

Министерство образования и науки РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

**ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА**  
**сборник учебно-методических материалов**  
для направления подготовки 20.03.01 – Техносферная безопасность

Благовещенск, 2017

*Печатается по решению  
редакционно-издательского совета  
инженерно-физического факультета  
Амурского государственного  
университета*

*Составитель: Охотникова Г.Г.*

Теория горения и взрыва: сборник учебно-методических материалов для направления подготовки 20.03.01. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2017.

## СОДЕРЖАНИЕ

Краткое изложение теоретического материала	Стр. 4
Методические рекомендации к практическим занятиям	53
Методические рекомендации к лабораторным работам	58
Методические указания для самостоятельной работы	59

## КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

### Общие сведения о процессах горения

Горение – первый и технических процессов, освоенный человечеством. В истории развития техники этот процесс занимал и продолжает занимать важное место. Сама история эволюции человека показывает, что независимость от окружающей среды человек получил, лишь научившись добывать и поддерживать огонь. Всю историю человеческой цивилизации можно рассматривать через призму взаимоотношений человека и огня. Огонь – это тепло в жилище и переход к новому способу питания. Огонь – это изменение орудий труда: от дубины и камня – к металлическим орудиям. Согласно археологическим исследованиям использовать огонь для обогрева и приготовления пищи человек начал около 600 тыс. лет назад, а около 30 тыс. лет назад – и добывать его.

Научившись успешно применять огонь человек, в конечном итоге, пришел к созданию и развитию таких отраслей техники и науки как металлургия, энергетика, теплотехника, транспорт. Именно использование огня позволило получить многие чистые металлы, стекло, керамику. Немаловажную роль освоение огня сыграло в развитии термодинамики. В настоящее время считается, что около 90 % всей энергии, потребляемой цивилизацией, обеспечивается за счет процесса горения.

Процессы горения жидких, твердых и газообразных топлив широко используются практически во всех отраслях современной техники и технологии. Наиболее важную роль процессы горения играют в теплоэнергетике. Тепловые электростанции используют энергию горения угля, горючих газов, и жидких углеводородов. В технологии получения черных и цветных металлов, стекла, керамики, цемента, и других необходимых материалов также используется энергия горения для нагрева и плавления соответствующих компонентов и сырья. Артиллерия, стрелковое оружие и другие виды вооружений используют в качестве источника энергии взрывчатые вещества различных классов. Большое народнохозяйственное значение имеют взрывные технологии, применяемые для добычи угля и других полезных ископаемых, при строительных работах (возведение плотин, прокладка туннелей и т.д.), при разрушении ледяных затворов.

Важным направлением в науке о горении являются экологические аспекты горения, получившие большое развитие в последнее время. К ним относятся технология сжигания бытовых отходов, изучение механизмов образования экологически вредных продуктов сгорания (оксиды азота, сажа, соединения хлора). Эти исследования позволяют найти условия, при которых концентрация токсичных веществ в выбросах минимальна. Одним из важнейших направлений науки о горении является изучение пожаров (в жилых помещениях, лесных массивов и т.д.) и разработка методов пожаротушения. Для тушения пожаров используются как физические, так и химические способы, которые способствуют обрыву цепей химической реакции горения.

Отдельно следует отметить роль процессов горения в двигателестроении, авиации и ракетной технике. Процессы горения используются для получения движущей энергии различных транспортных средств, начиная от паровоза и вплоть до современных ракетных двигателей, автомобилей, самолетов, судов.

Но, несмотря на то, что теория горения сегодня представлена многотомными научными трудами, достаточно сложно ответить на вопрос: а что такое горение? Для этого процесса существует большое количество определений, одновременно и похожих, и отличающихся друг от друга.

Наиболее часто используются следующие определения процесса горения:

• **Горение** – физико-химический процесс, при котором превращение вещества сопровождается интенсивным выделением энергии, тепло- и массообменом с окружающей средой. Передача тепла за счет теплопроводности из зоны реакции в близлежащие слои вещества приводит к дальнейшему инициированию химических реакций. Линейная скорость перемещения фронта реакций называется скоростью горения и измеряется в м/с.

- **Горение** – протекание экзотермической химической реакции в условиях, обеспечивающих ее прогрессирующее самоускорение в начальных стадиях

- **Горение** – сложный физико-химический процесс, для которого характерны три признака: химическое превращение, выделение тепла, излучение света.

- С. Кумагаи под **горением** предлагает понимать "процессы, связанные с наличием пламени, точнее – интенсивные химические реакции, сопровождаемые свечением и тепловыделением, в большинстве случаев являющиеся окислительными".

Согласно современной физико-химической теории горения, процесс горения – это реакции, связанные с быстрым превращением и тепловым или диффузионным ускорением.

Таким образом, на основании приведенных определений можно заключить, что процесс горения должен рассматриваться и как химический, и как физический.

Физика процесса горения связана с выделением большого количества тепла и лучистой энергии. При этом процесс окисления принято разделять на две стадии, по типу пламени. Средняя часть такого процесса сопровождается появлением холодного пламени: энергия высвобождается частично, тепловыделение невелико. Конечные стадии процесса горения сопровождаются выделением горячего пламени, которое и характеризует выделение большого количества энергии.

При практическом использовании процессов горения под пламенем понимают именно горячее пламя. По внешнему виду (признаку) горение может происходить и без пламени, то есть оно может быть пламенным или беспламенным (тлением).

Химия горения связана с протеканием окислительно-восстановительных реакций. Окислителями в процессе горения могут быть различные вещества: кислород (воздух), озон, перекиси, вещества богатые кислородом (нитросоединения, азотная кислота, перхлораты), галогены. Таким образом, класс веществ, выступающий в качестве окислителей, весьма обширен. Но чаще всего процессы горения происходят на воздухе, где в качестве окислителя выступает кислород. В составе атмосферного воздуха, как известно, содержится около 21 % кислорода, 78 % азота и около 1 % примесей (инертные газы, водород). Как правило, в процессе горения азот и примеси не участвуют, поэтому для выполнения расчетов принимают, что в составе воздуха 21 % кислорода и 79 % азота по объему.

Вещество, способное окисляться чистым кислородом или кислородом воздуха, называется горючим веществом. В соответствии с нормативными документами все вещества и материалы по способности к горению (горючести) делятся на три группы:

- горючие – способные самовозгораться, а также возгораться от источника зажигания и самостоятельно гореть после его удаления;

- трудногорючие – способные возгораться в воздухе от источников зажигания, но не способные гореть после его удаления;

- негорючие вещества – неспособные к горению в воздухе.

В качестве горючего, способного взаимодействовать с окислителем, также могут быть многие вещества: большинство металлов в свободном виде, сера элементарная и связанная ( $H_2S$ ,  $FeS$ ), оксид углерода(II), водород и огромное число органических соединений.

Тем не менее, наибольшее практическое значение в качестве окислителя приобрел кислород (чистый или кислород воздуха), в а качестве горючего – углеводородные вещества (природный газ, нефть, угли, сланцы, торф и т. п.). Процессы сжигания этих горючих веществ в атмосфере кислорода являются и наиболее изученными. При этом необходимо учитывать, что процессы окисления кислородом могут проходить с различной интенсивностью, но горение относится к интенсивным реакциям, то есть таким, при которых наблюдается значительное выделение тепла и лучистой энергии. В качестве примера неинтенсивной окислительной реакции можно рассматривать коррозию железа при контакте с влажным воздухом.

Продукты окислительно-восстановительных реакций, сопровождающихся свечением (пламенем), называются **продуктами сгорания**. Смесь горючего вещества с кислородом или воздухом – **горючая смесь**.

В зависимости от агрегатного состояния компонентов горючей смеси процесс горения может быть гомогенным, гетерогенным, каталитическим, либо горением взрывчатых веществ. При *гомогенном* горении все компоненты горючей смеси находятся в газообразном состоянии (горение газо- и парообразных горючих веществ в среде газообразного окислителя). При *гетерогенном* – горючие вещества представляют собой жидкости или твердые тела, а окислитель может быть как газообразным, так и жидким (кислота). Каталитическое горение рассматривается как гомогенно-гетерогенный процесс, протекающий на катализирующей твердой поверхности (платина и др.). Отдельно рассматривают горение взрывчатых веществ: переход вещества из конденсированного состояния в газообразное.

