтанное воспламенение пыли.

Для того чтобы облако пыли взорвалось, необходима такая концентрация пыли, при которой характерное расстояние поглощения и рассеяния света составляет примерно 0,2 м. Подобные облака, как правило, непрозрачны, и концентрация пыли в них выше переносимой человеком. Такие условия могут достигаться лишь внутри трубопроводов и специального оборудования, т. е. в закрытых объемах.

Взрывы пыли склонны к спонтанному воспламенению. Воспламенение возникает от источника зажигания (искра, открытый огонь и т. д.) при нижнем или верхнем концентрационных пределах воспламенения.

---

