



# Стерлитамакский филиал БашГУ

Лекция

## Теория горения и взрыва

Преподаватель: Щербаков Александр Валерьевич



## Список источников

1. Федеральный закон "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" от 22.07.2008 N 123-ФЗ
2. [ГОСТ 12.1.044-89 "Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения"](#)
3. Девисилов В. А., Дроздова Т. И. Теория горения и взрыва: практикум: учеб. пособие для вузов. – М.: Форум, 2012.
4. Кукин, П.П., Юшин В. В. – Теория горения и взрыва: учеб. пособие для бакалавров. – М.: Юрайт, 2013.
5. БиблиоТех»: <https://sspaedu.bibliotech.ru>
6. Университетская библиотека online»: [www.biblioclub.ru](http://www.biblioclub.ru)
7. Электронно-библиотечная система издательства «Лань»: <http://e.lanbook.com>
8. Научная электронная библиотека «Elibrary.ru»:
9. Студенческая электронная онлайн библиотека: <http://yourlib.net/>



# Основные понятия

**Горение** – сложный физико-химический процесс, основой которого является быстро протекающая химическая реакция окисления, сопровождающаяся выделением значительного количества тепла и обычно ярким свечением (пламенем). Химическая реакция горения в большинстве случаев является сложной и состоит из большого числа элементарных химических процессов окислительно-восстановительного типа, приводящих к перераспределению валентных электронов между атомами взаимодействующих веществ. Кроме того, химическое превращение при горении тесно связано с рядом физических явлений – переносом тепла и масс и, соответственно, с гидро- и газодинамическими закономерностями. Процесс горения – это реакции, связанные с быстрым превращением и тепловым или диффузионным ускорением.

Различают три основных вида самоускорения химических реакций при горении: тепловое, цепное и цепочно-тепловое (комбинированное). Горение – это экзотермическая реакция (химическая реакция, сопровождающаяся выделением теплоты), протекающая в условиях ее прогрессивного самоускорения. Для возникновения и протекания процесса горения необходимы следующие условия:

1. наличие в определенный момент в данной точке пространства горючего вещества, окислителя и источника зажигания;
2. горючее и окислитель должны находиться в определенном количественном отношении;
3. источник зажигания должен обладать достаточной энергией.



# Основные понятия

По горючести вещества и материалы подразделяются на следующие группы:

- 1). негорючие - вещества и материалы, неспособные гореть в воздухе. Негорючие вещества могут быть пожаровзрывоопасными (например, окислители или вещества, выделяющие горючие продукты при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом);
- 2). трудногорючие - вещества и материалы, способные гореть в воздухе при воздействии источника зажигания, но неспособные самостоятельно гореть после его удаления;
- 3). горючие - вещества и материалы, способные самовозгораться, а также возгораться под воздействием источника зажигания и самостоятельно гореть после его удаления.
- 4). Из горючих жидкостей выделяют группы легковоспламеняющихся и особо опасных легковоспламеняющихся жидкостей, воспламенение паров которых происходит при низких температурах, определенных нормативными документами по пожарной безопасности.

Наибольшее практическое значение в качестве горючего приобрели углеводородные вещества.



# Основные понятия

**взрыв**- быстрое химическое превращение среды, сопровождающееся выделением энергии и образованием сжатых газов;

**взрывоопасная смесь** - смесь воздуха или окислителя с горючими газами, парами легковоспламеняющихся жидкостей, горючими пылями или волокнами, которая при определенной концентрации и возникновении источника инициирования взрыва способна взорваться;

**горючая среда**- среда, способная воспламеняться при воздействии источника зажигания;

**источник зажигания** - средство энергетического воздействия, инициирующее возникновение горения;

**окислители**- вещества и материалы, обладающие способностью вступать в реакцию с горючими веществами, вызывая их горение, а также увеличивать его интенсивность (наибольшее практическое значение в качестве окислителя приобрел кислород (воздух)).

**пожарная опасность веществ и материалов** - состояние веществ и материалов, характеризующее возможность возникновения горения или взрыва веществ и материалов;

**пожаровзрывоопасность веществ и материалов** - способность веществ и материалов к образованию горючей (пожароопасной или взрывоопасной) среды, характеризующая их физико-химическими свойствами и (или) поведением в условиях пожара;

**пожароопасная (взрывоопасная) зона**- часть замкнутого или открытого пространства, в пределах которого постоянно или периодически обращаются горючие вещества и в котором они могут находиться при нормальном режиме технологического процесса или его нарушении (аварии);



# Основные понятия

**Горючесть** – способность вещества и материалов к горению.

**Температура вспышки** – наименьшая температура конденсированного вещества, при которой над его поверхностью образуются пары, способные вспыхнуть на воздухе от источника зажигания, устойчивое горение при этом не возникает.

