

# Часть 2. Теория горения и взрыва

## 2.1. Общие сведения о горении и взрыве

### Понятие горения и взрыва

**Горение** – сложный физико-химический процесс взаимодействия горючего вещества и окислителя, характеризующийся самоускоряющимся превращением исходных компонентов реакционноспособной смеси в продукты горения и сопровождающийся выделением большого количества тепла и света.

Выделение тепла происходит непосредственно в зоне химической реакции превращения исходных компонентов горючей смеси в продукты горения. Зона протекания химической реакции обычно локализована в сравнительно небольшой части пространства. Она может быть неподвижна, а может перемещаться в пространстве в зависимости от условий протекания процесса горения.

Горение происходит в два этапа:

1. Создание молекулярного контакта между молекулами горючего и окислителя (физический процесс)
2. Взаимодействие молекул с образованием продуктов реакции (химический процесс).

При этом второй этап наступает только при выполнении некоторых дополнительных условий. Молекулы должны находиться в особом энергетически или химически возбужденном состоянии и определенном количественном соотношении. Горение является неравновесным процессом. При горении обязательно возникают неоднородности в составе молекул, их концентрации, неравномерности поля температур и скоростей потоков.

В основе процессов горения лежат химические реакции окисления, т. е. соединения исходных горючих веществ с кислородом. При горении на пожарах в качестве окислителя чаще всего выступает кислород воздуха, окружающий зону протекания химических реакций. В этом случае интенсивность горения определяется не скоростью протекания самих химических реакций, а скоростью поступления кислорода из окружающего пространства в зону горения, т. е. непосредственно в зону протекания химических реакций. Скорость протекания химических реакций горения значительно превосходит скорость таких физических процессов, как диффузия недостающих компонентов в зону реакции и передача тепла из зоны горения горючим веществам для подготовки их к химическому взаимодействию. Эти два процесса – диффузия и теплопередача – являются лимитирующими. Они определяют суммарную скорость горения, а следовательно, и интенсивность процесса тепловыделения и образования продуктов горения. Поэтому считают, что процессы горения на пожаре развиваются в чисто диффузионной области и рассматривать их следует лишь с физической стороны.

Под **взрывом** понимают очень быстрое выделение энергии в результате физических, химических или ядерных изменений взрывчатого вещества (ВВ).

При взрыве всегда происходит расширение исходного вещества или продуктов его превращения, вследствие чего возникает очень высокое давление, вызывающее разрушение и перемещение окружающей среды.

Исходными видами энергии взрыва могут быть физическая, химическая и ядерная.

► **Физический взрыв** - высвобождающаяся энергия является внутренней энергией сжатого или сжиженного газа (сжиженного пара).

К разновидностям **физических взрывов** относят:

- 1) кинетический (метеорит);
- 2) тепловой (взрыв котла, автоклава);
- 3) электрический (молния, электрический разряд);
- 4) упругое сжатие (землетрясение, замерзание воды в резервуаре, разрыв автомобильной шины и пр.).

► **Химический взрыв** - это импульсный экзотермический химический процесс перестройки (разложения) молекул твердых или жидких взрывчатых веществ с превращением их в молекулы взрывных газов.

При этом возникает очаг высокого давления и выделяется большое количество тепла. Способностью к взрыву обладают лишь некоторые вещества, называемые взрывчатыми (ВВ). Процесс разложения ВВ может происходить относительно медленно - путем горения, когда наблюдается послойный разогрев ВВ за счет теплопроводности, и относительно быстро - посредством детонации (сверхзвуковое ударно-волновое разложение химического, взрывчатого вещества).

В процессе взрыва выделяют следующие стадии: внешний импульс; детонация; внешний эффект (работа взрыва).

Все ВВ по агрегатному состоянию делятся на:

- 1) газообразные (водород и кислород, метан и кислород);
- 2) пылевоздушные (угольная, мучная, текстильная и т.п. пыль в смеси с воздухом или кислородом);
- 3) жидкие (нитроглицерин);
- 4) твердые (тротил, мелинит, гексоген, пластит);
- 5) аэрозольные (капли масла, бензина и проч. в воздухе);
- 6) смеси.

Существует следующая техническая классификация ВВ:

- 1) первичные, или инициирующие;
- 2) вторичные, или бризантные (дробящие);
- 3) метательные, или пороха;
- 4) пиротехнические смеси.

