

Горение однородной газовой смеси. Ламинарное и турбулентное диффузионное горение

Преподаватель: Кафедра «Энергетики»
, PhD доктор, ассоциированный профессор
Онгар Булбул

b.ongar@satbayev.university

Введение

- 1 Классификация процессов горения;
- 2 Горение газообразных, жидких и твердых веществ ;
- 3 Диффузионное и кинетическое горение ;
- 4 Нормальное горение;
- 5 Дефлаграционное (взрывное) горение ;
- 6 Детонационное горение.

Классификация процессов горения

По разным признакам и особенностям процессы горения можно разделить на следующие виды:

По агрегатному состоянию горючего вещества:

- горение газов;
- горение жидкостей и плавящихся твердых веществ;
- горение неплавящихся твердых пылевидных и компактных веществ.

Классификация процессов горения

По фазовому составу компонентов:

- гомогенное горение;
- гетерогенное горение;
- горение взрывчатых веществ.

По подготовленности горючей смеси:

- диффузионное горение (пожар);
- кинетическое горение (взрыв).

Классификация процессов горения

По динамике фронта пламени:

- стационарное;
- нестационарное.

По характеру движения газов:

- ламинарное;
- турбулентное.

Классификация процессов горения

По степени сгорания горючего вещества:

- полное;
- неполное.

По скорости распространения пламени:

- нормальное;
- дефлаграционное;
- детонационное.

Горение газообразных, жидких и твердых веществ

В зависимости от агрегатного состояния горючего вещества различают горение:

- газов,
- жидкостей,
- пылевидных и
- компактных твердых веществ.

1. **Газы** – это вещества, критическая температура которых менее $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. $T_{\text{кр}}$ – это минимальная температура нагрева 1 моля вещества в закрытом сосуде, при котором оно полностью превращается в пар.

Горение газообразных, жидких и твердых веществ

2. **Жидкости** — это вещества с температурой плавления (каплепадения) менее 50 °С.

3. **Твердые вещества** — это вещества с температурой плавления (каплепадения) более 50°С.

4. **Пыли** — это измельченные твердые вещества с размером частиц менее 0,85 мм.

Зона, в которой происходит химическая реакция в горючей смеси, т.е. горение, называется **фронтом пламени.**

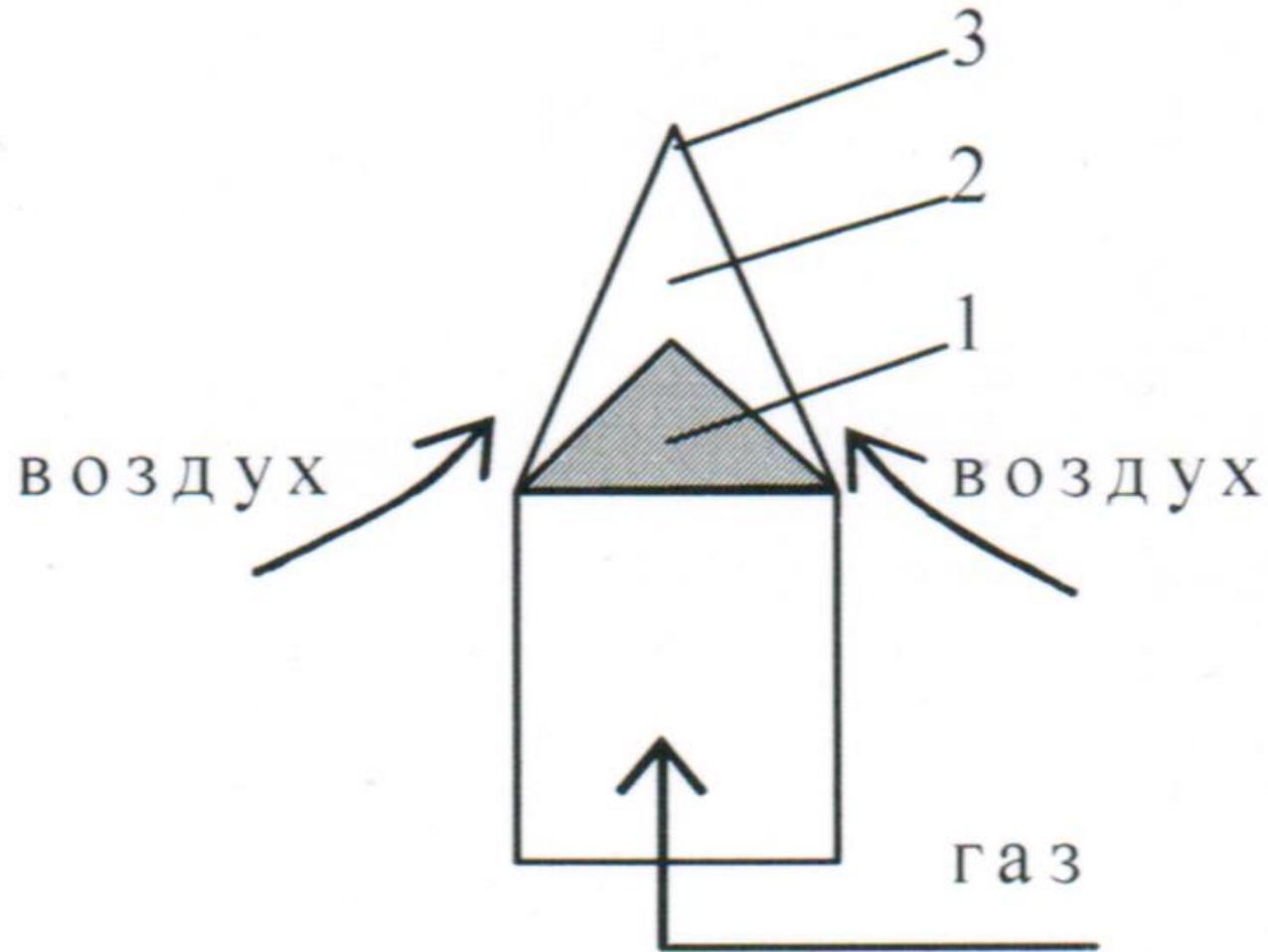
Горение газообразных, жидких и твердых веществ

