

Лекция 3

Теория горения и взрывов

доктор технических наук, профессор
Лепешкин Олег Михайлович

Тема: Кинетическая реакция горения

Учебные вопросы

- 1.** Классификация видов и процессов горения и взрыва.
 - 2.** Условия протекания процессов горения и взрыва.
-

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)**
-



1. Классификация видов и процессов горения и взрыва

Горение - одно из основных форм получения и преобразования энергии, основа многих технологических процессов производства.

Поэтому человек постоянно изучает и познает процессы горения. История науки о горении начинается с открытия М.В. Ломоносова: «Горение есть соединение веществ с воздухом». Это открытие послужило основанием для открытия закона сохранения массы при физических и химических превращениях веществ. Лавуазье уточнил определение процесса горения: «Горение есть соединение веществ не с воздухом, а с кислородом воздуха».

Горение – сложный, быстро протекающий химический процесс, сопровождающийся выделением тепла и света.

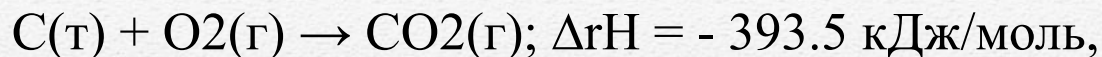
В основе процессов горения лежат экзотермические окислительно-восстановительные реакции, которые подчиняются законам химической кинетики, химической термодинамики и др. фундаментальным законам природы (закону сохранения массы, энергии и т.д.).

Схема процесса горения веществ



Обычно рассматривают химические реакции горючих веществ с кислородом воздуха.

Например, горение каменного угля, состоящего в основном из углерода:



где $\Delta_r\text{H} < 0$ – **энтальпия** химической реакции, указывающая, что при сгорании 12 г углерода ($n = 1$ моль) выделяется (- 393.5 кДж) энергия в форме теплоты.

Горение природного газа используется в кухонной газовой горелке, двигателе некоторых автомобилей, паровых турбинах электростанций или котельных горячего водоснабжения.

В природном газе метан является основным компонентом (до 98 об.%). Его реакция с молекулярным кислородом воздуха сопровождается образованием оксида углерода (IV) и воды:



Тлением называют беспламенное горение твердых тел.

Так горит кокс, применяемый в металлургии. При тлении процессы имеют низкую интенсивность и свечение красного типа.

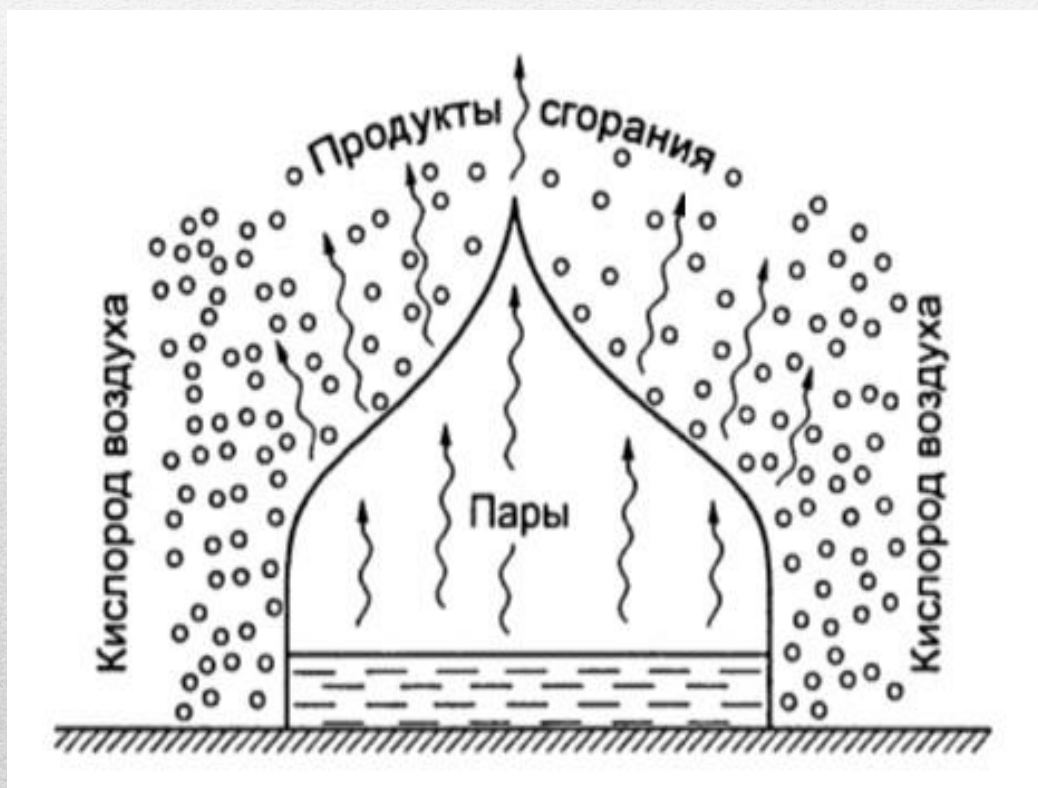
Взрыв также является разновидностью горения. Его отличие в том, что взрывчатые вещества уже содержат в своем составе и окислитель ($-\text{NO}_2$), и восстановитель ($-\text{C}-\text{H}$ группы).