## Воспламенение и зажигание

**Воспламенение** – начало пламенного горения вещества под действием источника зажигания.

Воспламенение отличается от вспышки устойчивостью горения, продолжающегося после удаления источника зажигания; отсамовоспламенения – обязательным наличием источника зажигания, воздействующего на ограниченный объём или поверхность горючего вещества и материала (далее – горючее вещество) без повышения температуры их массы.

Воспламенение становится возможным, если компоненты системы: горючее вещество, окислитель и источник зажигания будут удовлетворять условиям:

- горючие газы и (или) пары, выделяющиеся с поверхности жидких (твердых) веществ, образуются в количествах, достаточных для самостоятельного горения;
- содержание окислителя в смеси превышает минимальное взрывоопасное содержание кислорода ;
- величина энергии источника зажигания, его температура и время контакта с горючим материалом не ниже минимальных значений для данной смеси газа и (или) пара с воздухом.

При отсутствии (невыполнении) хотя бы одного из перечисленных условий Воспламенение не произойдет.

Явление воспламенения связано с очень быстрым переходом от медленной и незаметной реакции окисления к резкому взаимодействию между горючим веществом и окислителем. В момент воспламенения создаются такие условия, при которых возможно ускорение химических реакций. Опасность воспламенения заключается в последующем неизбежном распространении пламени с характерной для данного вещества нормальной скоростью на всю массу (объём), которая в дальнейшем может уменьшаться или увеличиваться под воздействием внешних факторов. При воспламенении взрывоопасной среды (смеси) возникает опасность взрыва.

Знание условий воспламенения, его развития и последствий позволяет предусматривать соответствующие технические решения, направленные на повышение температуры воспламенения, на снижение скорости распространения пламени, предотвращение перехода горения во взрыв.

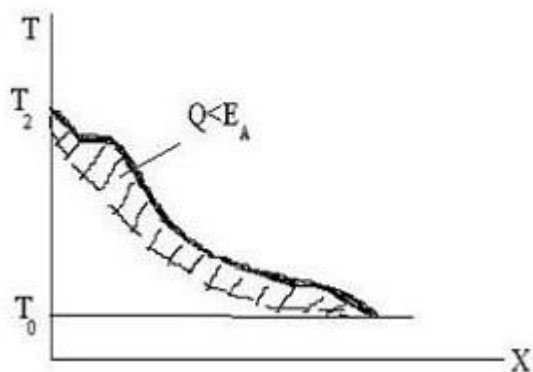
**Зажигание** – это процесс инициирования начального очага горения в горючей смеси за счет ввода в смесь извне высокотемпературного источника тепловой энергии. Происхождение источника зажигания может быть различным. Его высокая температура может быть следствием нагрева (накаленное тело), химической реакции (пламя, тепловые жиры), электрического разряда (электрические и электростатические искры), механического трения (зажигание спички, искры при заточке инструмента) или соударения (кремнь) твердых тел.

Поджигание заключается в быстром локальном разогреве горючей смеси, который приводит к резкому протеканию реакции в разогретом объеме. Зажигание при контакте с накаленной поверхностью происходит, если температура этой поверхности превышает некоторое предельное значение, называемое температурой зажигания.

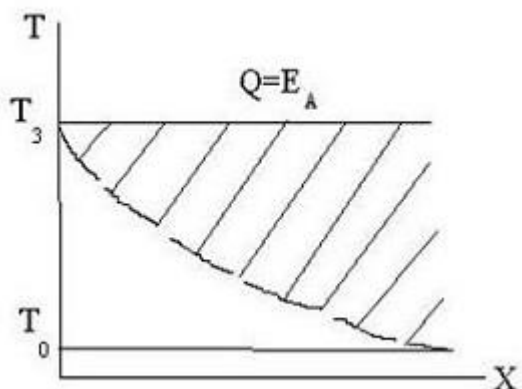
**Рисунок 2.1.** Схема теплового воспламенения по ВантГоффу