Горение газов в газовой горелке. Тут наблюдаются 3 зоны пламени:

Схема **горения газа**: 1 – прозрачный конус – это исходный газ нагревается (до температуры самовоспламенения); 2 – светящаяся зона фронта пламени; 3 – продукты сгорания (бывают почти невидимы при полном сгорании газов и, особенно при горении водорода, когда не образуется са-жа).

Ширина фронта пламени в газовых смесях составляет десятки доли миллиметра.

Горение газообразных, жидких и твердых веществ



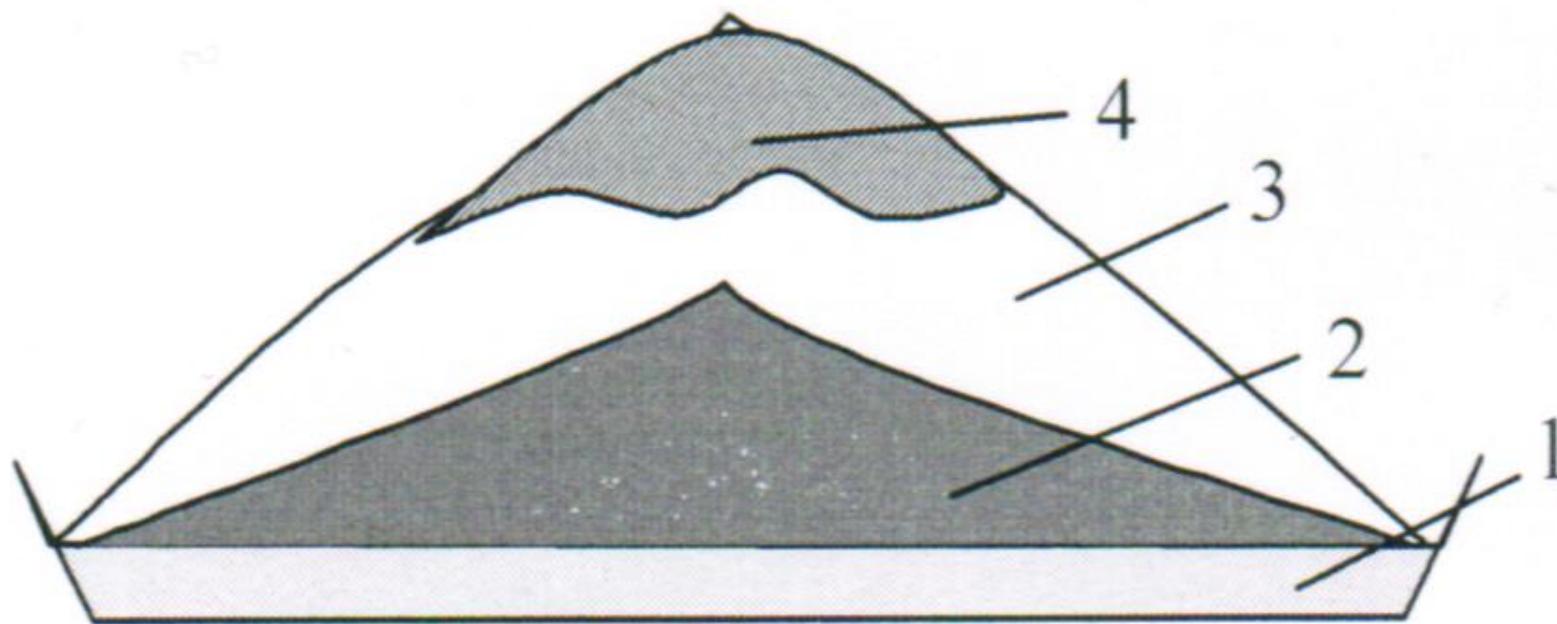
Горение газообразных, жидких и твердых веществ

Горение жидкостей в открытом сосуде. При горении в открытом сосуде имеются 4 зоны:

Горение жидкости: 1 – жидкость; 2 – пары жидкости (темные участки); 3 – фронт пламени; 4 – продукты горения (дым).

Ширина фронта пламени в этом случае больше, т.е. реакция протекает медленнее.