**Температура воспламенения** – наименьшая температура вещества, при которой вещество выделяет горючие пары и газы с такой скоростью, что при воздействии на них источника зажигания наблюдается воспламенение (продолжающееся пламенное горение после удаления источника зажигания).

**Температура самовоспламенения** – наименьшая температура окружающей среды, при которой наблюдается самовоспламенение вещества (самовоспламенение – резкое увеличение скорости экзотермических объемных реакций, сопровождающееся пламенным горением и (или взрывом) без непосредственного контакта с огнем).

**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.

**Температурные пределы распространения пламени (воспламенения)** – такие температуры вещества, при которых его насыщенный пар образует в окислительной среде концентрации, равные соответственно нижнему (нижний температурный предел) и верхнему (верхний температурный предел) концентрационным пределам распространения пламени.



# Основные понятия

**Температура тления** – температура вещества, при которой происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций окисления, заканчивающихся возникновением тления. Тление – беспламенное горения твердого вещества (материала) при сравнительно низких температурах ( $400^{\circ}\dots 600^{\circ}\text{C}$ ), часто сопровождающееся выделением дыма.

**Условия теплового самовозгорания** – зависимость между температурой окружающей среды, количеством вещества (материала) и временем его самовозгорания (самовозгорание – резкое увеличение скорости экзотермических процессов в веществе, приводящее к возникновению очага горения).

**Минимальная энергия зажигания** – наименьшая энергия электрического разряда, способная воспламенить наиболее легковоспламеняющуюся смесь горючего вещества с воздухом.

**Кислородный индекс** – минимальное содержание кислорода в кислородно-азотной смеси, при котором возможно свечеобразное горение материала.

Способность взрываться и гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха и другими веществами (взаимный контакт веществ) – это **качественный показатель**, характеризующий особую пожарную опасность некоторых веществ.

**Нормальная скорость распространения пламени** – скорость перемещения фронта пламени относительно несгоревшего газа в направлении перпендикулярном к его поверхности.

**Скорость выгорания** – количество жидкости, сгорающей в единицу времени с единицы площади. Этот показатель характеризует интенсивность горение жидкости.



## Основные понятия

**Коэффициент дымообразования** – показатель, характеризующий оптическую плотность дыма, образующегося при пламенном горении или тлении определенного количества твердого вещества.

**Индекс распространения пламени** – условный безразмерный показатель, характеризующий способность веществ воспламеняться, распространять пламя по поверхности и выделять тепло.

**Показатель токсичности продуктов горения полимерных материалов** – отношение количества материалов к единице объема замкнутого пространства, в котором образующиеся при горении материала газообразные продукты вызывают гибель 50%. **Минимальное взрывоопасное содержание кислорода** – такая концентрация кислорода в горючей смеси, состоящей из горючего вещества, воздуха и флегматизатора, меньше которой распространение пламени в смеси становится невозможным при любой концентрации горючего в смеси, разбавленной данным флегматизатором.

**Максимальное давление взрыва** – наибольшее избыточное давление.



## Основные понятия

В зависимости от количественного соотношения горючего и окислителя различают три разновидности горючих смесей:

1. стехиометрическая смесь, которая не содержит в избытке ни горючего компонента, ни окислителя;
2. богатая смесь, содержащая в избытке горючее;
3. бедная смесь, содержащая в избытке окислитель.

Наиболее вероятные источники зажигания в условиях производства:

1. открытый огонь и раскаленные продукты горения;
2. нагретые до высокой температуры поверхности технологического оборудования;
3. тепловое проявление механической и электрической энергии;
4. тепловое воздействие химических реакций, а также результаты жизнедеятельности микроорганизмов.