Взрыв – окислительно-восстановительный процесс, сопровождающийся выделением большого количества энергии в ограниченном объеме за короткий промежуток времени.

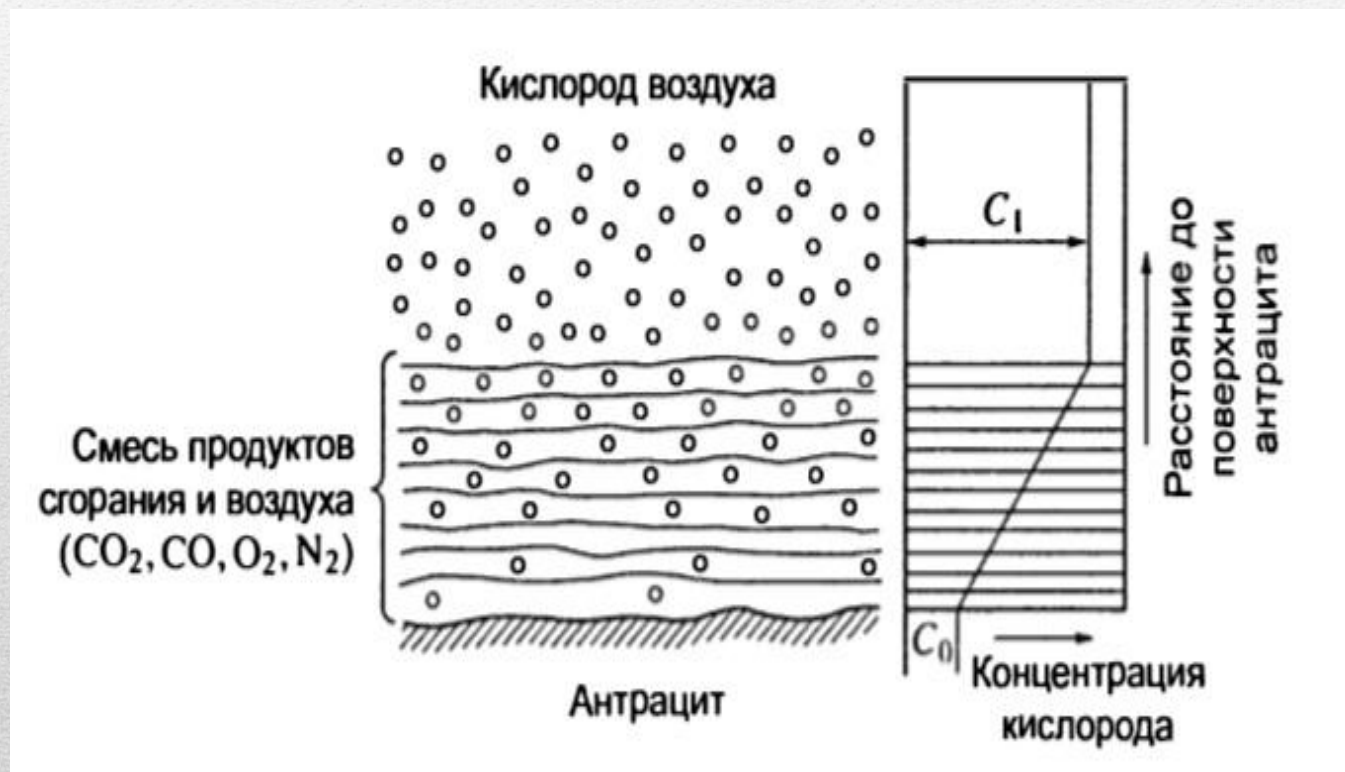
Один и тот же вид горючего может гореть обычным путем и в виде взрыва. Например, при использовании в быту газовых горелок мы проводим обычный процесс горения. Но если заполнить природным газом все пространство кухни, то при возникновении искры или пламени произойдет взрыв.