Горение газообразных, жидких и твердых веществ



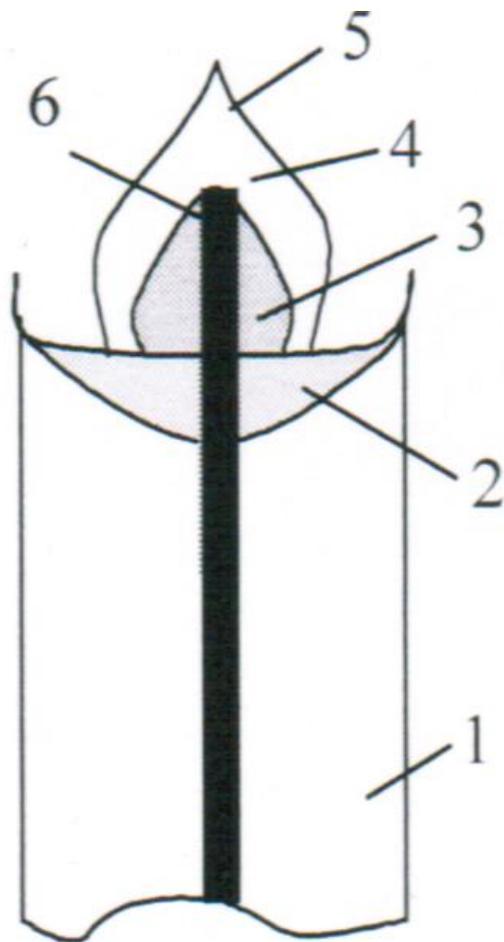
Горение газообразных, жидких и твердых веществ

Горение плавящихся твердых веществ. Рассмотрим горение свечи. В данном случае наблюдается 6 зон:

Горение свечи: 1 – твердый воск; 2 – расплавленный (жидкий) воск; 3 – темный прозрачный слой паров; 4 – фронт пламени; 5 – продукты горения (дым); 6 – фитиль.

Горящий фитиль служит для стабилизации горения. В него впитывается жидкость, поднимается по нему, испаряется и горит. Ширина фронта пламени увеличивается, что увеличивает площадь светимости, так как используются более сложные углеводороды, которые, испаряясь, распадаются, а потом уже вступают в реакцию.

Горение газообразных, жидких и твердых веществ



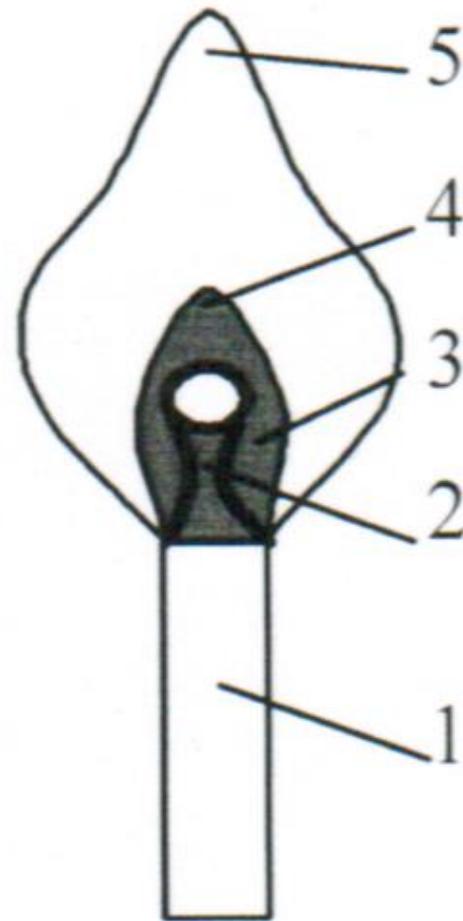
Горение газообразных, жидких и твердых веществ

Горение неплавящихся твердых веществ. Этот вид горения рассмотрим на примере горения спички и сигареты. Здесь также имеется 5 участков:

Горение спички: 1 – свежая древесина; 2 – обугленная древесина; 3 – газы (газифицированные или испарившиеся летучие вещества) - это темноватая прозрачная зона; 4 – фронт пламени; 5 – продукты сгорания (дым).

Видно, что обгоревший участок спички намного тоньше и имеет черный цвет. Это значит, что часть спички обуглилась, т.е. осталась нелетучая часть, а летучая часть испарилась и сгорела. Скорость горения угля значительно медленнее, чем газов, поэтому он не успевает полностью выгореть.