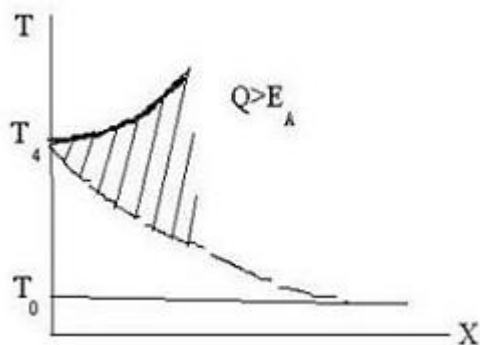
а) В инертной среде: в данном случае теплота просто отводится в холодную инертную среду с температурой  $T_0$ ;



б) В среде, способной к экзотермической реакции, но  $T_2$  недостаточна для возникновения прогрессивного процесса разогрева и самоускорения реакции, т.е. принесенная энергия меньше энергии активации.



в) В горючей смеси, когда  $T_3$  достаточна для самоускорения реакции и воспламенения, т.е. внесенная энергия активации. При этих условиях формируется очаг горения.  $T_3 = T_{\text{зажигания}}$  – предел определяющий область воспламенения от медленно затухающей реакции



г) В горючей смеси, когда  $T_4 > T_{\text{зажигания}}$ . Скорость реакции крайне быстро возрастает, самоускоряется и приводит к взрыву.

Температура зажигания горючей смеси всегда выше температуры самовоспламенения. Это обусловлено разными условиями теплоотвода из зоны реакции: при самовоспламенении смесь окружена высоконагретыми стенками, а при зажигании – холодными.

Однако не всякий высокотемпературный источник вызывает в горючей смеси очаг пламени. Пламя появляется лишь в том случае, если энергия, выделяющаяся из источника превышает некоторую величину, называемую минимальной энергией зажигания.

Энергии зажигания должно быть достаточно для создания устойчивого горения, т.е. передачи тепла от горящих первых слоев горючей смеси исходным слоям, и повышение температуры до температуры горения  $T_g$ . При температуре горения создается стационарный самоподдерживающийся режим распространения пламени, т.е. процесс горения.

## Пределы самовоспламенения

**Самовоспламенение** - это самовозгорание, сопровождающееся появлением пламени.

При самовоспламенении весь объем горючей газо-воздушной смеси постепенно путем подвода теплоты или повышения давления доводится до температуры воспламенения, после чего смесь воспламеняется уже без внешнего теплового воздействия.

**Температура самовоспламенения** — минимальная температура, при которой в нагретой газовой смеси начинается самопроизвольный (т. е. без внешнего подвода теплоты) процесс горения, за счет выделения теплоты горящими частицами газа. Температура самовоспламенения используется для оценки пожаро- и взрывоопасности всех горючих веществ — газообразных, жидких, твердых и пылеобразных. Она зависит от ряда факторов, в том числе от соотношения между горючим компонентом смеси и воздухом. Для большинства веществ соответствует составу смеси, близкому к стехиометрическому. Для смеси, состоящей из паров двух или более жидкостей, т.е. ниже средней арифметической температуры самовоспламенения отдельных жидкостей. Температура самовоспламенения твердых веществ зависит от количества выделяющихся продуктов и степени измельченности вещества.

Таблица 2.1. Температуры самовоспламенения некоторых жидкостей

Вещество	Температура самовоспламенения
Фосфор белый	20
Сероуглерод	112
Целлулоид	140 - 180
Сероводород	246
Масла нефтяные	250-400
Керосин	250
Бензин А-76	255
Мазуты	380-420
Каменный уголь	400
Ацетилен	406

Этиловый спирт	421
Древесный уголь	450
Нитробензол	482
Водород	530
Ацетон	612
Бензол	625
Окись углерода	644
Кокс	700

Помимо температуры самовоспламенения, горючие вещества характеризуются периодом индукции или временем запаздывания самовоспламенения. Периодом индукции называют промежуток времени, в течение которого происходит саморазогревание до воспламенения. Период индукции для одного и того же горючего вещества неодинаков и находится в зависимости от состава смеси, начальных температуры и давления.

Период индукции имеет практическое значение при действии на горючее вещество маломощных источников воспламенения (искры). Искра, попадая в горючую смесь паров или газов с воздухом, нагревает некоторый объем смеси, и в то же время происходит охлаждение искры. Воспламенение смеси зависит от соотношения периода индукции смеси и времени охлаждения искры. При этом, если период индукции больше времени охлаждения искры, то воспламенения смеси не произойдет.