Различают гомогенное и гетерогенное горение.

При гомогенном горючее и окислитель находятся в одной фазе (обычно в газовой, например, смесь метана с воздухом).



При гетерогенном они находятся в разных фазах, окислитель, как правило, газообразный (например, O_2), а восстановитель твердый (уголь C , древесина, торф) или жидкий (бензин, мазут, дизельное топливо).



Наиболее общим свойством горения гомогенных горючих газовых смесей является проявление в определенных условиях прогрессивного самоускорения процесса – воспламенения.

Воспламенение – начальная стадия горения, в течение которой энергия, подводимая к системе от внешнего источника энергии, приводит к резкому ускорению химической реакции из-за прогрессивного накопления энергии (тепловое воспламенение) или активных промежуточных частиц (цепное воспламенение).

Роль воспламенителя может выполнять пламя, искра, накалившее тело или механическое воздействие в результате резкого сжатия горючей смеси (так происходит воспламенение горючей смеси в дизельном двигателе) или, например, трение различных материалов друг о друга.

При воспламенении необходимо, чтобы концентрации горючего вещества и окислителя находились в определенном соотношении.

Вспышка представляет собой воспламенение смеси воздуха с парами над жидкостью или твердым телом без загорания жидкости или твердого тела.

Вспышка возможна только в том случае, если состав паровоздушной смеси находится между верхним и нижним пределами воспламенения.

Фактически вспышка – процесс неустойчивого, быстро прекращающегося горения.

При воспламенении накаливаемыми телами должно выполняться правило: чем меньше размер тела, с помощью которого производят воспламенение, тем больше должна быть его температура.

Тепловые источники очень маленьких размеров не могут воспламенить горючие смеси.

Воспламеняющая способность разнообразных физико-химических процессов связана с тем количеством энергии, которая выделяется в виде тепла при их проведении. Примером является воспламенение с использованием энергии электрических искр. Для каждой горючей смеси существует минимальная мощность электрической искры, способной ее воспламенить.

Воспламенение **гетерогенных горючих смесей** имеет свои особенности, отличающие их от гомогенных смесей. Из твердых горючих веществ наиболее легко воспламеняются волокнистые и мелкораздробленные материалы (хлопок, войлок, ткань, сено, шерсть, мучная и каменноугольная пыль и др.).

Все они обладают малой теплопроводностью и большой удельной поверхностью, что способствует сохранению тепловой энергии искры в небольшом объеме горючего вещества и, как следствие, быстрому нагреву.

Поскольку **искра нагревает лишь небольшой объем твердых горючих веществ**, то образующихся при этом газообразных продуктов разложения зачастую недостаточно для образования горючей смеси.

Поэтому воспламенение искрами сопровождается обычно не горением волокнистых материалов, а тлением их углеродистого остатка.

Для воспламенения твердых веществ с образованием пламени необходимы более мощные источники воспламенения и более длительное их действие, например, пламя, большие по величине накалинные тела ит.д.

Для воспламенения твердых видов топлива их компоненты должны быть переведены **в газообразное состояние или превращены в легковоспламеняющийся уголь.** Для этого требуется нагрев до высокой температуры.

Распространение пламени встречается двух видов:
детонационная волна и волна горения.