Горение газообразных, жидких и твердых веществ

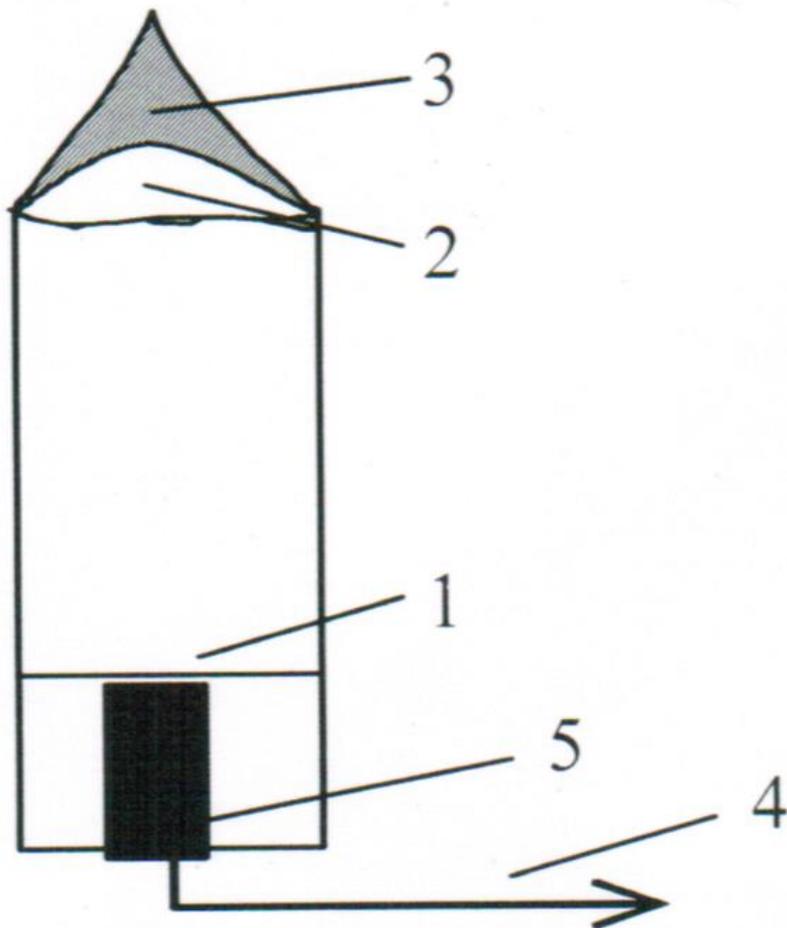


Горение газообразных, жидких и твердых веществ

Горение сигареты: 1 – исходная табачная смесь; 2 – тлеющий участок без фронта пламени; 3 – дым, т.е. продукт сгоревших частиц; 4 – втягиваемый в легкие дым, который представляет собой в основном газифицированные продукты; 5 – смола, сконденсировавшаяся на фильтре.

Беспламенное термоокислительное разложение вещества называется тлением. Оно возникает при недостаточной диффузии кислорода в зону горения и может протекать даже при очень малом его количестве (1-2%). Дым имеет сизый, а не черный цвет. Значит в нем больше газифицированных, а не сгоревших веществ.

Горение газообразных, жидких и твердых веществ



Горение газообразных, жидких и твердых веществ

Поверхность пепла почти белая. Значит, при достаточном поступлении кислорода происходит полное сгорание. Но внутри и на границе горящего слоя со свежими – черное вещество. Это свидетельствует о неполном сгорании обугленных частиц.

Кстати, на фильтре конденсируются пары улетучившихся смолистых веществ.

Подобный вид горения наблюдается при горении кокса, т.е. угля, из которого удалены летучие вещества (газы, смолы), или графита.

Горение газообразных, жидких и твердых веществ

Таким образом, процесс горения газов, жидкостей и большинства твердых веществ протекает в газообразном виде и сопровождается пламенем.

Некоторые твердые вещества, в том числе имеющие склонность к самовозгоранию, горят в виде тления на поверхности и внутри материала.

Горение газообразных, жидких и твердых веществ

Горение пылевидных веществ. Горение слоя пыли происходит так же, как и в компактном состоянии, только скорость горения возрастает из-за увеличения поверхности контакта с воздухом.

Горение пылевидных веществ в виде аэрозвеси (пылевого облака) может протекать в виде искр, т.е. горения отдельных частиц, в случае малого содержания летучих веществ, не способных при испарении образовать достаточное количество газов для единого фронта пламени.

Если образуется достаточное количество газифицированных летучих веществ, то возникает пламенное горение.

Горение газообразных, жидких и твердых веществ

Горение взрывчатых веществ. К данному виду относится горение взрывчатки и пороха, так называемых конденсированных веществ, в которых уже находится *химически или механически связанные горючее и окислитель.*

Например:

- у тринитротолуола (тротила) $C_7H_5O_6N_3 \cdot C_7H_5 \cdot 3NO_2$ окислителями служат O_2 и NO_2 ;
- в составе пороха – сера, селитра, уголь;
- в составе самодельной взрывчатки алюминиевая пудра и аммиачная селитра, связующее – соляровое масло.

Диффузионное и кинетическое горение

По степени подготовки горючей смеси различают *диффузионное и кинетическое* горение.

Рассмотренные виды горения (кроме взрывчатки) относятся к диффузионному горению. Пламя, т.е. зона горения смеси горючего с воздухом, для обеспечения устойчивости должна постоянно подпитываться горючим и кислородом воздуха. Поступление горючего газа зависит только от скорости его подачи в зону горения. Скорость поступления горючей жидкости зависит от интенсивности ее испарения, т.е. от давления паров над поверхностью жидкости, а, следовательно, от температуры жидкости.

Температурой воспламенения называется наименьшая температура жидкости, при которой пламя над ее поверхностью не погаснет.

Диффузионное и кинетическое горение

Горение твердых веществ отличается от горения газов наличием стадии разложения и газификации с последующим воспламенением летучих продуктов пиролиза.