По внешнему виду (признаку) горение может происходить и без пламени, то есть оно может быть пламенным или беспламенным (тлением). В зависимости от агрегатного состояния исходных веществ (горючего и окислителя) различают три вида горения:

1. гомогенное (однородное) горение газо- и парообразных горючих веществ в среде газообразного окислителя;
2. гетерогенное (неоднородное) горение жидких и твердых горючих веществ и материалов в среде газообразного окислителя или горение жидких горючих в жидких окислителях;
3. горение взрывчатых веществ (переход вещества из конденсированного состояния в газообразное)



# Основные понятия

По скорости распространения пламени горение подразделяется на три группы:

1. дефлаграционное (скорость – несколько м/с);
2. взрывное (скорость – несколько десятков или сотен м/с);
3. детонационное (скорость – до нескольких тысяч м/с).

Для дефлаграционного горения характерна передача тепла от слоя к слою, а пламя, возникающее в нагретой и разбавленной активными радикалами продуктами реакции смеси, перемещается в направлении исходной горючей смеси. Это объясняется тем, что пламя как бы становится источником, который выделяет непрерывный поток тепла и химически активных частиц. В результате этого фронт пламени и перемещается в сторону горючей смеси. Дефлаграционное горение подразделяется на ламинарное и турбулентное. Скорость ламинарного горения зависит от состава смеси, начального давления и температуры, а также кинетики химических превращений. Скорость распространения турбулентного пламени помимо перечисленных факторов зависит от скорости потока, степени и масштабов турбулентности.

Взрывное горение может быть преднамеренным или случайным (аварийным). Преднамеренное взрывное горение характерно для пиротехнических составов (твердые ракетные топлива, пороха). Случайное взрывное горение следует за аварийным выбросом и образованием газо-, паро- или пылевоздушной смеси при наличии источника зажигания.

Детонационное горение свойственно для бризантных взрывчатых веществ, применяемых в различных отраслях промышленности (например, в горнодобывающей, строительстве) и в военном деле.



# Основные понятия

Наиболее важные для теории горения являются следующие типы пламени:

- 1) ламинарное пламя в гомогенной газовой смеси. К этому же типу относится пламя при горении летучих взрывчатых веществ;
- 2) ламинарное диффузионное пламя при горении струи горючего газа в окислительной атмосфере. К этому типу относится пламя при диффузионном горении жидкого горючего, налитого в цилиндрический сосуд;
- 3) пламя при горении капли жидкого горючего или частицы твердого горючего в окислительной атмосфере;
- 4) турбулентные пламена в гомогенных или в предварительно не смешанных газовых смесях;
- 5) пламя при горении нелетучих взрывчатых веществ, порохов и т. д. в тех случаях, когда существенную роль играет реакция в конденсированной фазе. Имеется большое число промежуточных случаев, например, горение взвеси частиц твердого горючего или взвеси капель жидкого горючего в потоке газообразного окислителя (этот случай сочетает в себе признаки, характерные для пламен типа 3 и 1 или 3 и 4). Наибольший технический интерес представляют именно промежуточные случаи.



# Горение и условия его протекания

**Молекулярность реакции** – это минимальное число молекул, участвующих в элементарном химическом процессе.

Для молекулярной реакции горения необходимым условием является наличие смеси реакционноспособных веществ, содержащей горючее и окислитель. В химическую реакцию может вступать только «активная» частица горючей смеси, обладающая к моменту вступления в реакцию достаточным запасом энергии. Энергия, достаточная для необходимого сближения реагирующих частиц, называется энергией активации. В реакцию могут вступать только активные молекулы (атомы, радикалы), то есть те, которые в момент соударения обладают энергией, превышающей энергию активации реакции. Доля активных молекул возрастает при увеличении температуры горючей смеси.

**Тепловое самовоспламенение.** Тепловой эффект реакций частично идет на нагревание горючей смеси, частично теряется в окружающую среду. После предварительного нагрева горючей смеси и достижения такого состояния, когда приход тепла в результате реакции станет выше отвода тепла из зоны реакции, – начинается самоускорение реакции. Чем больше давление (или концентрация газовой смеси), тем больше будет скорость реакции и, следовательно, будет больше теплоприход. А скорость теплоотвода не зависит от давления. Дальнейшее повышение давления приведет к повышению температуры и возникновению самовоспламенения.



# Горение и условия его протекания

**Автокаталитически-тепловое самовоспламенение.** Катализатор химической реакции – вещество, ускоряющее химическую реакцию. Явление, при котором каталитическое действие на реакцию оказывает какой-либо из продуктов, называется **автокатализом**.

Вещества, которые замедляют протекание реакции, называют **отрицательными катализаторами или ингибиторами реакции**. Например, хладоны (предельные галогенуглеводороды), применяемые для тушения пожаров.