Детонационная волна – один из видов ударной волны, распространение которой сопровождается тепловыделением благодаря реакциям во фронте волны. Эта волна поджигает следующую порцию газа.

Главный признак детонационной волны - огромная разница давлений перед фронтом и позади его. Скорость детонационной волны выше скорости звука (в твердых взрывчатых смесях она может достигать 7-10 км/с) и процесс протекает как взрыв. Большое давление перед фронтом сильно сжимает газовую смесь и образует высоконагретые продукты, которые самовоспламеняются.

Волна горения распространяется посредством диффузии активных частиц в соседние зоны и теплопередачи к соседним слоям газа. Скорость перемещения фронта пламени значительно ниже скорости звука и при этом отсутствует большая разница давлений.



2. Условия протекания процессов горения и взрыва

Горение можно классифицировать по следующим параметрам:

1. По условию смесеобразования горючих компонентов:

а) кинетическое; б) диффузионное.

2. По интенсивности поступления горючих компонентов в зону химической реакции:

а) ламинарное; б) турбулентное.

3. По агрегатному состоянию компонентов горючей смеси:

а) гомогенное; б) гетерогенное.

4. По скорости распространения зоны химической реакции горения:


а) дефлаграционное; б) детонационное.

В зависимости от скорости и механизма распространения зоны химической реакции горения (пламени) по горючей смеси можно выделить два режима горения:

- **дефлаграционное** (медленное) распространение зоны химической реакции (скорость от 0,5 до 50 м/с);
- **детонационное** (взрывное), когда зона химической реакции горения распространяется со скоростью ударной волны (от нескольких сотен метров в секунду до нескольких километров в секунду).

-

В условиях пожара горение в основном протекает в дефлаграционном режиме. Детонационное горение встречается редко (взрывы паро-, газо-, пылевоздушных смесей).



В зависимости от агрегатного состояния компонентов горючей смеси (горючего и окислителя), поступающих в зону горения, различают два вида или режима горения:

- **гомогенное горение** - горючее и окислитель находятся в одинаковом агрегатном состоянии (газообразном);
 - **гетерогенное (разнофазное)** - горючее и окислитель находятся в различных агрегатных состояниях.
-

В зависимости от условий образования горючей смеси и соотношения скорости реакции горения и скорости образования горючей смеси различают два режима горения:

- **кинетическое** - горение предварительно перемешанных газо- или паровоздушных смесей. Так как смесь горючего и окислителя готова к горению до момента ее воспламенения, то суммарная скорость процесса горения зависит только от скорости химической реакции горения. Если такое горение будет происходить в замкнутом или ограниченном объеме, то тогда может произойти взрыв. Так как энергия, выделяющаяся при сгорании смеси, не успевает отводиться за пределы данного объема, за счет увеличения давления возможно разрушение конструкций;

- **диффузионным горением** называется горение, когда образование горючей среды (смешение горючего и окислителя) происходит перед зоной горения или в зоне горения.

В зависимости от скорости поступления компонентов горючей смеси в зону горения различают **ламинарный** и **турбулентный** режимы горения.

Если компоненты горючей смеси поступают в зону горения **сравнительно спокойно**, то такое горение называется **ламинарным**.