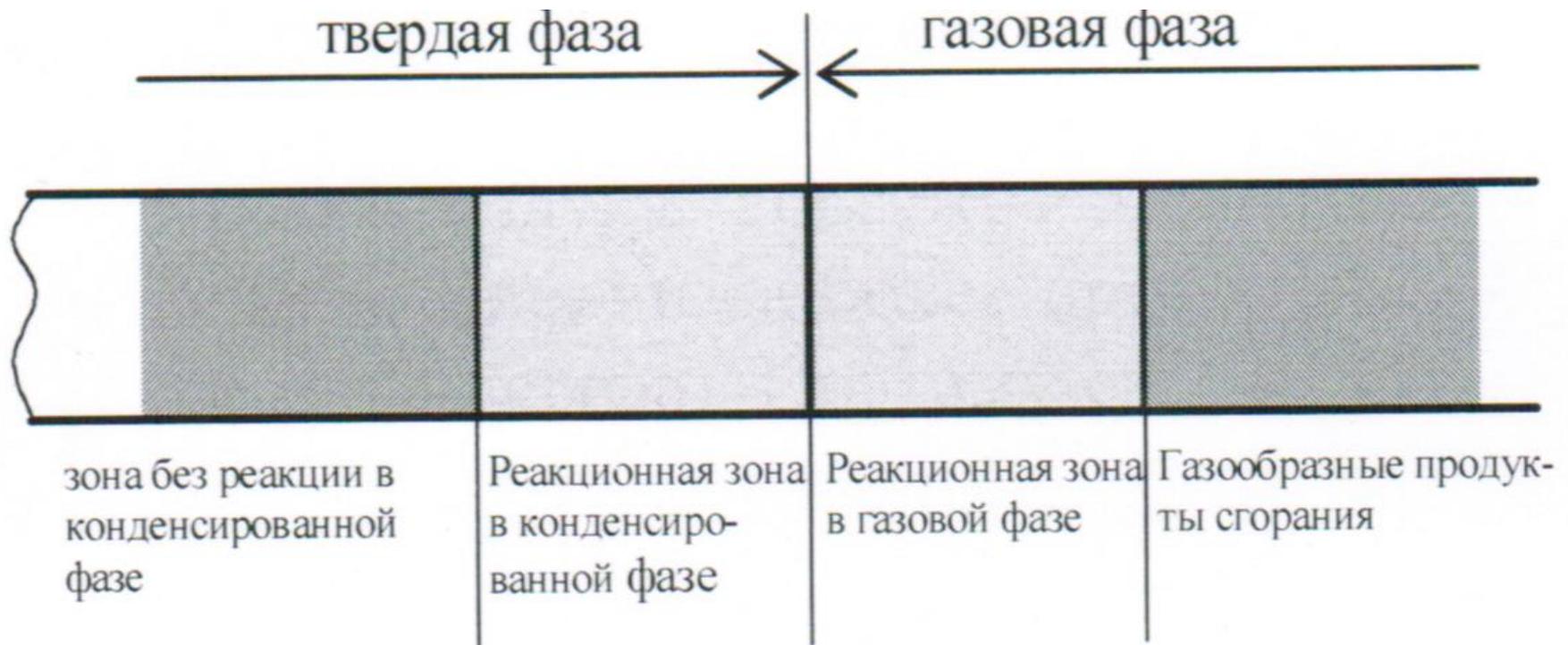
Пиролиз — это нагрев органических веществ до высоких температур без доступа воздуха. При этом происходит разложение, или расщепление, сложных соединений на более простые (коксование угля, крекинг нефти, сухая перегонка дерева). Поэтому сгорание твердого горючего вещества в продукт горения не сосредоточено только в зоне пламени, а имеет многостадийный характер.

Диффузионное и кинетическое горение

Нагрев твердой фазы вызывает разложение и выделение газов, которые воспламеняются и сгорают. Тепло от факела нагревает твердую фазу, вызывая ее газификацию и процесс повторяется, таким образом поддерживая горение.

Модель горения твердого вещества предполагает наличие следующих фаз:

Диффузионное и кинетическое горение



Диффузионное и кинетическое горение

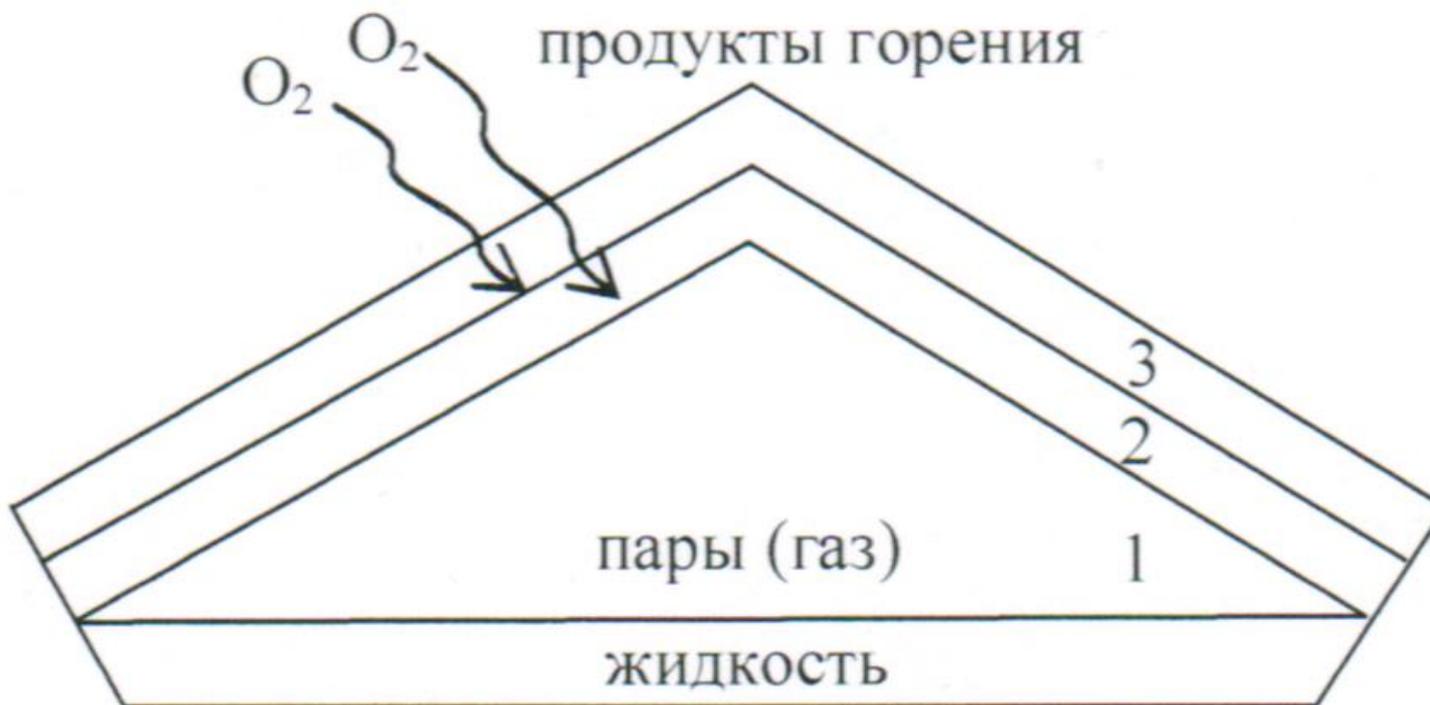
- прогрев твердой фазы. У плавящихся веществ в этой зоне происходит плавление. Толщина зоны зависит от температуропроводности вещества;
- пиролиз, или реакционная зона в твердой фазе, в которой образуются газообразные горючие вещества;
- предпламенная газовая фаза, в которой образуется смесь с окислителем;
- пламя, или реакционная зона в газовой фазе, в которой происходит превращение продуктов пиролиза в газообразные продукты горения;
- продукты горения.