Период индукции принят в основу классификации газовых смесей по степени их опасности в отношении воспламенения. Период индукции пылевых смесей зависит от размера пылинок, количества летучих веществ, влажности и других факторов.

Некоторые вещества могут самовозгораться, находясь при обычной температуре. Это в основном твердые пористые вещества большей частью органического происхождения (опилки, торф, ископаемый уголь и др.). Склонны к самовозгоранию и масла, распределенные тонким слоем по большой поверхности. Этим обусловлена возможность самовозгорания промасленной ветоши. Причиной самовозгорания промасленных волокнистых материалов является распределение жировых веществ тонким слоем на их поверхности и поглощение кислорода из воздуха. Окисление масла кислородом воздуха сопровождается выделением тепла. В случае, когда количество образующегося тепла превышает теплопотери в окружающую среду, возможно возникновение пожара.

Пожарная опасность веществ, склонных к самовозгоранию, очень велика, поскольку они могут загораться без всякого подвода тепла при температуре окружающей среды ниже температуры самовоспламенения веществ, а период индукции самовозгорающихся веществ может составлять несколько часов, дней и даже месяцев. Начавшийся процесс ускорения окисления (разогревания вещества) можно остановить лишь при обнаружении опасного нарастания температуры, что указывает на большое значение пожарно-профилактических мероприятий

## Верхний и нижний концентрационные пределы воспламенения

**Концентрационные пределы распространения пламени (воспламенения)** – нижний (НКПР), верхний (ВКПР). НКПР, ВКПР – минимальное (максимальное) содержание горючего вещества в однородной смеси с окислительной средой, при котором возможно распространение пламени по смеси на любое расстояние от источника зажигания

Та наименьшая концентрация горючих паров газов или пылей в смеси с воздухом, при которой смесь уже может воспламениться от источника зажигания и пламя распространяется на весь объем горючей смеси, называется **нижним концентрационным пределом воспламенения (НКПВ)**.

Смесь воздуха с горючим или паром на нижнем концентрационном пределе воспламенения содержит избыток воздуха. Так, для смеси воздуха с метаном коэффициент избытка воздуха равен 2, с оксидом углерода 2,6, а с сероуглеродом 6,9 и т. д.

Фактически наибольшее давление при взрыве наблюдается у смесей с концентрацией горючего несколько выше стехиометрической, так как скорость горения этой смеси выше скорости горения смеси со стехиометрической концентрацией компонентов.

Недостаток воздуха в смесях, богатых горючим, ведет к тому, что смесь может терять способность воспламеняться. Для различных смесей концентрация горючего, при которой смесь уже не способна воспламеняться, не одинакова. Например, для смеси оксида углерода с воздухом наивысшей концентрацией СО, при которой еще возможно воспламенение, является 74%. Выше этой концентрации никакие смеси оксида углерода с воздухом воспламеняться не могут, хотя в них присутствует некоторое количество воздуха.

Та наибольшая концентрация горючих паров, газов или пылей в смеси с воздухом, при которой смесь еще способна воспламеняться от источника зажигания с распространением пламени на весь ее объем, называется **верхним концентрационным пределом воспламенения (ВКПВ)**.

ВКПВ характеризуется избытком горючего и малым количеством воздуха. При воспламенении такой газо-воздушной смеси часть тепла химической реакции расходуется на нагрев не участвующего в реакции горючего, поэтому продукты горения нагреваются не до максимальной температуры; давление при взрыве составляет 0,3—0,4 МПа.

Интервал концентраций газов или пара в воздухе между нижним и верхним концентрационными пределами воспламенения называется областью воспламенения. Область воспламенения газов (паров) в воздухе определяется при атмосферном давлении (0,1 МПа) и характеризуется тем, что внутри нее все смеси горючего с воздухом способны воспламеняться от внешнего источника зажигания с последующим распространением горения на весь объем смеси. Область воспламенения различных газо- и паровоздушных смесей не одинакова. Наибольшую область воспламенения имеют оксид этилена, водород, ацетилен и др.; наименьшую — бензин, керосин, пропан, бутан и др. Чем ниже нижний концентрационный предел воспламенения и больше область воспламенения газов, тем большую пожарную опасность они представляют.