**Цепное самовоспламенение** имеет природу, отличную от теплового (выделение тепла происходит в результате разветвления реакционных цепей и накопления химически активных частиц, как правило, радикалов). Любая цепная реакция складывается из элементарных стадий зарождения, продолжения и обрыва цепи. Зарождение цепей является экзотермической реакцией. Образование свободных радикалов возможно в результате моно- или бимолекулярных взаимодействий, а также в результате инициирования (добавке инициаторов, ионизация, действие света).

Краткий сравнительный анализ трех механизмов самоускорения реакций горения позволяет кратко сформулировать:

1. **тепловое самоускорение** реакции происходит вследствие саморазогрева горючей смеси за счет выделяющегося при реакции тепла;
2. **автокаталитически-тепловое самоускорение** происходит в результате накопления продуктов реакции катализирующих превращение исходного вещества. Когда достигается перевес прихода тепла над его отводом, наступает тепловое самоускорение, заканчивающееся взрывом;
3. **цепное самоускорение** реакции при постоянной температуре происходит в результате превышения разветвления над обрывом цепи, когда образуется достаточное количество активных центров, способствующих развитию цепного характера реакции.

Но большинство процессов горения осуществляется по комбинированному механизму реакции.



## Понятие о кинетическом и диффузионном горении

Процесс горения зависит от множества условий, главнейшим из которых являются:

1. состав горючей смеси; 2. давление в зоне горения; 3. температура реакции; 4. геометрические размеры системы; 5. агрегатное состояние горючего и окислителя и др. 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**.