Для процесса горения характерны две стадии: воспламенение вещества и его догорание до продуктов сгорания. Общее время горения складывается из времени протекания обеих стадий. Основной технической задачей при использовании процессов горения является достижение минимального времени горения при максимальном тепловыделении.

Для возникновения и протекания процесса горения необходимы следующие условия:

- наличие в определенный момент в данной точке пространства горючего вещества, окислителя и источника зажигания;

- горючее и окислитель должны находиться в определенном количественном отношении;

- источник зажигания должен обладать достаточной энергией.

Наиболее вероятные источники зажигания в условиях производства:

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

В некоторых случаях источником зажигания смеси могут служить лучи света (например, для смесей  $\text{CO} + \text{Cl}_2$ ;  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$ ), или вода для щелочных металлов.

Т.о., чтобы инициировать процесс горения, необходим начальный энергетический импульс. Обычно в качестве импульса выступает нагревание горючего, в результате которого происходит его воспламенение. Под воспламенением понимают начальную стадию горения, в течение которой энергия, подводимая от внешнего источника, приводит к самоускорению химической реакции. Одним вариантом воспламенения является самовоспламенение, происходящее из-за прогрессирующего накопления тепла (тепловое самовоспламенение) или активных промежуточных частиц (цепное воспламенение). Другим – вынужденное воспламенение или зажигание.

Распространение пламени возможно только при условии, что давление и температура в горючей смеси имеют определенные значения. Интервалы, в которых находятся эти значения, называют пределами воспламенения. Различают верхний и нижний предел воспламенения.

Скорость горения отличается от скорости движения пламени относительно наблюдателя. В результате многочисленных наблюдений твердо установлено, что горение происходит на поверхности сгорающего образца, а фронт горения распространяется вглубь образца строго перпендикулярно его поверхности с постоянной скоростью. Так, к примеру, порох в цилиндрической оболочке горит по круглому слою, распространяющемуся от одного торца цилиндра к другому, цилиндрический заряд пороха горит в тонком слое по всей поверхности, границы которой приближаются к центру цилиндра. А шарообразный заряд горит шаровым слоем, стремящимся к центру шара. На рисунке схематически изображены фронт горения и направления его распространения для приведенных выше форм заряда, фронт обозначен красным цветом, заряд серым цветом, стрелками указано направление движения фронта пламени.

По скорости распространения пламени горение подразделяется на три группы:

- дефлаграционное (скорость – несколько м/с);

- взрывное (скорость – несколько десятков или сотен м/с);
- детонационное (скорость – до нескольких тысяч м/с).

Характерной чертой явлений горения является способность процесса к пространственному распространению. Под распространением пламени понимают движение пламени по газовой смеси. Газовую смесь разделяют на две части: сгоревший газ (пламя уже прошло) и несгоревший газ (пламя еще не дошло). Граница между этими областями называется фронтом пламени. Возможны два механизма распространения пламени по смеси: тепловой (передача тепла) и диффузный (диффузия активных частиц). В зависимости от условий, при которых протекает горение, преобладает тот или иной механизм. Например, диффузный механизм характерен для горения при низких давлениях (в топках, печах, камерах сгорания двигателей). Эти механизмы рассматривают как два способа распространения пламени:

- Детонационная волна – вид ударной волны, при распространении которой тепловыделение происходит за счет химических реакций во фронте пламени. Перед фронтом пламени (фронтом волны) и за ним возникает разность давлений, благодаря которому скорость распространения детонационной волны превышает скорость распространения звука (около 350 м/с).

- Волна горения (распространение пламени дефлаграцией) – вид распространения пламени за счет теплопередачи и диффузии активных молекул от фронта пламени. При этом происходит последовательный переход несгоревшего газа в продукты сгорания. 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. Разностью давлений до и после фронта пламени обычно пренебрегают, а скорость распространения волны горения значительно ниже скорости звука.

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.

Возможно непосредственное наблюдение скорости распространения пламени, которая в случае стационарного пламени будет равняться нулю. При этом скорость горения, пока процесс протекает, считать таковой нельзя. Стационарным называется пламя, пространственное положение которого фиксировано, например, пламя газовой горелки. Если пламя перемещается в пространстве, оно является нестационарным.

По способу приготовления газовой смеси пламена и сами смеси подразделяют на две группы. Если горючее предварительно смешано с окислителем, смесь называют гомогенной (не путать с гомогенным горением!). Пламя в этом случае называют кинетическим. В том случае, когда горючее перемешивается с окислителем непосредственно в процессе горения (распыление горючего в воздухе), смесь называется гетерогенной, а пламя – диффузионным. Процессы горения таких пламен отличаются друг от друга. Кинетические и диффузионные пламена могут быть как стационарными, так и нестационарными.

На процесс горения любой смеси значительное влияние оказывает ее гидродинамическое состояние. Важным фактором является турбулентность. По наличию этого фактора различают ламинарные и турбулентные пламена. Интенсивность и масштаб турбулентности оказывают влияние на горение любой смеси, причем особенно сильно это проявляется при горении диффузных пламен.

С позиций гидродинамического состояния смесей в теории горения рассматривается несколько основных типов пламен. Они неодинаковы по своему научному, практическому значению, степени изученности. Неодинаковы параметры, представляющие наибольший ин-

терес для данного типа пламени. Наиболее важные для теории горения являются следующие типы пламен:

- 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, и т. п.;
- 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.

Предполагается также, что некоторое влияние на процессы горения оказывает сила тяжести, так как эти процессы у поверхности Земли и в невесомости протекают отлично друг от друга. На Земле возможна свободная конвекция продуктов сгорания, в невесомости перемещение продуктов сгорания происходит только за счет диффузии. Но для количественного решения данного вопроса требуется проведение фундаментальных исследований в различных условиях.

Широкое использование процессов горения в жизнедеятельности человека помимо улучшения условий жизнедеятельности влечет за собой массу проблем. Выброс в атмосферу продуктов сгорания, в составе которых находятся ядовитые вещества, загрязняет окружающую среду. Поэтому все исследования, проводимые в области процессов горения (взрыва) должны быть направлены не только на повышение эффективности этих процессов, но и на снижение их токсичности.

### **Процесс горения в техносфере**

Под *техносферой* понимают область биосферы, в которой реализуется деятельность людей, направленная на развитие человеческого общества. *Техногенными веществами* называют вещества, используемые для такого рода деятельности или являющиеся ее результатом.

Для того чтобы происходил процесс горения, необходимо наличие горючей смеси и источника зажигания. Для инициации процесса необходимо нагревание горючей смеси до температуры воспламенения. Далее процесс горения поддерживается за счет зоны горения. В зависимости от соотношения в горючей смеси горючего вещества и окислителя (кислорода) скорость горения может быть разной. Максимальной скоростью горения будет скорость горения вещества в чистом кислороде, минимальной – при содержании кислорода в воздухе в пределах 14 – 15%. Если содержание кислорода меньше этой величины, процесс горения, как правило, прекращается.

В теории горения наиболее удобно использовать понятие *горючей системы*, в которую, помимо горючей смеси (горючее вещество плюс окислитель) входят также и продукты горения. Дополнительно в составе горючей системы рассматривают источник зажигания, негорючие вещества при условии, что они влияют на условия горения и тушащие вещества.

Помимо кислорода в качестве окислителя могут выступать другие вещества, например: хлор, сера, пары брома. Тем не менее, в процессах горения, протекающих в биосфере или связанных с техносферой (за исключением специальных производств), окислителем является кислород, содержащийся в воздухе. В техносферных процессах горючие вещества могут

находиться как в газообразном, так и в жидком или твердом состояниях; окислитель – в газообразном.

Техногенные вещества могут быть как горючими, так и негорючими. Горючие техногенные вещества по агрегатному состоянию могут быть жидкими, твердыми и газообразными. К.В. Чернов предлагает классифицировать техногенные вещества в зависимости от состава и агрегатного состояния следующим образом (табл. 1). Газообразные горючие вещества могут быть *чистыми* – простые газы, или входить в состав горючих смесей. Если такие смеси состоят из горючих и негорючих молекул, они так и называются – *газовые смеси*. Если в составе смеси имеются горючие и негорючие жидкие и/или твердые частицы, такие газовые смеси называются *газовзвесьями*.