## Гомогенное и гетерогенное горение

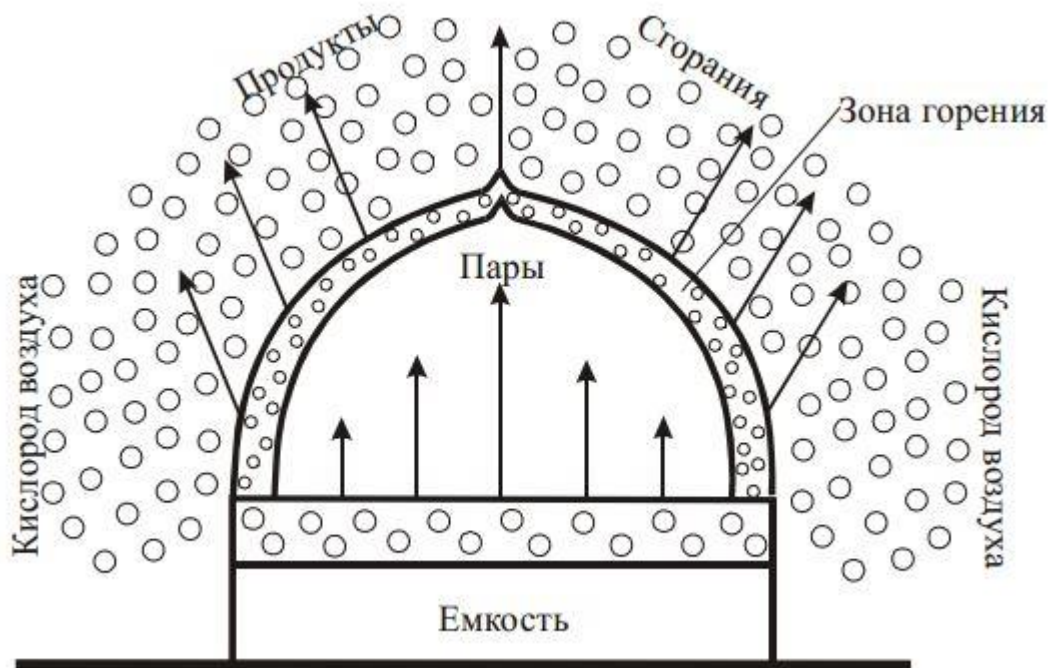
Влияние на процесс горения большого числа факторов обуславливает многообразие видов и режимов горения. Так, в зависимости от агрегатного состояния компонентов горючей смеси горение может быть гомогенным и гетерогенным, от условий смешения компонентов — горением предварительно приготовленной смеси (кинетическое) и диффузионным, от газодинамических условий — ламинарным и турбулентным, и т.д.

Основными видами горения являются гомогенное и гетерогенное.

**Гомогенное горение** - это процесс взаимодействия горючего и окислителя, находящихся в одинаковом агрегатном состоянии. Наиболее широко распространено гомогенное горение газов и паров в воздухе.

**Гетерогенное горение** - это горение твердых горючих материалов непосредственно на их поверхности. Характерной особенностью гетерогенного горения является отсутствие пламени. Примерами его являются горение антрацита, кокса, древесного угля, нелетучих металлов.

Гомогенное горение происходит в газо- или парообразных горючих системах — горючее и окислитель равномерно перемешаны друг с другом (рис. 2.2).



**Рисунок 2.2.** Схема процесса горения паров или газов.

Так как парциальное давление кислорода в зоне горения равно или близко к нулю – кислород довольно свободно проникает к зоне горения, поэтому скорость горения определяется главным образом скоростью протекания химической реакции, увеличивающейся с ростом температуры. Такое горение (или горение таких систем) называется **кинетическим**

Полное время сгорания в общем случае определяется по формуле:

$$\tau_p = \tau_{\phi} + \tau_x$$

τ, где

где  $\tau_{\phi}$  – время физической стадии процесса (диффузии  $O_2$  к очагу через слой);  $\tau_x$  – время протекания химической стадии (реакции).

При горении однородных систем (смеси паров, газов с воздухом) время физической стадии процесса несоизмеримо меньше скорости протекания химической реакции, поэтому  $\tau_p \approx \tau_x$  – скорость определяется кинетикой химической реакции и горение называется кинетическим.