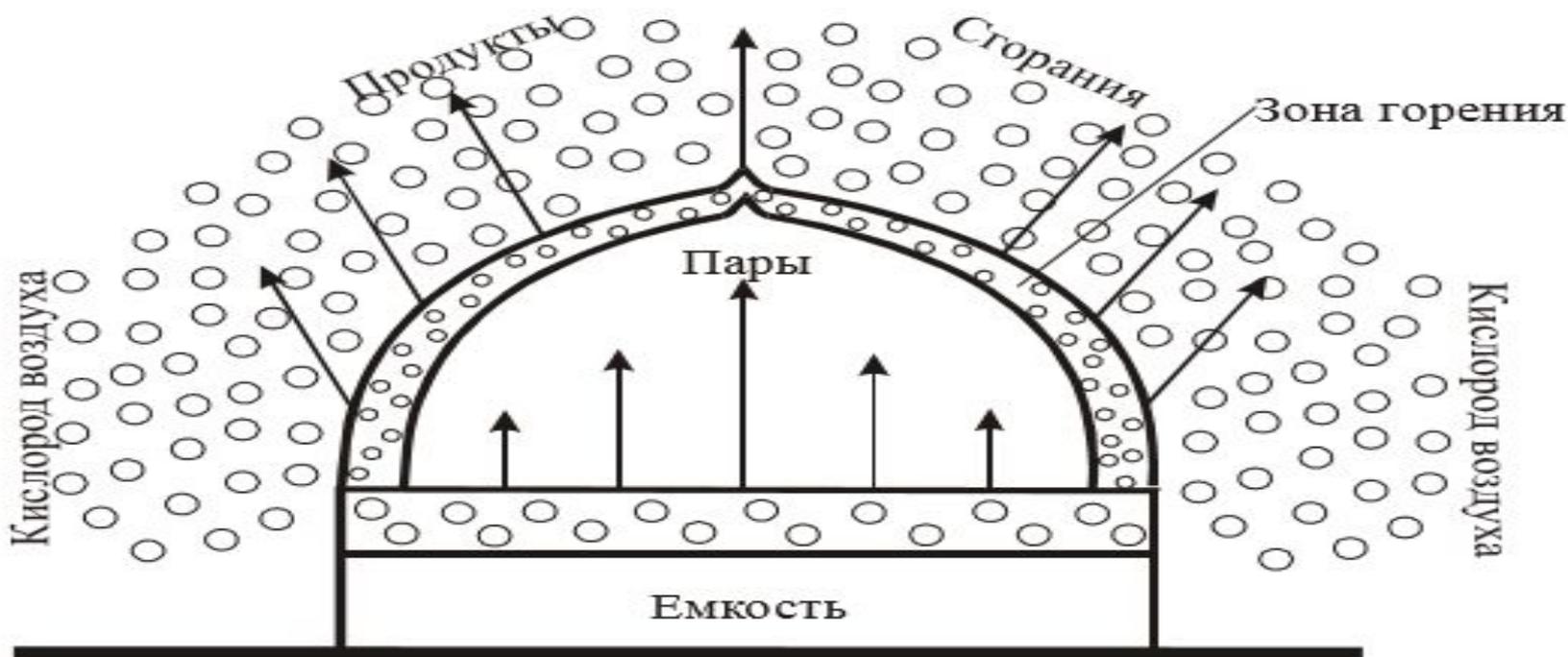


Рис. 1.3. Схема процесса горения паров или газов



## Понятие о кинетическом и диффузионном горении

При горении химически неоднородных систем время проникновения кислорода к горючему веществу сквозь продукты сгорания (диффузия) несоизмеримо больше времени протекания химической реакции, таким образом определяет общую скорость процесса. Такое горение называется **диффузионным**. Примерами диффузионного горения (рис. 1.4) является горение каменного угля, кокса (продукты горения препятствуют диффузии кислорода в зону горения). 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).

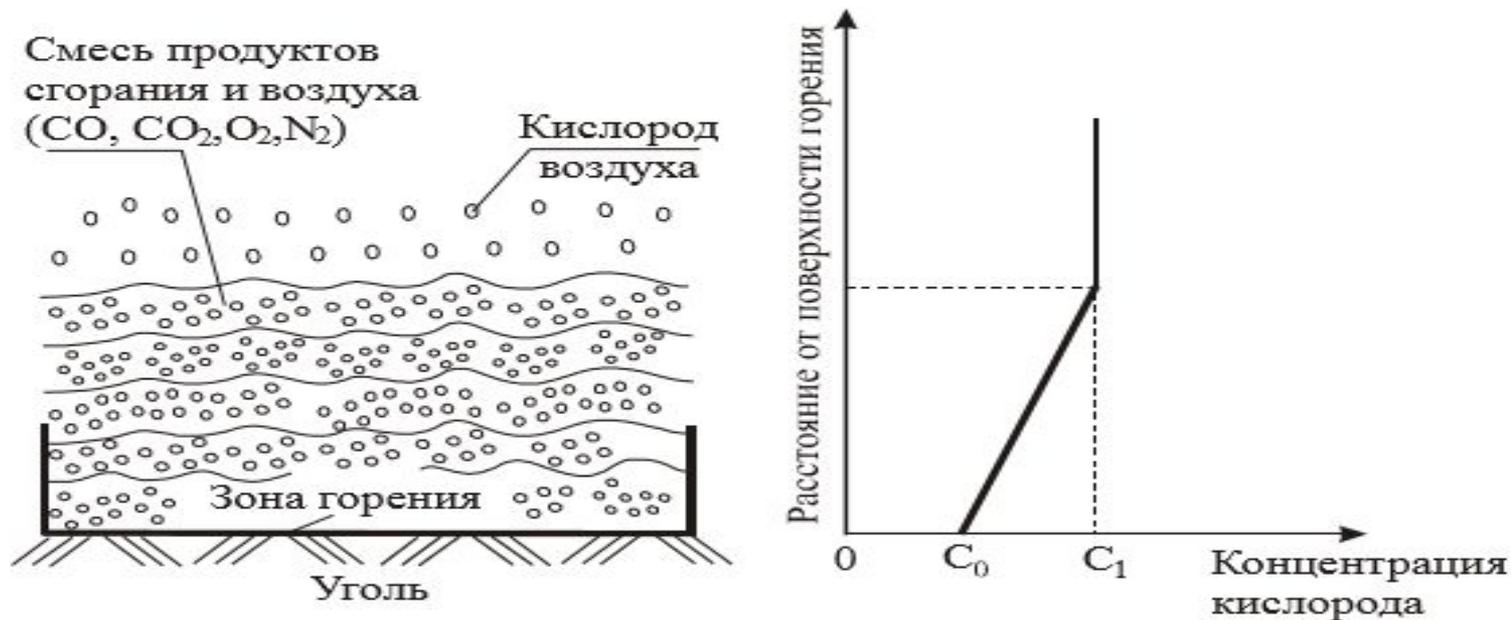


Рис. 1.4. Схема диффузии кислорода в зону горения твердого вещества (гетерогенное горение)



# Понятие о кинетическом и диффузионном горении

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).