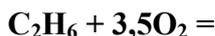
Таблица 1

Классификация техногенных горючих веществ по агрегатному состоянию и составу

Агрегатное состояние	Название горючего вещества	Состав
ГОРЮЧИЕ ГАЗЫ	Простой газ	Отдельное чистое горючее вещество или смесь горючих веществ, находящихся в газообразном состоянии
	Газовая смесь	Смесь горючих и негорючих газов
	Газовзвесь	Смесь горючих газов с горючими и негорючими частицами жидкостей или твердых веществ
ГОРЮЧИЕ ЖИДКОСТИ	Простые жидкости	Отдельные чистые горючее вещество или смеси горючих веществ, находящихся в жидком состоянии
	Жидкие смеси (растворы)	Смесь горючих и негорючих жидкостей
	Гидровзвеси	Смесь горючих жидкостей с горючими и негорючими частицами твердых веществ
	Газожидкостные смеси	Смесь горючих жидкостей с горючими и негорючими газами
ГОРЮЧИЕ ТВЕРДЫЕ ВЕЩЕСТВА	Твердые вещества простого состава	Отдельные чистые горючие вещества, аморфные или кристаллические, находящиеся в твердом состоянии
	Твердые вещества сложного состава	Смеси и растворы, состоящие из горючих и негорючих частиц
	Твердые пористые материалы	Твердые горючие пористые вещества сложного состава, в поры которых заполнены горючими и негорючими газами
	Слоистые твердые материалы	Сочетание пластов (кусков) твердого горючего вещества сложного состава со слоями (промежутками), заполненными горючими и негорючими газами
	Аэрозоли	Мелкие частицы твердого горючего вещества сложного состава, взвешенные в воздухе

Для проведения расчетов и оценки горючих смесей составляются уравнения реакций горения. Процессы горения могут протекать как в чистом кислороде, так и на воздухе. Для составления *уравнения горения* в чистом кислороде слева указывают химическую формулу горючего вещества и кислород в количестве, необходимом для реализации окислительно-восстановительного процесса, именуемого горением, а справа – продукты горения в количестве, соответствующем левой части. Для упрощения проведения дальнейших расчетов, связанных с процессом горения удобно, чтобы горючее вещество было представлено в количестве 1 моль (коэффициент перед горючим веществом равен 1). Коэффициент перед кислородом в этом случае может быть дробным.

Для процесса горения этана левая часть уравнения будет выглядеть следующим образом:

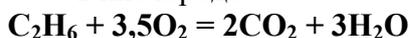


При сгорании вещества в воздухе необходимо учитывать, что в состав последнего, помимо кислорода, входят азот и негорючие примеси. Для упрощения такого уравнения считают, что воздух состоит из 21 % кислорода и 79 % азота (остальными примесями пренебрегают, включая их в состав азота). Расчет показывает, что на одну часть (по объему) кислорода приходится 3,76 объемных частей азота ( $79\%/21\% = 3,76$ ). Тогда левая часть уравнения горения примет вид:

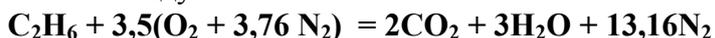


Для того, чтобы определить продукты сгорания, рассматривают состав горючего вещества и свойства отдельных его компонентов, а также количество окислителя. Если окислителя достаточно для полного протекания реакции горения, говорят о полном сгорании вещества. Полное сгорание характеризуется образованием веществ (продуктов сгорания), которые не способны к дальнейшему горению. При полном сгорании углерод превращается в оксид углерода (IV) –  $\text{CO}_2$ , водород – в воду –  $\text{H}_2\text{O}$ . Азот в процессе горения не участвует, поэтому полностью и без изменений перейдет в продукты сгорания. В окончательном виде уравнение горения примет вид:

- в кислороде



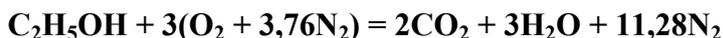
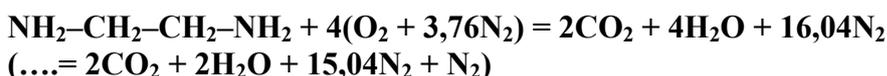
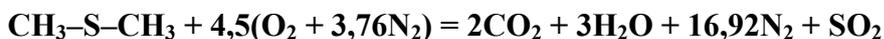
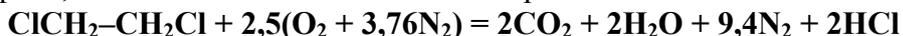
- на воздухе



Скобки, в которых указан состав воздуха в левой части уравнения, можно не раскрывать.

В приведенных уравнениях горения состав продуктов горения обусловлен тем, что в горючее вещество состоит из двух компонентов – углерода и водорода. При сгорании любых углеводородов продуктами сгорания будут углекислый газ и вода, причем количество молекул углекислого газа определяется числом атомов углерода в горючем веществе, а число молекул воды в 2 раза меньше количества атомов водорода.

Если в состав горючего вещества входят другие компоненты, они учитываются в продуктах горения следующим образом. Хлор, входящий в состав горючего вещества, выделяется в процессе горения в виде хлороводорода –  $\text{HCl}$ . Сера окисляется до оксида серы (IV) –  $\text{SO}_2$ , фосфор – до оксида фосфора (V) –  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Азот при горении выделяется в свободном виде ( $\text{N}_2$ ), так как до температуры  $2000^\circ\text{C}$  химически инертен. Кислород, входящий в состав горючего вещества, участвует в процессе горения и в свободном виде не выделяется. Примерами уравнений горения таких веществ являются уравнения горения дихлорэтана, диметилсульфида, этилендиамина и этилового спирта:



Если в состав горючего вещества входит кислород, то для процесса горения требуется меньше воздуха; причем, чем больше кислорода в горючем веществе, тем меньше воздуха необходимо (сравните уравнения горения этана и этилового спирта).

Если окислителя (кислорода) недостаточно, образующиеся продукты сгорания способны к продолжению горения. К таким веществам относятся оксид углерода (II), сероводород, циановодородная кислота, аммиак, альдегиды. Присутствие таких веществ в зоне горения опасно, так как при дополнительном поступлении кислорода процесс может начаться снова.

Наличие дыма при горении свидетельствует о *неполном сгорании* веществ. Такой процесс характерен для пожаров, вызванных горением органических веществ.

Таким образом, с позиций современной теории окисления–восстановления процесс горения рассматривается следующим образом:

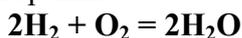
1. Сущность окисления заключается в потере электронов атомами или ионами окисляющегося вещества, а сущность восстановления – в присоединении электронов атомами или ионами восстанавливающегося вещества. Процесс, при котором вещество теряет электроны, называется окислением, а присоединение электронов – восстановление.

2. Окисление какого-либо вещества не может произойти без одновременного восстановления другого вещества. Например, при горении магния в кислороде или воздухе происходит окисление магния и одновременно – восстановление кислорода. При полном сгорании образуются продукты, неспособные к дальнейшему горению ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HCl}$  и т. д.), при неполном – получившиеся продукты способны к дальнейшему горению ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{NH}_3$ , альдегиды и т. д.). Схема: спирт – альдегид – кислота.

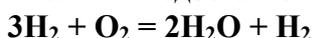
В условиях пожара при горении органических веществ в воздухе чаще всего полного сгорания не происходит. Признаком неполного сгорания является наличие дыма, содержащего несгоревшие частицы углерода.

В зависимости от соотношения количеств горючего вещества и окислителя для пламени предварительно перемешанной (гомогенной) смеси выделяют 3 группы:

1. **Стехиометрическая смесь** – смесь, при сгорании которой горючее вещество и окислитель расходуют друг друга полностью, образуя вещества, не способные к продолжению горения.



2. **Богатая смесь** – смесь, в которой горючее вещество находится в избытке, а окислитель – в недостатке.



3. **Бедная смесь** – характеризуется недостатком горючего вещества и избытком окислителя.



**Мольная доля горючего вещества** в составе горючей смеси определяется как отношение количества горючего вещества к сумме количеств горючего вещества и окислителя. В том случае, когда горючее вещество находится в количестве 1 моля, его мольная доля вычисляется по формуле:

$$N = 1/(1 + v)$$

где  $v$  – количество молей кислорода.

В любом уравнении горения перед молекулой кислорода стоит коэффициент, называемый стехиометрическим коэффициентом реакции горения и обозначаемый  $\beta$ . Этот коэффициент определяет молярные соотношения горючего вещества и окислителя. При горении газообразных веществ стехиометрический коэффициент реакции горения показывает соотношение объемов горючего вещества и окислителя.