Диффузионное и кинетическое горение

Скорость подачи кислорода в зону горения зависит от его диффузии через продукт горения.

Поскольку скорость химической реакции в зоне горения в рассматриваемых видах горения зависит от скорости поступления реагирующих компонентов к поверхности пламени путем молекулярной или кинетической диффузии, этот вид горения и называют диффузионным.

Диффузионное и кинетическое горение



Диффузионное и кинетическое горение

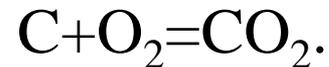
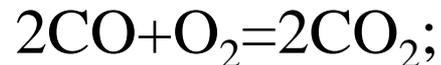
Структура пламени диффузионного горения состоит из трех зон:

- В **1 зоне** находятся газы или пары. Горение в этой зоне не происходит. Температура не превышает 500°C . Происходит разложение, пиролиз летучих и нагрев до температуры самовоспламенения.
- Во **2 зоне** образуется смесь паров (газов) с кислородом воздуха и происходит неполное сгорание до CO с частичным восстановлением до углерода (мало кислорода):



Диффузионное и кинетическое горение

В **3 внешней зоне** происходит полное сгорание продуктов второй зоны и наблюдается максимальная температура пламени:



Высота пламени пропорциональна коэффициенту диффузии и скорости потока газов и обратно пропорциональна плотности газа.

Все виды диффузионного горения присущи пожарам.

Диффузионное и кинетическое горение

Кинетическим горением называется горение заранее перемешанных горючего газа, пара или пыли с окислителем. В этом случае скорость горения зависит только от физико-химических свойств горючей смеси (теплопроводности, теплоемкости, турбулентности, концентрации веществ, давления и т.п.). Поэтому скорость горения резко возрастает. Такой вид горения присущ взрывам.

В данном случае при поджигании горючей смеси в какой-либо точке фронт пламени движется от продуктов сгорания в свежую смесь. Таким образом, пламя при кинетическом горении чаще всего нестационарно.

Диффузионное и кинетическое горение

Хотя, если предварительно перемешать горючий газ с воздухом и подать в горелку, то при поджигании образуется стационарное пламя, при условии, что скорость подачи смеси будет равна скорости распространения пламени.

Если скорость подачи газов увеличить, то пламя отрывается от горелки и может погаснуть. А если скорость уменьшить, то пламя втянется во внутрь горелки с возможным взрывом.

Диффузионное и кинетическое горение

По степени сгорания, т.е. полноты протекания реакции горения до конечных продуктов, горение бывает **полным и неполным**.

Так в зоне 2 горение неполное, т.к. недостаточно поступает кислород, который частично расходуется в 3 зоне, и образуются промежуточные продукты. Последние догорают в 3 зоне, где кислорода больше, до полного сгорания.

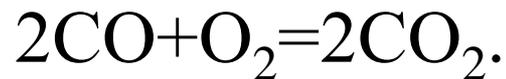
Наличие сажи в дыму говорит о неполном горении.

Диффузионное и кинетическое горение

Другой пример: при недостатке кислорода углерод сгорает до угарного газа:



Если добавить O, то реакция идет до конца:



Диффузионное и кинетическое горение

Скорость горения зависит от характера движения газов. Поэтому различают ламинарное и турбулентное горение.

Так, примером ламинарного горения может служить пламя свечи в неподвижном воздухе. При **ламинарном горении** слои газов текут параллельно, не завихряясь.

Диффузионное и кинетическое горение

Турбулентное горение – вихревое движение газов, при котором интенсивно перемешиваются сгорающие газы, и фронт пламени размывается. Границей между этими видами служит критерий Рейнольдса, который характеризует соотношение между силами инерции и силами трения в потоке:

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu}$$

где: v - скорость газового потока;
 ν - кинематическая вязкость;
 l – характерный линейный размер.