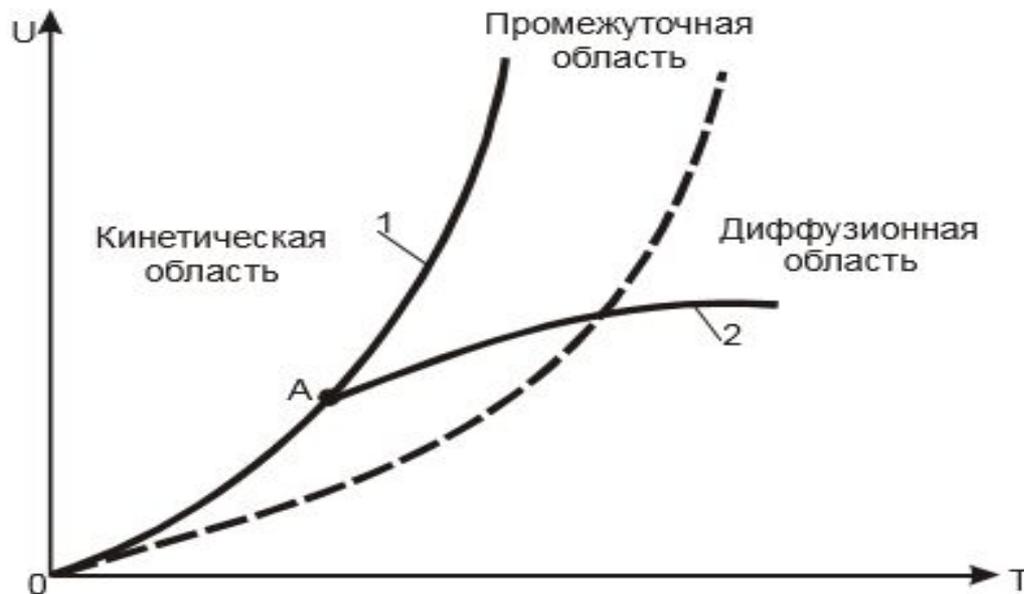


Рис. 1.5. Зависимость скорости  $U$  кинетического (1) и диффузионного (2) режимов от температуры. Точка  $A$  – переход из кинетической области в диффузионную

При низких температурах скорость реакции слабо зависит от температуры. 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. 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. 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.



# Самовозгорания веществ и материалов

Необходимо заострить внимание на процессах самовозгорания веществ и материалов (горение, возникающее при отсутствии внешнего источника зажигания) источника зажигания. В зависимости от внутреннего импульса процессы самовозгорания можно условно разделить на три вида:

1) химические самовозгорания; 2) микробиологические; 3) тепловые.

**Химическое самовозгорание** происходит, главным образом за счет увеличения скорости химической реакции с возрастанием температуры. Недостаточный теплоотвод способствует нагреву материала в результате окислительных процессов и соответственно достижению критических условий возникновения горения. Самовозгорающиеся химические вещества подразделяются на три основные группы:

1. вещества, самовозгорающиеся при взаимодействии с воздухом: щелочные металлы (литий, калий, натрий, рубидий, цезий), сульфиды щелочных и щелочноземельных металлов (например, сульфит кальция, белый и красный фосфор. Самовозгорание олиф, растительных масел и жиров, связано с их химическим строением (наличие двойных связей). В связи со способностью масел и жиров самовозгораться, большую опасность представляют промасленная одежда и обтирочные материалы

2. вещества, самовозгорающиеся при взаимодействии с водой: щелочные металлы, карбиды щелочных металлов. Образующегося при этом тепла достаточно для воспламенения образующихся газов;

3. вещества, самовозгорающиеся при взаимодействии друг с другом: окислители (например, азотная кислота, серная кислота, хлорная кислота. При обычной температуре в их присутствии самовозгорается большинство горючих веществ.



## Самовозгорания веществ и материалов

**Микробиологическое самовозгорание** происходит при соответствующей влажности и температуре в продуктах растительного происхождения. Особенно склонны к самовозгоранию недосушенные материалы (сено, опилки, листья, хлопок и т. д.), так как влага и тепло способствуют активному размножению микроорганизмов (уже при температуре 10 °С...18 °С). К разогреву также приводит низкая теплопроводность растительных продуктов. При  $t = 75^{\circ}$  микроорганизмы, как правило, погибают, но некоторые органические вещества обугливаются. Образующийся при этом пористый уголь адсорбирует пары и газы и процесс самовозгорания продолжается. Для предотвращения самовозгорания осуществляют регулярный контроль температуры, ограничивают влажность и размеры штабелей.