Для процесса горения в воздухе мольные доли компонентов горючей стехиометрической смеси выражаются с учетом состава воздуха следующим образом:

- для горючего вещества  $N_r = 1/(1 + 4,76v)$ ;
- для окислителя  $N_o = vN_r$ ;
- для азота  $N_a = 3,76N_o$

### Расчет процесса горения

**Расчет процесса горения** заключается в расчете объема (массы) воздуха, необходимого для реализации данного процесса, объема (массы) продуктов горения и их процентного состава. Выполнение этих расчетов необходимо для проведения мероприятий по тушению пожара, определения температуры горения и других параметров, необходимых для принятия мер безопасности в пожаро- и взрывоопасных помещениях.

### Определение характеристик горения веществ

Безопасность работы персонала в любом производственном помещении, где хранятся или используются химические вещества, зависит от условий хранения, использования и свойств этих веществ. Важным параметром, характеризующим техногенное вещество, является его пожароопасность, взрывоопасность или безопасность. Если вещество пожаро- или взрывоопасно, необходимо не только соблюдение мер предосторожности при обращении с ним, но и обязательное соблюдение условий хранения, применения и, при необходимости, транспортировки данного вещества. Наиболее опасными с этой точки зрения хранения являются горючие вещества. Это связано с тем, что при использовании (хранении, транспортировке) горючих веществ изменение условий окружающей среды (в частности, температуры или давления) может привести к чрезвычайной ситуации в производственных или бытовых помещениях.

Существует ряд характеристик и параметров, определение которых необходимо для успешного решения задач безопасности при работе с горючими веществами. Определение параметров безопасности при эксплуатации химических веществ или смесей предполагает проведение различного рода расчетов. Но прежде, чем проводить расчеты, связанные с процессами горения, необходимо определить, горючим или негорючим является исследуемое вещество, т.к. теория горения изучает поведение горючих веществ. К полезным сведениям касательно безопасности хранения и применения горючих веществ относится также характер свечения пламени горючего вещества. Для решения вопросов о пожаро- и взрывоопасности помещений и производств, а также для проведения экспертизы используемых материалов необходимо ознакомление с нормативными документами.

Техногенные вещества могут быть как горючими, так и негорючими.

Определить способность вещества к горению в нормальных условиях без проведения соответствующих экспериментов можно, рассчитав коэффициент горючести. Эта характеристика зависит от состава сложных веществ. Коэффициент горючести сложного вещества (**K**) позволяет определить способность вещества к горению и используется для расчета температуры вспышки жидких горючих веществ. Коэффициент горючести является безразмерной величиной и рассчитывается по формуле:

$$K = 4n(C) + 4n(S) + n(H) + n(N) - 2n(O) - 2n(Cl) - 3n(F) - 5n(Br)$$

где  $n$  – число атомов углерода, серы, водорода, азота, хлора, фтора и брома соответственно в молекуле данного вещества. Если какой-то вид атомов в молекуле определяемого вещества отсутствует, то при расчете его составляющая не учитывается (равна 0).

Если коэффициент горючести меньше единицы ( $K < 1$ ), то вещество негорючее. Если коэффициент горючести больше единицы ( $K > 1$ ), то вещество является горючим.

Характер свечения пламени зависит от состава горючего вещества. Так как в процессе горения температура повышается, в зоне горения происходит термическое разложение сложных веществ. При разложении органических веществ, основным компонентом которых является углерод, цвет пламени будет определяться его количеством. При малом количестве углерода (или его отсутствии) цвет пламени будет голубоватым, либо пламя будет бесцветным. Это связано с тем, что при разложении углерод быстро окисляется кислородом воздуха до оксида углерода(II). Увеличение содержания углерода в горючем веществе придает пламени яркий цвет, так как частички углерода, образующиеся при горении, будут накаляться, испуская лучистую энергию. При достаточном поступлении кислорода из воздуха в зону горения будет происходить окисление углерода до оксида углерода(IV) – углекислого газа. При горении ряда веществ количество образующегося в зоне горения углерода столь велико, что поступающего кислорода недостаточно, и характер свечения пламени изменяется. Пламя становится коптящим.

Характер свечения пламени без проведения эксперимента определяют расчетным путем по процентному содержанию углерода и кислорода в горючем веществе на основании таблицы 2. Для этого необходимо рассчитать содержание углерода и кислорода в горючем веществе.

Таблица 2.  
Зависимость цвета пламени от состава горючего вещества

Характер свечения пламени	Содержание углерода в горючем веществе, %	Содержание кислорода в горючем веществе, %
Бесцветное	До 50	Более 30
Яркое, не коптящее	Не более 75	Отсутствует или менее 30
Яркое, коптящее	Более 75	Отсутствует или менее 25

### Задание состава горючего материала

При расчётах параметров горения требуется знать **количественный состав** горючего материала. Этот состав обычно задаётся количеством одинаковых молекул или атомов вещества, выраженным их массой или объёмом, в процентах, от всей массы или всего объёма горючего материала. По составу горючие вещества могут быть как индивидуальными горючими соединениями, так и сложными смесями горючих веществ. По агрегатному состоянию – жидкими, твердыми или газообразными. **Индивидуальными** горючими веществами называются вещества, состав которых можно выразить определенными химическими формулами. В отличие от них, **смеси горючих веществ** химическими формулами выразить нельзя, поэтому их состав выражают процентным содержанием образующих их компонентов.

Обычно горючий материал именуют общим названием – **топливо**. Под топливом понимают углеродсодержащее соединение или смесь соединений, при сгорании которых выделяется количество теплоты, достаточное для промышленного использования. В состав такого топлива, как правило, входят горючие и негорючие элементы. Состав такого топлива, представленный входящими в него компонентами, называется элементарным составом топлива (табл. 3).

Таблица 3  
Элементарный состав топлива

Элементы и продукты распада	Летучее горючее	кокс	Летучее негорючее		Летучее горючее		Зола и шлак		Летучее негорючее
	<b>Горючая часть</b>		<b>Внутренний балласт</b>		<b>Внешний балласт</b>				
	<b>Н</b>	<b>С</b>	<b>О</b>	<b>N</b>	<b>S<sub>о</sub></b>	<b>S<sub>к</sub></b>	<b>S<sub>с</sub></b>	<b>A</b>	<b>W</b>
<b>О</b>	<b>ОРГАНИЧЕСКАЯ МАССА</b>								
<b>Г</b>	<b>ГОРЮЧАЯ МАССА</b>								
<b>С</b>	<b>СУХАЯ МАССА</b>								
<b>Р</b>	<b>РАБОЧАЯ МАССА</b>								

Компоненты, входящие в состав топлива, расшифровываются следующим образом:

**Н** – водород                      **N** – азот                      **S<sub>к</sub>** – колчеданы                      **W** – влага  
**С** – углерод                      **S<sub>о</sub>** – органическая сера                      **S<sub>с</sub>** – сульфаты  
**О** – кислород                      **A** – зола

Сульфаты, входящие в состав топлива и обозначенные **S<sub>с</sub>** являются негорючими материалами.

Характеристики топлива могут быть отнесены к рабочей массе составляющих элементов:

$$C^P + H^P + O^P + N^P + S^P + A^P + W^P = 100 \%$$

А также к сухой массе, горючей массе или органической массе соответственно:

$$C^c + H^c + O^c + N^c + S^c + A^c = 100 \%$$

$$C^r + H^r + O^r + N^r + S^r = 100 \%$$

$$C^o + H^o + O^o + N^o + S^o_{\text{орг}} = 100 \%$$

Все компоненты задаются в процентах на 1 кг массы топлива.

Влага и минеральный примеси, переходящие при горении в золу, составляют балласт топлива:  $A + W$

Пересчет элементарного состава топлива с одной массы на другую осуществляется по формулам типа:

$$C^P = C^r \cdot K$$

где  $K$  – переводной коэффициент, соответствующий значениям, приведенным в табл. 4.

Таблица 4.