При горении химически неоднородных систем время проникновения  $O_2$  к горючему веществу сквозь продукты сгорания (диффузия) несоизмеримо больше времени протекания химической реакции, таким образом определяет общую скорость процесса, т. е.  $\tau_p \approx \tau_{\phi}$ . Такое горение называется **диффузионным**.

Примерами диффузионного горения (рис. 2.3.) является горение каменного угля, кокса (продукты горения препятствуют диффузии кислорода в зону горения).

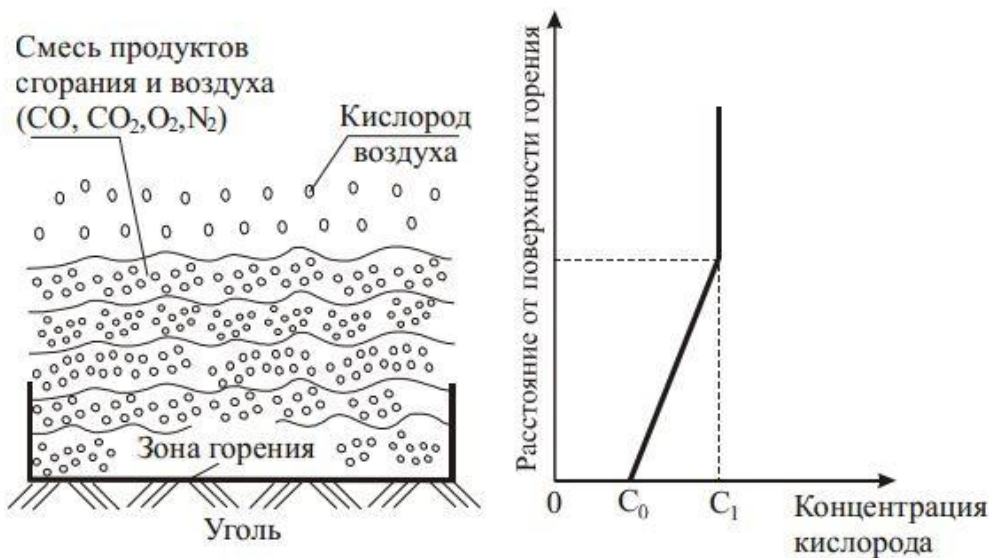


Рисунок 2.3. Схема диффузии кислорода в зону горения твердого вещества (гетерогенное горение)

Концентрация кислорода в объеме воздуха  $C_1$  значительно больше его концентрации вблизи зоны горения  $C_0$ . При отсутствии достаточного количества  $O_2$  в зоне горения химическая реакция тормозится (и определяется скоростью диффузии).

Если продолжительность химической реакции и физической стадии процесса соизмеримы, то горение протекает в промежуточной области (на скорость горения влияют как физические, так и химические факторы).

При низких температурах скорость реакции слабо зависит от температуры (кривая медленно поднимается вверх). При высоких температурах скорость реакции сильно увеличивается (т. е. скорость реакции в кинетической области зависит главным образом от температуры реагирующих веществ).

Скорость реакции окисления (горения) в диффузионной области определяется скоростью диффузии и очень мало зависит от температуры. Точка А – переход из кинетической в диффузионную область (рис. 2.4.).

Процесс горения всех веществ и материалов независимо от их агрегатного состояния происходит, как правило, в газовой фазе (жидкость – испаряется, твердые горючие вещества выделяют летучие продукты). Но горение твердых веществ имеет многостадийный характер. Под воздействием тепла – нагрев твердой фазы – разложение и выделение газообразных продуктов (деструкция, летучие вещества) – сгорание – тепло нагревает поверхность твердого вещества – поступление новой порции горючих газов (продуктов деструкции) – горение.



Рисунок 2.4. Зависимость скорости  $U$  кинетического (1) и диффузионного (2) режимов от температуры. Точка А – переход из кинетической области в диффузионную.



Многие твердые горючие вещества (древесина, хлопок, солома, полимеры) в своем составе имеют кислород. Поэтому для их сгорания требуется меньший объем кислорода воздуха. А горение взрывчатого вещества (ВВ) практически вообще не нуждается во внешнем окислителе.

Таким образом, горение ВВ – это самораспространение зоны экзотермической реакции его разложения или взаимодействие его компонентов путем передачи тепла от слоя к слою.