**Тепловое самовозгорание** присуще дисперсным веществам, обладающим сильно развитой поверхностью, способным адсорбировать кислород и вступать с ним в реакцию (ископаемые угли). Самовозгоранию углей способствует их измельченность, а также наличие примесей пирита и влаги. Температура 60 °С считается критической для самовозгорания углей, так как при дальнейшем нагреве резко увеличивается скорость самовозгорания. Главнейшим фактором теплового самовозгорания является температура, до которой нагреваются вещества.



# Горение газов

При нормальном давлении и температуре среднее расстояние между молекулами в газе приблизительно в 10 и более раз больше, чем в жидкостях и твердых телах, поэтому плотность газов значительно ниже плотности жидкостей и твердых веществ

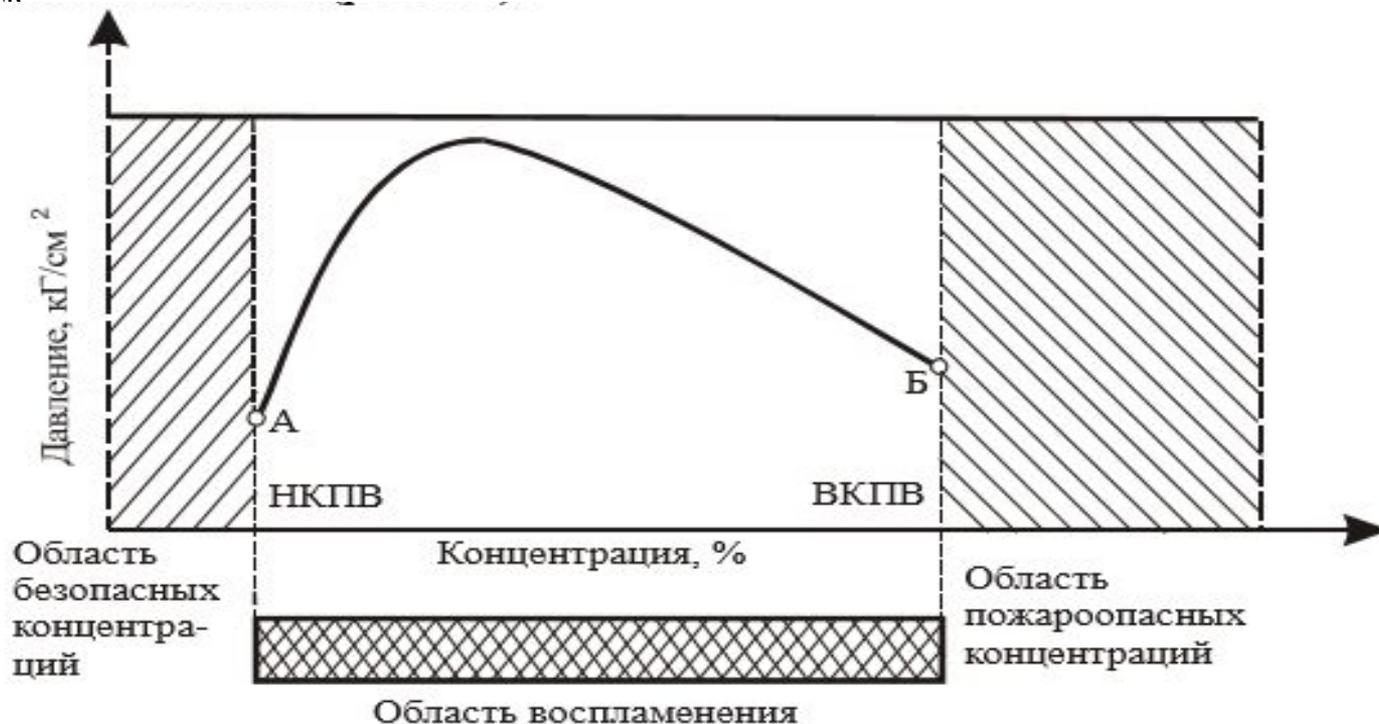


Рис. 2.1. Зависимость давления при взрыве горючих газопаровоздушных смесей от концентрации горючего в смеси

Все смеси горючего с воздухом до точки «А» не способны воспламеняться – это область безопасных концентраций. Называется нижним концентрационным пределом воспламенения (НКПВ)

Та наивысшая концентрация горючих газов или паров в смеси, при которой смесь еще воспламеняется от постороннего источника зажигания с распространением горения по всему объему смеси, называется верхним концентрационным пределом воспламенения (ВКПВ). Диапазон концентраций газа или пара в воздухе между НКПВ и ВКПВ называется областью воспламенения. Концентрации горючих газов и паров с воздухом выше ВКПВ называются пожароопасными.