Коэффициенты для пересчета заданной массы топлива

Заданная масса топлива	Масса топлива, на которую делается пересчет			
	рабочая	сухая	горючая	органическая
Рабочая	1	$\frac{100}{100 - W^P}$	$\frac{100}{100 - (A^P + W^P)}$	$\frac{100}{100 - (S^P_{\text{л}} + A^P + W^P)}$
Сухая	$\frac{100 - W^P}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^c}$	$\frac{100}{100 - (S^c_{\text{л}} + A^c)}$
Горючая	$\frac{100 - (A^P + W^P)}{100}$	$\frac{100 - A^c}{100}$	1	$\frac{100}{100 - S^r_{\text{л}}}$
Органическая	$\frac{100 - (S^P_{\text{л}} + A^P + W^P)}{100}$	$\frac{100 - (S^c_{\text{л}} + A^c)}{100}$	$\frac{100 - S^r_{\text{л}}}{100}$	1

## МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

### Расчет воздуха для горения индивидуальных веществ

Для того чтобы рассчитать процесс горения индивидуальных веществ, необходимо составить уравнение горения в кислороде и на воздухе. Минимальное количество воздуха, которое требуется для полного сгорания вещества, называется теоретически необходимым. После этого процесс горения рассчитывается по следующему алгоритму:

1. Вычисляется молярная масса горючего вещества ( $M$ ) и его количество ( $\nu$ ), используемое для сжигания.
2. Вычисляется объем воздуха, необходимый для сгорания единицы массы (объема) вещества при нормальных условиях –  $V_B^0$ .
3. При необходимости вычисляется объем 1 моля воздуха при заданных условиях (давлении и температуре) –  $V_t$ . Расчет производится на основании объединенного газового закона Бойля-Мариотта и Гей-Люссака,
4. По реакции горения рассчитывается количество воздуха, необходимого для сгорания заданного количества вещества в заданных условиях, и занимаемый им объем.

Для вычисления молярной массы вещества необходимо знать его состав, выраженный химической формулой. **Моль** – количества вещества, содержащее столько атомов, молекул,

ионов, электронов или других структурных единиц, сколько содержится атомов в 12 г изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ . В практических расчетах это число принимают равным  $6,02 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ .

Молярную массу рассчитывают как сумму атомных масс образующих вещество элементов, с учетом количества атомов в молекуле.

Для определения количества вещества используют формулу:

$$v = m / M,$$

где  $v$  – количество вещества (моль),  $m$  – масса вещества (г),  $M$  – молярная масса вещества (г/моль).

Для расчета теоретически необходимого объема воздуха пользуются формулой:

$$V_{\text{в}}^0 = 22,4 \cdot v_{\text{в}} / (v_{\text{г}} \cdot m)$$

Если масса горючего вещества выражена в кг, то количества воздуха и горючего вещества ( $v_{\text{в}}$  и  $v_{\text{г}}$ ) рассчитываются в кмоль, а объем 22,4 – в м $^3$ .

Расчет молярного объема воздуха при заданных температуре и давлении проводят по следующей формуле:

$$V_t = 22,4 \cdot P_0 \cdot T_i / (T_0 \cdot P_i), (\text{л})$$

где 22,4 л – объем 1 моля газа при температуре 0 °С (273 К) и давлении 101,3 кПа (или 760 мм рт. ст.);

$P_0$  – 101,3 кПа (или 760 мм рт. ст.) – давление при нормальных условиях (н.у.);

$T_0$  – температура при нормальных условиях, К;

$T_i$  – температура, при которой происходит горение, К;

$P_i$  – давление, при котором происходит горение (кПа или мм рт. ст.).

Для индивидуальных горючих веществ заданного количества (массы, объема) расчет воздуха, необходимого для сгорания, определяется из пропорции, составленной на основании следующих рассуждений. Так как мы рассчитываем процесс горения в воздухе, то для учета воздуха принимаем суммарный коэффициент соотношения кислорода и азота, равный 4,76 (1+3,76). Тогда для сгорания единицы количества горючего вещества требуется  $\beta \cdot 4,76$  объемов воздуха. Объемы могут быть выражены как в литрах, так и в м $^3$ , в зависимости от условий задачи. Поэтому для заданного количества горючего вещества при заданных условиях воздуха потребуется:

$$V_{\text{возд.}} = V_t \cdot \beta \cdot v \cdot 4,76, (\text{л})$$

Это соотношение применимо для расчетов по сгоранию веществ в любом агрегатном состоянии. Если же горючее вещество – газ (г.г. – газообразное горючее), то расчет упрощается:

$$V_{\text{возд.}} = V_{\text{г.г.}} \cdot \beta \cdot 4,76, (\text{л})$$

Приведенные расчеты позволяют определить теоретическое количество воздуха необходимое для сгорания горючего вещества. Практическое же значение больше, так как горение – химический процесс, в ходе которого уменьшается концентрация главного компонента – кислорода воздуха. Кроме этого, нужно учесть, что продукты горения удаляются из зоны реакции, захватывая часть воздуха. Для поддержания процесса требуется ввести избыток воздуха, который не расходуется и выводится полностью из зоны реакции. Эту часть воздуха называют избытком воздуха и обозначают  $V_{\text{изб.}}$ .

Следовательно,

$$V_{\text{возд. общ.}} = V_{\text{возд.}} + V_{\text{изб.}}$$

В расчетах избыток воздуха при горении учитывается введением коэффициента избытка воздуха, обозначаемый  $\alpha$ . Этот коэффициент показывает, во сколько раз объем поступившего в зону реакции воздуха больше теоретически рассчитанного его количества, т.е.

$$\alpha = V_{\text{возд. общ.}} / V_{\text{возд.}}$$

Избыточный объем воздуха можно рассчитать по формуле

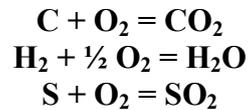
$$V_{\text{изб.}} = V_{\text{возд.}} \cdot (\alpha - 1)$$

Общее количество воздуха, необходимого для сгорания вещества можно рассчитать по формуле:

$$V_{\text{возд. общ.}} = \alpha \cdot V_{\text{г.г.}} \cdot \beta \cdot 4,76$$

**Расчет воздуха для горения топлив (горючих смесей)**

При расчете воздуха для горения смесей веществ используется несколько другая методика. На основании элементного состава топлива составляют уравнения горения компонентов топлива в кислороде и рассчитывают массовые соотношения реагирующих веществ. Поскольку основными горючими компонентами являются углерод, водород и сера, уравнения горения будут иметь вид:



На основании первого уравнения видно, что для сгорания 12 г углерода требуется 32 г кислорода. Это соотношение масс взаимодействующих веществ позволяет утверждать, что для сгорания 12 кг углерода потребуется, соответственно, 32 кг кислорода. Следовательно, если рассчитывать процесс горения 1 кг топлива, то для сгорания 0,01 кг углерода (1% по массе) кислорода потребуется  $0,01 \cdot 32 / 12 = 0,0267$  кг. Аналогичные рассуждения на основании уравнений горения можно провести для водорода и серы: количество кислорода, требуемого для сгорания 1 % (по массе) водорода будет  $0,01 \cdot 16 / 2 = 0,08$  кг; для сгорания 1 % (по массе) серы –  $0,01 \cdot 32 / 32 = 0,01$  кг. Используя приведенные расчеты, можно получить зависимость, показывающую, какое количество кислорода будет необходимо для сгорания вещества сложного состава, содержащего углерод, водород и серу. Данная зависимость будет иметь вид:

$$m_{\text{O}} = 0,0267 \cdot [\text{C}] + 0,08 \cdot [\text{H}] + 0,01 \cdot [\text{S}],$$

где в квадратных скобках указаны концентрации (масс. %) соответствующих компонентов в составе горючего вещества. С точки зрения элементного состава топлива рассматривается рабочая масса топлива.

Если в состав горючего сложного вещества входит кислород, он также участвует в процессе горения в качестве окислителя и расчетная формула принимает вид:

$$m_{\text{O}} = 0,0267 \cdot [\text{C}] + 0,08 \cdot [\text{H}] + 0,01 \cdot [\text{S}] - 0,01 \cdot [\text{O}],$$

Так как обычно процессы горения протекают в воздухе, кислорода в качестве окислителя потребуется в 77/23 раз больше. Масса воздуха, требуемого для сгорания 1 кг вещества при н.у.:

$$L_{\text{T}}^{\text{возд}} = \frac{0,0267 \cdot [\text{C}] + 0,08 \cdot [\text{H}] + 0,01 \cdot [\text{S}] - 0,01 \cdot [\text{O}]}{0,23}$$

В числителе представлен элементарный состав топлива в пересчете на рабочую массу, %.