Диффузионное и кинетическое горение

Число Рейнольдса, при котором происходит переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный называется критическим $Re_{кр}$, $Re_{кр} \sim 2320$.

Турбулентность увеличивает скорость горения из-за более интенсивной передачи тепла от продуктов горения в свежую смесь.

Нормальное горение

В зависимости от скорости распространения пламени при кинетическом горении может реализоваться:

- **нормальное** горение (в пределах нескольких м/с),
- **взрывное дефлаграционное** (десятки м/с),
- **детонационное** (тысячи м/с).

Эти виды горения могут переходить друг в друга.

Нормальное горение

Нормальное горение – это горение, при котором распространение пламени происходит при отсутствии внешних возмущений (турбулентности или изменения давления газов). Оно зависит только от природы горючего вещества, т.е. теплового эффекта, коэффициентов теплопроводности и диффузии. Поэтому является физической константой смеси определенного состава. В этом случае обычно скорость горения составляет 0,3-3,0 м/с.

Нормальным горение названо потому, что вектор скорости его распространения перпендикулярен фронту пламени.

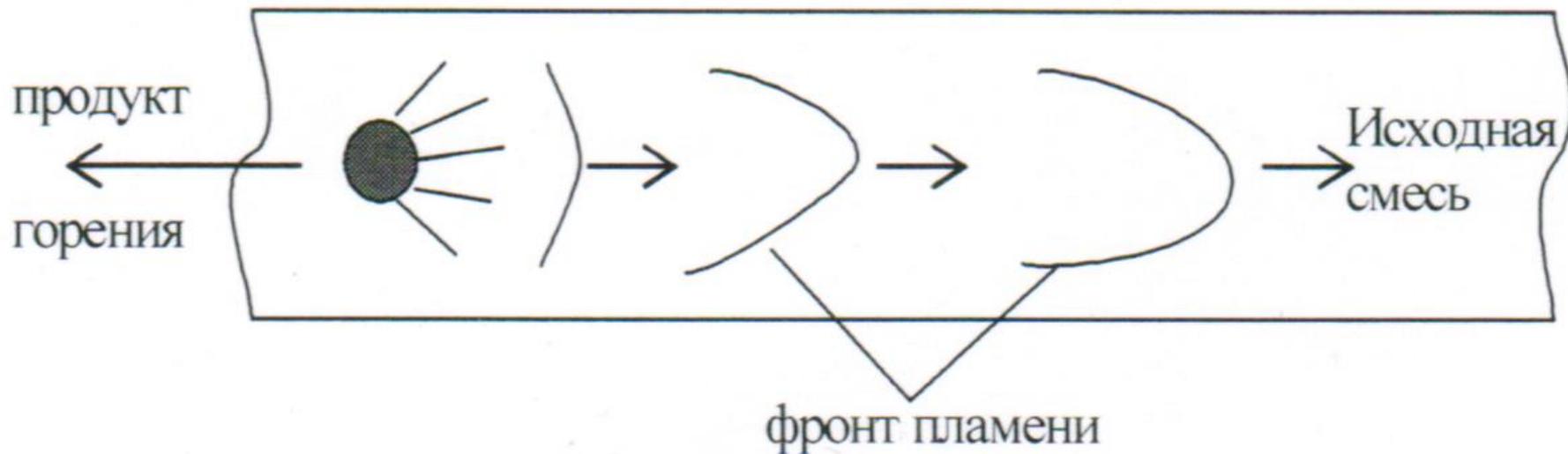
Дефлаграционное (взрывное) горение

Нормальное горение неустойчиво и в закрытом пространстве склонно к самоускорению. Причиной этому является искривление фронта пламени вследствие трения газа о стенки сосуда и изменения давления в смеси.

Рассмотрим процесс распространения пламени в трубе.

Сначала у открытого конца трубы пламя распространяется с нормальной скоростью, т.к. продукты горения свободно расширяются и выходят наружу. Давление смеси не изменяется. Длительность равномерного распространения пламени зависит от диаметра трубы, рода горючего и его концентрации.

Дефлаграционное (взрывное) горение



Дефлаграционное (взрывное) горение

По мере продвижения фронта пламени внутрь трубы продукты реакции, имея больший объем по сравнению с исходной смесью, не успевают выходить наружу и их давление возрастает. Это давление начинает давить во все стороны, и поэтому впереди фронта пламени исходная смесь начинает двигаться в сторону распространения пламени. Прилегающие к стенкам слои тормозятся. Наибольшую скорость имеет пламя в центре трубы, меньшую – у стенок.

Дефлаграционное (взрывное) горение

Поэтому фронт пламени вытягивается в сторону распространения пламени, а поверхность его увеличивается. Пропорционально этому увеличивается количество сгораемой смеси в единицу времени, которое влечет за собой возрастание давления, а то в свою очередь — увеличивает скорость движения газа и т.д. Таким образом, происходит лавинообразное повышение скорости распространения пламени до сотен метров в секунду.