## Горение жидкостей и твердых веществ

**Жидкости** – вещества в конденсированном агрегатном состоянии, промежуточном между твердым и газообразным. В жидкостях расстояние между молекулами – порядка размеров самих молекул, а силы межмолекулярного взаимодействия весьма значительны. Процесс горения жидкостей начинается с воспламенения паровоздушной смеси. Стационарный процесс горения устанавливается только при определенной температуре жидкости, однако, и при более низких температурах жидкости уже могут представлять пожарную опасность, так как над поверхностью их может создаться взрывоопасная концентрация паров. Горение жидкостей характеризуется двумя взаимосвязанными процессами – испарением и собственно сгоранием паро-воздушной смеси над поверхностью жидкости. Зоной горения является тонкий светящийся слой газов, в который с поверхности жидкости поступают горючие пары, а из воздуха диффундирует кислород. Все горючие жидкости способны испаряться и горение их происходит в паровой фазе. Количество пара зависит от состава и температуры жидкости. Процесс горения паров определяется областью воспламенения (интервал между НКПВ и ВКПВ), энергией источника зажигания, температурой горения и скоростью распространения пламени (по аналогии с горением газов).

**Горение твердых веществ** отличается от горения газов наличием стадии разложения и газификации. Горение в среде газообразного окислителя чаще всего происходит в результате воспламенения летучих продуктов пиролиза и имеет многостадийный характер. Под воздействием тепла происходит нагрев твердой фазы → разложение и выделение газообразных (летучих) продуктов → они воспламеняются и горят → тепло нагревает поверхность твердого вещества, вызывая поступление в зону горения новых порций горючих газов



# Горение пылевоздушных смесей

**Горючая пыль** – это дисперсная система, состоящая из твердых частиц размером, находящихся во взвешенном или осевшем состоянии в газовой среде, способная к самостоятельному горению в воздухе. Пыли по общей классификации коллоидно-дисперсных систем относятся к аэрозолям, в которых дисперсионная среда – воздух, а дисперсная фаза – твердое вещество в мелко раздробленном состоянии. Осевшая пыль называется аэрогелем, пыль во взвешенном состоянии – аэрозоль.





## Общие сведения о взрыве

**Взрыв** – внезапное изменение физического или химического состояния вещества, сопровождающееся крайне быстрым превращением (выделением) энергии, сопровождающееся:

- ) резким грохотом;
- ) быстрой химической или ядерной реакцией с выделением тепла и стремительным расширением газов;
- ) разрушающим действием за счет повышенного давления в области взрыва. Быстрое выделение энергии, приводит к разогреву, движению и сжатию продуктов взрыва и окружающей среды, возникновению интенсивного скачка давления, разрушению и разбрасыванию. В окружающей среде образуется и распространяется – ударная волна. Концентрация энергии определяет интенсивность разрушений в очаге взрыва. При взрыве исходная потенциальная энергия, вначале превращается в энергию нагретых сжатых газов, которая, в свою очередь, при расширении газов переходит в энергию движения, сжатия, разогрева среды.



## Характерные опасности химических производств

- образование взрывоопасного облака парогазовоздушных смесей над территорией предприятия и близлежащих жилых районов, а также в объеме помещений производственных зданий;
- образование взрывоопасных парогазовых смесей в аппаратуре и инициировании их внутренними источниками воспламенения в аппаратуре и трубопроводах;
- образование жидких или твердых взрывоопасных продуктов и накопление их в аппаратуре, а также инициирование взрыва внутренними источниками воспламенения;
- образование взрывоопасных пылевоздушных смесей в производственных помещениях и в аппаратуре и инициирование взрыва внутренними и внешними источниками воспламенения;
- проявление внешних источников воспламенения, инициирование взрыва парогазовых и жидкостных технологических выбросов.