При н.у. плотность воздуха составляет  $1,293 \text{ кг/м}^3$ , т.е. объемный расход воздуха ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ), необходимый для сгорания 1 кг топлива, определяется следующим образом:

$$V_{\text{T}}^{\text{возд}} = L_{\text{T}} / 1,293$$

или

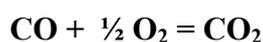
$$V_{\text{T}}^{\text{возд}} = 0,0898 \cdot \text{C}^{\text{P}} + 0,269 \cdot \text{H}^{\text{P}} + 0,033 \cdot (\text{S}^{\text{P}} - \text{O}^{\text{P}})$$

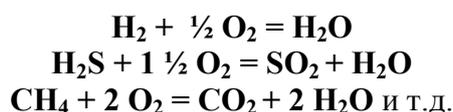
Если в состав топлива входят другие горючие компоненты (например, фосфор), в состав полученных зависимостей вводятся соответствующие компоненты, полученные на основании уравнений горения. Следует обратить внимание, что все расчеты ведутся по рабочей массе топлива. Если для расчета приведена иная масса, требуется выполнить соответствующий пересчет заданной массы на рабочую.

**Действительное** (или общее) **количество воздуха**, необходимое для сгорания 1 кг топлива, определяется с учетом избытка воздуха ( $\alpha$ ):

$$V_{\text{д}} = \alpha V_{\text{T}}^{\text{возд}}$$

Для газообразного топлива теоретически необходимое для сгорания  $1 \text{ м}^3$  газа количество воздуха,  $\text{м}^3$ , определяется также на основании уравнений горения входящих в состав газообразного вещества компонентов:





Таким образом, общее количество кислорода, необходимое для сгорания 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива, составит

$$V_{\text{T}} = 0,01[0,5 \text{CO}^{\text{T}} + 0,5 \text{H}_2^{\text{T}} + 1,5 \text{H}_2\text{S}^{\text{T}} + 2,0 \text{CH}_4^{\text{T}} + \Sigma(m + n/4) \text{C}_m\text{H}_n^{\text{T}} - \text{O}_2^{\text{T}}]$$

и с учетом того, что кислорода в воздухе содержится 21 %, последняя формула примет вид:

$$V_{\text{T}}^{\text{возд}} = 0,0476 \cdot (0,5\text{CO}^{\text{T}} + 0,5\text{H}_2^{\text{T}} + 1,5\text{H}_2\text{S}^{\text{T}} + 2,0\text{CH}_4^{\text{T}} + \Sigma(m + n/4)\text{C}_m\text{H}_n^{\text{T}} - \text{O}_2^{\text{T}})$$

где  $\text{CO}^{\text{T}}$ ,  $\text{H}_2^{\text{T}}$  и т.д. – содержание газов в газообразном топливе в объемных процентах; а  $\text{C}_m\text{H}_n$  – непредельные углеводороды.

### Продукты сгорания

Продукты сгорания – это вещества, которые образуются в процессе горения при соединении горючего вещества с кислородом воздуха. Они могут быть жидкими, твердыми или газообразными.

Состав продуктов сгорания зависит от состава исходной горючей смеси и условий горения, в том числе – от количества окислителя.

Если в процессе горения количество окислителя достаточное или окислитель находится в избытке, температура горения высокая и доступ окислителя в зону горения организован хорошо, происходит полное сгорание. При недостаточном количестве окислителя или низкой температуре сгорание будет неполным.

Если при расчете продуктов сгорания учитывают количество паров воды, говорят о влажных продуктах сгорания. Если образовавшиеся пары воды не учитывают – о сухом сгорании.

При горении органических веществ, в составе которых основное содержание занимает углерод и другие горючие элементы, характерные для органических веществ (водород, сера, фосфор), продукты сгорания известны: углекислый газ (при неполном сгорании – угарный газ или углерод), оксиды серы, фосфора и т.п. В некоторых случаях возможно сгорание неорганических веществ. Часть их выделяется с продуктами сгорания в виде оксидов (оксиды кальция, магния), некоторые поднимаются в воздух в дисперсном состоянии, образуя дым. Большинство металлов в продуктах сгорания находится в расплавленном состоянии. Дым рассматривается как дисперсная система, в состав которой в качестве дисперсной фазы входят твердые частицы оксидов или продукты термоокислительной реакции, дисперсионной средой является воздух. Продукты термоокислительной реакции образуются либо перед факелом пламени, либо в верхних уровнях помещений, то есть там, где температура максимальна.

Исследования показывают, что в ходе термоокислительных реакций при наличии гидроксидов в составе горючих смесей образуется вода. При горении органических веществ продуктами термоокислительных реакций становятся углеводороды, альдегиды, кетоны, органические кислоты различного состава.

При достаточно высоких температурах и определенном составе горючих веществ, продуктами термоокислительных реакций могут быть хлороводород, циановодород, оксиды азота и серы различного состава.

В связи с тем, что продукты сгорания, как правило, токсичны, при тушении пожаров применяются соответствующие меры безопасности.

В зависимости от состава горючих веществ (индивидуальное вещество или смесь веществ) расчет продуктов сгорания проводят по разным методикам. При необходимости рассчитывают процентный состав отдельных веществ в составе продуктов сгорания.

Расчет продуктов сгорания индивидуальных веществ ведется на основании уравнений горения. При расчете объемов продуктов сгорания также учитывают условия, при которых происходит процесс горения (давление, температура).

Если горение происходит в нормальных условиях, объем продуктов сгорания определяется по формуле:

$$V_{\text{пр.сг.}} = [v(\text{CO}_2) + v(\text{H}_2\text{O}) + v(\text{i}) + v(\text{N}_2)] \cdot 22,4, \text{ л}$$

где  $v(\text{CO}_2)$ ,  $v(\text{H}_2\text{O})$ ,  $v(\text{N}_2)$  – количество вещества продуктов сгорания (углекислого газа, воды и азота соответственно);

$v(\text{i})$  – количество вещества других продуктов сгорания, зависящее от состава горючего вещества (оксиды серы, фосфора и т.п.);

22,4 л – объем, занимаемый 1 молеи газа при нормальных условиях.

Если горение происходит в условиях, отличных от нормальных, производят перерасчет объема 1 моля газа для заданных условий следующим образом:

$$V_t = [22,4 \cdot p_0 \cdot (273 + t)] / [p \cdot t_0], \text{ л}$$

где 22,4 л – объем 1 моля газа при н.у.;

$p_0$  – 101,3 кПа (или 760 мм рт. ст.) – давление при нормальных условиях;

273 – температура при нормальных условиях (по шкале Кельвина);

$t$  – температура, при которой происходит горение (по шкале Цельсия);

$p$  – давление, при котором происходит горение (кПа или мм рт. ст.).

Если требуется рассчитать объем продуктов сгорания единицы массы горючего вещества, то полученный объем продуктов сгорания относят к массе горючего вещества:

$$V''_{\text{пр.сг.}} = V_{\text{пр.сг.}} / m_{\text{гор.в-ва}}$$

Все ранее рассчитанные объемы являются объемами влажных продуктов. В том случае, когда необходимо определить объем сухих продуктов сгорания, образующуюся воду в ранее приведенных уравнениях не учитывают.

$$V_{\text{пр.сг.сух.}} = [v(\text{CO}_2) + v(\text{i}) + v(\text{N}_2)] \cdot 22,4, \text{ л}$$

В том случае, когда процесс горения происходит в избытке воздуха и известен коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ , учитывают, что в продуктах сгорания присутствует кислород и дополнительное, по отношению к уравнению горения, количество азота. Учитываются эти компоненты следующим образом:

- количество кислорода в продуктах сгорания:

$$v(\text{O}_2) = \beta(\alpha - 1)$$

- избыточное количество азота в продуктах сгорания:

$$v(\text{N}_2) = 3,76 \cdot \beta(\alpha - 1)$$

Для расчета процентного состава продуктов сгорания удобнее использовать мольный, а не объемный состав. Для этого необходимо рассчитать суммарное количество вещества продуктов сгорания, к которому относят количество искомого вещества.

Все расчеты продуктов сгорания газообразных, жидких и твердых веществ проводят аналогичным способом.

Для проведения расчетов продуктов сгорания смесей необходимо знать их состав.