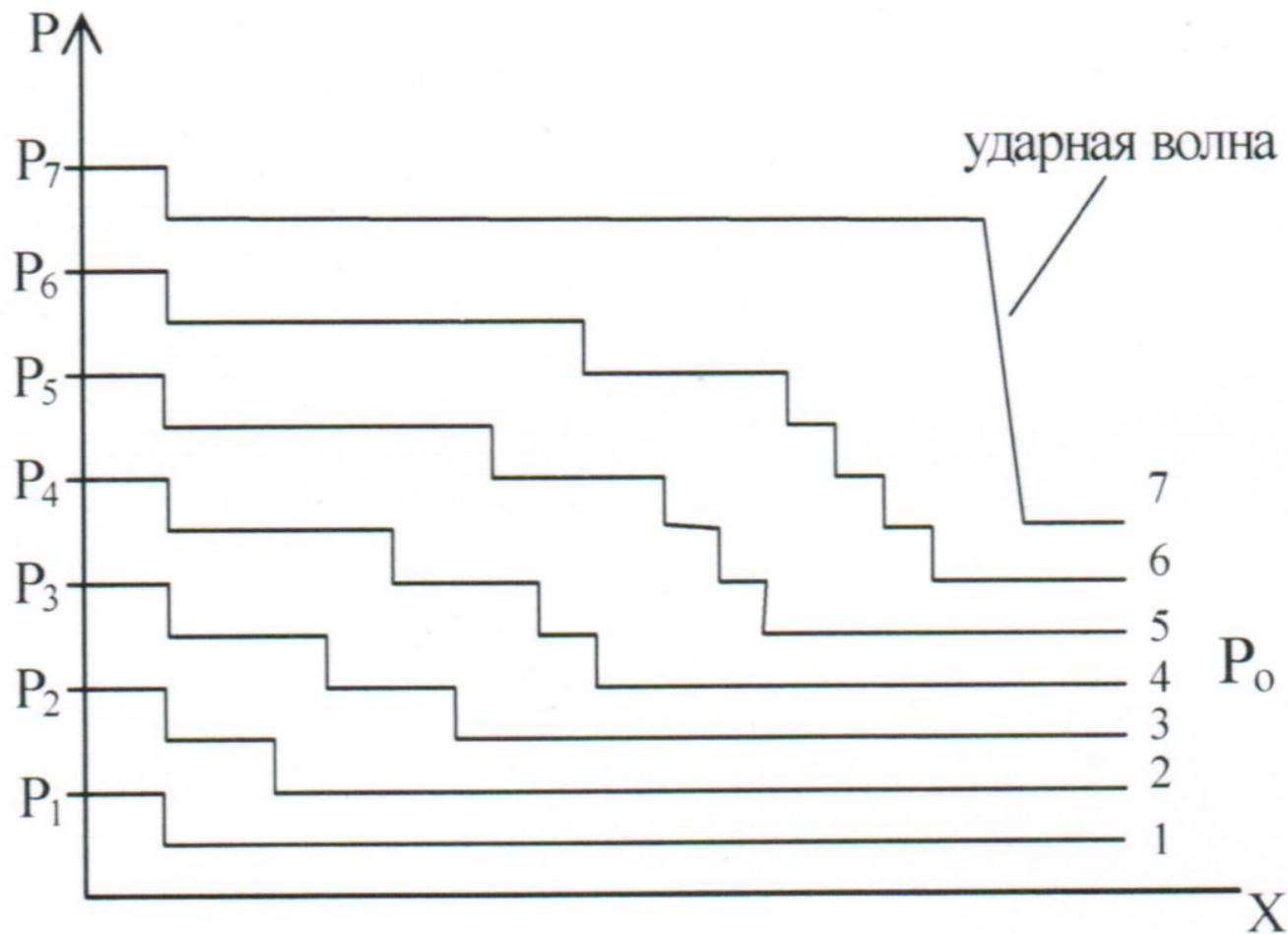
Дефлаграционное (взрывное) горение

Процесс распространения пламени по горючей газовой смеси, при котором самоускоряющаяся реакция горения распространяется вследствие разогрева путем теплопроводности от соседнего слоя продуктов реакции, называется **дефлаграцией**. Обычно скорости дефлаграционного горения дозвуковые, т.е. менее 333 м/с.

Детонационное горение

Если рассматривать сгорание горючей смеси послойно, то в результате термического расширения объема продуктов сгорания каждый раз впереди фронта пламени возникает волна сжатия. Каждая последующая волна, двигаясь по более плотной среде, догоняет предыдущую и накладывается на нее. Постепенно эти волны соединяются в одну ударную волну.

Детонационное горение



Детонационное горение

В ударной волне в результате адиабатического сжатия мгновенно увеличивается плотность газов и повышается температура до T_0 самовоспламенения. В результате происходит зажигание горючей смеси ударной волной и возникает **детонация** – распространение горения путем воспламенения ударной волной. Детонационная волна не гаснет, т.к. подпитывается ударными волнами от движущегося вслед за ней пламени.

Детонационное горение

Особенность детонации – она происходит с определенной для каждого состава смеси *сверхзвуковой скоростью* 1000-9000 м/с, поэтому является физической константой смеси. Она зависит только от калорийности горючей смеси и теплоемкости продуктов сгорания.

Встреча ударной волны с препятствием ведет к образованию отраженной ударной волны и еще большему давлению.

Детонационное горение

Детонация — самый опасный вид распространения пламени, т.к. имеет максимальную мощность взрыва ($N=A/\tau$) и огромную скорость. Практически «обезвредить» детонацию можно лишь на преддетонационном участке, т.е. на расстоянии от точки зажигания до места возникновения детонационного горения. Для газов длина этого участка от 1 до 10 м.

Спасибо
за Ваше внимание!