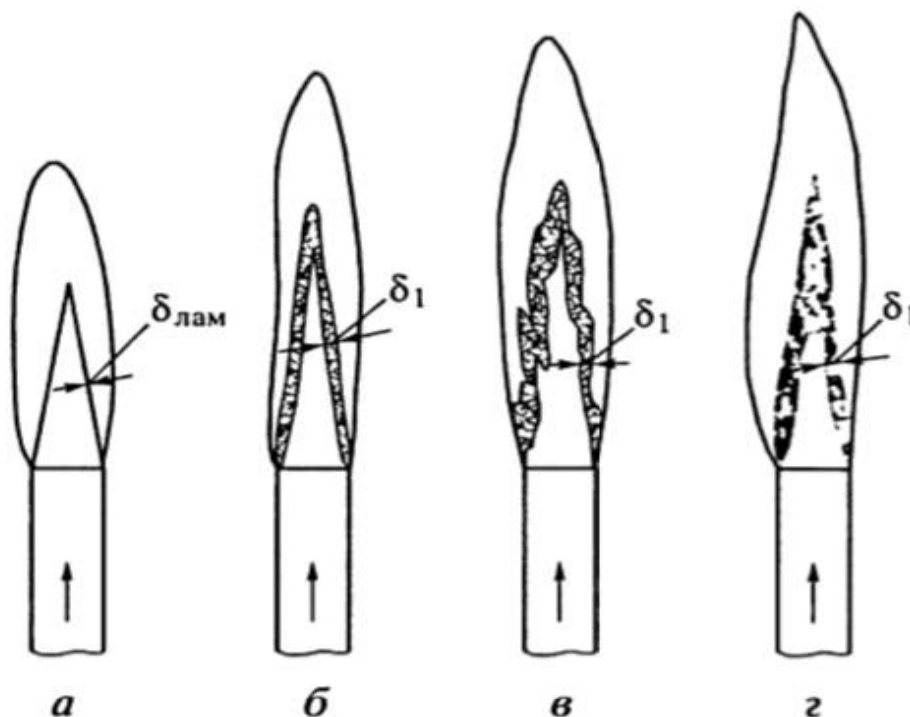


Рис. 1.4. Режимы горения:

a — ламинарное; *б* — мелкомасштабная турбулентность; *в* — масштаб турбулентности превышает толщину зоны горения; *г* — крупномасштабная турбулентность

Количественным критерием, характеризующим термодинамический режим течения жидкостей или газов, является число Рейнольдса (Re). Число Рейнольдса характеризует соотношение между силами инерции и силами трения в потоке:

$$Re = \rho v L / \mu,$$

где ρ – плотность жидкости или газа;

v – средняя скорость потока жидкости или газа;

μ – коэффициент динамической вязкости;

L – характерный линейный размер поверхности жидкости или газа.

При течении жидкости или газа внутри трубы L – это диаметр трубы. В случае пожара величину L можно определить как диагональ площади горения.

При небольших значениях критерия Re течение жидкостей или газов носит ламинарный характер, при больших значениях – турбулентный.

Значение критерия Рейнольдса, характеризующего переход от ламинарного к турбулентному режиму, составляет 2300. При наличии ламинарного течения численное значение критерия Рейнольдса будет значительно меньше критического ($Re < 2300$). Если компоненты горючей смеси поступают в зону горения с большой скоростью, то такое горение называется турбулентным. Число Рейнольдса в этом случае будет больше 2300. Турбулентность увеличивает скорость горения из-за более интенсивной передачи тепла от продуктов горения в свежую смесь.

В зависимости от скорости распространения пламени кинетическое горение подразделяется на:

- **нормальное горение.** Скорость такого горения находится в пределах единиц м/с. Распространение пламени в этом случае происходит при отсутствии внешних возмущений (турбулентности, либо резкого различия в давлении газов). Процесс горения и его скорость зависят только от природы горючего вещества (теплового эффекта, коэффициентов теплопроводности и диффузии). Поэтому для вещества определенного состава скорость горения является строго определенной величиной и составляет 0,3 – 3,0 м/с.;

- **взрывное дефлаграционное горение.** Скорость горения составляет десятки м/с. Примером такого горения служит горение порохов. В закрытом пространстве нормальное горение может переходить в дефлаграционное. Причиной такого перехода может быть развитие турбулентности, например, в результате трения газа о стенки сосуда, что приводит к изменению давления смеси. Последнее усиливает турбулентность, что еще более изменяет давление. Таким образом, происходит лавинообразное повышение скорости распространения пламени до сотен метров в секунду. Такое **ускорение горения называется дефлаграцией.** Скорости такого горения, как правило, дозвуковые, т.е. менее 333 м/с;

- **взрывное детонационное горение.** Скорость горения составляет тысячи м/с. Примером служит детонация взрывчатых веществ. Столь высокие скорости горения приводят к быстрому увеличению объема продуктов горения. Вследствие этого, впереди фронта пламени возникает волна сжатия. Каждая последующая волна догоняет предыдущую и накладывается на нее. В результате эти волны соединяются в одну ударную волну, которая как раз и является отличительным признаком детонационного горения.