В первую очередь составляются уравнения реакций горения всех компонентов смеси на воздухе. По уравнениям определяется количественный и качественный состав продуктов сгорания смеси. Полученные данные удобнее сводить в таблицу, которую в дальнейшем используют для расчетов. Среди техногенных горючих газообразных веществ наиболее часто используются (горят в производственных условиях и в быту) следующие:

- водород	$\text{H}_2 + 0,5(\text{O}_2 + 3,76 \text{ N}_2) = \text{H}_2\text{O} + 1,88\text{N}_2$
- угарный газ	$\text{CO} + 0,5(\text{O}_2 + 3,76 \text{ N}_2) = \text{CO}_2 + 1,88\text{N}_2$
- метан	$\text{CH}_4 + 2(\text{O}_2 + 3,76 \text{ N}_2) = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 7,52\text{N}_2$
- ацетилен	$\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5(\text{O}_2 + 3,76 \text{ N}_2) = 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 9,4\text{N}_2$
- этилен	$\text{C}_2\text{H}_4 + 3(\text{O}_2 + 3,76 \text{ N}_2) = 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 11,28\text{N}_2$
- этан	$\text{C}_2\text{H}_6 + 3,5(\text{O}_2 + 3,76 \text{ N}_2) = 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} + 13,16\text{N}_2$
- пропан	$\text{C}_3\text{H}_8 + 5(\text{O}_2 + 3,76 \text{ N}_2) = 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O} + 18,8\text{N}_2$
- сероводород	$\text{H}_2\text{S} + 1,5(\text{O}_2 + 3,76 \text{ N}_2) = \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 5,64\text{N}_2$

Таблица 5 составлена на основании данных уравнений горения, приведенных выше. Если в состав смеси входят другие вещества, уравнения горения пишутся аналогичным образом, и данные по ним также включаются в таблицу. Для продуктов сгорания, если они отличаются от приведенных (оксиды азота, фосфора, галогеноводороды), добавляются столбцы.

Так как для газообразных веществ отношение количеств молекул (молей) веществ равно отношению их объемов (по следствию из закона Авогадро), приведенные в таблице данные можно рассматривать как объемы в кубометрах продуктов сгорания 1 м<sup>3</sup> горючей смеси.

Расчет объема (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>), занимаемого продуктами сгорания 1 м<sup>3</sup> горючей газообразной смеси, производится суммированием по столбцам каждого продукта с учетом массовой доли горючего вещества, образующего данный продукт реакции. При необходимости производится пересчет на заданные условия (давление, температура).

Для расчета объема продуктов сгорания заданного количества горючей газообразной смеси полученный ранее объем умножают на объем горючей смеси.

Таблица 5.  
Компоненты горючей газообразной смеси и продукты их сгорания (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>)

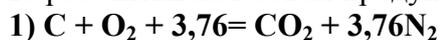
Продукты сгор. Компо- ненты смеси	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
H <sub>2</sub> – водород	–	1,0	1,88	–	–
CO – угарный газ	1,0	–	1,88	–	–
CH <sub>4</sub> – метан	1,0	2,0	7,52	–	–
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> – ацетилен	2,0	1,0	9,4	–	–
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> – этилен	2,0	2,0	11,28	–	–
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> – этан	2,0	3,0	13,16	–	–
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> – пропан	3,0	4,0	18,8	–	–
H <sub>2</sub> S – сероводород	–	1,0	5,64	–	1,0
ИТОГО					

Для расчета продуктов сгорания жидких и твердых топлив необходимо знать их элементный состав. Обычно жидкие и твердые топлива состоят из углерода, водорода, азота, серы, фосфора. Также в составе топлив могут быть и другие горючие либо негорючие примеси, которые учитываются отдельно.

Расчет, как правило, производится в 2 стадии, как и для газообразных топлив. На первой стадии определяют объем продуктов сгорания единицы массы (1 кг) топлива. На второй – рассчитывают объем продуктов сгорания заданной массы топлива.

Объем продуктов сгорания единицы массы топлива находят следующим образом:

На основании уравнений горения в воздухе компонентов заданного элементного состава рассчитывают объем продуктов сгорания, отнесенный к н.у.



При сгорании 12 г (кг) углерода образуется 22,4 л (м<sup>3</sup>) углекислого газа и 3,76 л (м<sup>3</sup>) азота. Следовательно, при сгорании 1 кг углерода образуется углекислого газа и азота соответственно:

$$V(\text{CO}_2) = 1 \cdot 22,4 / 12 = 1,86 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V(\text{N}_2) = 3,76 \cdot 22,4 / 12 = 7,02 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Объем остальных продуктов сгорания рассчитывается аналогично.



$$V(\text{H}_2\text{O}) = 1 \cdot 22,4 / 2 = 11,2 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V(\text{N}_2) = 1,88 \cdot 22,4 / 2 = 21,06 \text{ м}^3/\text{кг}$$



$$V(\text{SO}_2) = 1 \cdot 22,4 / 32 = 0,7 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V(\text{N}_2) = 3,76 \cdot 22,4 / 32 = 2,63 \text{ м}^3/\text{кг}$$



$$V(P_2O_5) = 0,5 \cdot 22,4 / 31 = 0,36 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V(N_2) = 4,7 \cdot 22,4 / 31 = 3,4 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Подобные расчеты производят для всех горючих компонентов топлива.

Следует также учитывать, что в состав жидких и твердых топлив могут входить азот, кислород, влага и другие компоненты. Азот и влага будут удаляться вместе с продуктами горения. Кислород, входящий в состав топлива, будет расходоваться на горение, и, следовательно, воздуха потребуется меньше. Вклад указанных компонентов в продукты сгорания учитывается на основании того объема, который будет занимать 1 кг каждого компонента:

**5) Азот** в составе топлива ( $M = 28$  г/моль)

$$V(N_2) = 1 \cdot 22,4 / 28 = 0,8 \text{ м}^3/\text{кг}$$

**6) Вода** в составе топлива ( $M = 18$  г/моль)

$$V(H_2O) = 1 \cdot 22,4 / 18 = 1,24 \text{ м}^3/\text{кг}$$

**7) Кислород** в составе топлива ( $M = 32$  г/моль), участвующий в процессе горения, позволяет уменьшить количество воздуха. Затраченного на этот процесс, а, следовательно, – количество азота.

Поскольку в воздухе на каждый моль (по объему) кислорода приходится 3,76 моль азота, то на 1 кг кислорода азота будет приходиться

$$V(N_2) = 3,76 \cdot 22,4 / 32 = 2,63 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Следовательно, каждый кг кислорода в составе топлива будет уменьшать количество азота в продуктах сгорания на  $2,63 \text{ м}^3$ .

Таблица 6.

Элементный состав и продукты сгорания ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ) жидких и твердых топлив

Продукты сгор. Компо- ненты смеси	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
H – водород	–	11,2	21,0	–	–	–
C – углерод	1,86	–	7,0	–	–	–
S – сера	–	–	2,63	–	0,7	–
P – фосфор	–	–	3,4	–	–	0,36
N – азот	–	–	0,8	–	–	–
W – влага	–	1,24	–	–	–	–
O – кислород (уменьшение объема азота)	–	–	<b>-2,63</b>	–	–	–
ИТОГО						

Полученные данные для удобства дальнейших расчетов заносят в таблицу (табл. 6), на основании которой и производится пересчет продуктов сгорания на заданный элементный состав топлива. Расчет объема ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ), занимаемого продуктами сгорания единицы массы и заданной массы жидкого/твердого топлива с учетом условий горения производится аналогично газообразному топливу.

### ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

Для расчета количества теплоты, выделяющейся в процессе горения, пользуются следствием из закона Гесса (для индивидуальных веществ) или формулами Д.И. Менделеева (для веществ сложного состава). *Теплотой сгорания вещества* называется количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании единицы топлива. В теории горения также исполь-

зуется понятие теплоты горения, значение которой находится как сумма энтальпий продуктов реакции с учетом стехиометрических коэффициентов.

Расчет теплоты сгорания индивидуальных веществ производится на основании уравнения горения. Под теплотой сгорания понимают энтальпию химической реакции горения. Поскольку "энтальпия химической реакции равна сумме энтальпий образования продуктов реакции за вычетом сумм энтальпий образования исходных веществ с учетом их стехиометрических коэффициентов", расчет теплоты сгорания производят по формуле:

$$\Delta H_{\text{х.р.}} = \sum(k_i \Delta H_i)_{\text{прод.}} - \sum(k_i \Delta H_i)_{\text{исх.}}$$

где  $k_{i,j}$  – стехиометрические коэффициенты перед соответствующими компонентами в уравнении реакции горения;

$\Delta H_{\text{ипрод}}$  – теплота образования соответствующего продукта реакции, кДж/моль;

$\Delta H_{\text{исх.}}$  – теплота образования исходного горючего вещества, кДж/моль.

Как правило, в приведенном уравнении исходные компоненты представлены только одним горючим веществом (причем в количестве 1 моль), т.к. энтальпия (теплота) образования простых веществ, из которых состоит воздух, равна 0.

Для горючих смесей и топлив теплота сгорания рассчитывается на основании содержания компонентов горючего вещества. Для твердых и жидких топлив за расчетную единицу принимают 1 кг, для газообразных – 1 м<sup>3</sup>.

Различают высшую и низшую теплоту сгорания топлива. *Высшей* теплотой сгорания топлива ( $Q_v$ ) называют количество тепла, выделяющееся при полном сгорании единицы топлива при условии, что весь содержащийся в составе топлива водород сгорает с образованием жидкой воды. *Низшей* теплотой сгорания топлива ( $Q_n$ ) называют количество тепла, выделяющееся при полном сгорании единицы топлива при условии, что весь содержащийся в составе топлива водород сгорает до образования водяного пара и испарения влаги горючего вещества.

Формулы Менделеева используются для определения теплот сгорания жидкого и твердого топлив и имеют вид:

$$Q_n = 338 \cdot [C] + 1025 \cdot [H] - 108,5 \cdot ([O] - [S]) - 25W, \text{ кДж}$$

$$Q_v - Q_n = 224 \cdot [H] + 25 \cdot W, \text{ кДж}$$

В квадратных скобках указан процентный состав соответствующего компонента смеси.

Для газообразных веществ расчет низшей теплоты сгорания производится по формуле:

$$Q_n = 0,108 \cdot [H_2] + 0,126 \cdot [CO] + 0,234 \cdot [H_2S] + 0,358 \cdot [CH_4] + 0,638 \cdot [C_2H_6] + \\ + 0,913 \cdot [C_3H_8] + 1,187 \cdot [C_4H_{10}] + 1,461 \cdot [C_5H_{12}] + 0,591 \cdot [C_2H_4] + 0,86 \cdot [C_3H_6] + \\ + 1,135 \cdot [C_4H_8], \text{ МДж/м}^3.$$

#### Расчет температуры горения веществ

Под температурой горения понимают температуру, до которой нагреваются продукты сгорания. Тепло, выделяющееся в процессе горения, расходуется на нагревание горючего вещества, воздуха в зоне горения и различных конструкций. При достижении высоких температур (выше 1700 °С, обычно – при ламинарном процессе) в зоне горения происходит диссоциация продуктов сгорания. Диссоциация продуктов сгорания – процесс эндотермический, поэтому часть тепла расходуется на этот процесс. Примерами такой диссоциации могут быть:



Принято рассматривать следующие виды температур:

- теоретическая температура горения – это температура, характеризующая горение с учетом тепла, поглощенного в результате диссоциации продуктов сгорания;
- калориметрическая (адиабатическая) температура горения – это температура нагревания продуктов полного сгорания без учета потерь тепла на нагрев окружающей среды и конструкций. При определении калориметрической температуры горения предполагают, что

коэффициент избытка воздуха равен 1, а начальная температура воздуха и горючих веществ составляет 0 °С;

- действительная температура горения (температура пожара) – это температура, которая наблюдается в зоне горения. Действительная температура среди перечисленных имеет самые низкие значения и зависит от условий горения. Различают температуру внутреннего и наружного пожара. Температура внутреннего пожара – температура дыма в помещении, температура наружного пожара – температура пламени. Действительную температуру пожара определяют опытным путем, и ее значение зависит от удельного количества горючего вещества и продолжительности пожара.

Для оценки условий пожара обычно используют калориметрическую и действительную температуру горения.

При расчете температуры горения предполагают, что низшая теплота горения равна энергии, необходимой для нагревания продуктов сгорания от 0 °С до температуры горения. Эту энергию называют теплосодержанием и обозначают  $Q_{\Gamma}$ . Для индивидуальных веществ

$$\Delta H_{\text{х.р.}} = Q_{\Gamma} = v_{\text{пр.сгор.}} \cdot C_{\text{р пр.сгор.}} \cdot t_{\Gamma}$$

для сложных веществ

$$\Delta H_{\text{х.р.}} = Q_{\Gamma} = V_{\text{пр.сгор.}} \cdot C_{\text{р пр.сгор.}} \cdot t_{\Gamma}$$

где  $v_{\text{пр.сгор.}}$  – удельное количество продукта сгорания, моль/кг;

$V_{\text{пр.сгор.}}$  – удельный объем продукта сгорания, м<sup>3</sup>/кг;

$C_{\text{р пр.сгор.}}$  – средняя объемная теплоемкость продукта сгорания, кДж/м<sup>3</sup>;

$t_{\Gamma}$  – определяемая температура горения, °С.

Так как в состав продуктов сгорания входит обычно более одного вещества, общее теплосодержание находят как сумму теплосодержаний всех продуктов сгорания (углекислый газ, вода, азот, др. газы). Температура горения рассчитывается методом последовательных приближений

### Оценка пожарной опасности веществ и материалов

Пожар – неконтролируемое горение вне специального очага, наносящее материальный ущерб.

Пожарная опасность – возможность возникновения и развития пожара, заключенная в веществе, состоянии или процессе.



Горючими называются вещества, способные самостоятельно гореть после удаления источника зажигания. Они подразделяются на

- легковоспламеняющиеся вещества;
- трудновоспламеняющиеся вещества, т.е. вещества, способные гореть только при наличии мощного источника зажигания.

Трудногорючие вещества способны гореть под воздействием источника зажигания, но не способны к поддержанию самостоятельного горения. Выделяют 3 группы трудногорючих веществ:

1. Вещества, горение которых происходит при температурах, близких к температурам самовоспламенения.
2. Вещества, имеющие определенную область зажигания при температурах, до которых возможен их нагрев в производстве или имеющие температуру вспышки в закрытом тигле.
3. Вещества, выделяющие пары или газы, обладающие способностью воспламенения в воздухе.

Негорючие вещества – это вещества, которые не горят в атмосферном воздухе. Их рассматривают как пожароопасные вещества. К негорючим веществам относятся:

- вещества, которые выделяют горючие вещества или тепло при взаимодействии с другими веществами: натрий, карбид кальция и негашеная известь при взаимодействии с водой; разбавленные кислоты при взаимодействии с металлами и др.;
- сильные окислители: перманганат калия, сжатый и жидкий кислород, перекись водорода, азотная кислота и др.
- вещества, самовозгорающиеся на воздухе: белый фосфор и проч.

Для характеристики пожарной опасности веществ необходимо определение ряда параметров, на основании которых выносится требуемое заключение. Параметры, определение которых необходимо для оценки пожарной опасности различных веществ, представлены в таблицах 7 и 8.

Таблица 7

## Критерии пожарной опасности основных горючих веществ

Газы	Жидкости	Твердые вещества
Температура самовоспламенения	Температура самовоспламенения	Температура самовоспламенения
Область воспламенения в воздухе	Температурные пределы воспламенения паров в воздухе	
Максимальное давление взрыва	Температура вспышки	
Категория взрывоопасной смеси	Группа горючести	Группа горючести
Минимальная энергия зажигания	Температура воспламенения	Температура воспламенения
Минимальное взрывоопасное содержание кислорода		
Нормальная скорость горения	Скорость выгорания	
Критический (гасящий) диаметр		
Характер взаимодействия вещества с водопенными средствами тушения	Характер взаимодействия вещества с огнетушащими средствами тушения	Характер взаимодействия вещества с огнетушащими средствами тушения

Таблица 8

## Дополнительные критерии пожарной опасности горючих веществ

ЛВЖ	Твердые вещества с $t_{пл}$ ниже 300 °С	Пористые, волокнистые, сыпучие материалы	Порошкообразные или образующие пыль вещества
<i>Дополнительно к параметрам, определяемым для жидкостей</i>	<i>Дополнительно к параметрам, определяемым для твердых веществ</i>	<i>Дополнительно к параметрам, определяемым для твердых веществ</i>	<i>Дополнительно к параметрам, определяемым для твердых веществ</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Область воспламенения в воздухе	Температурные пределы воспламенения паров в воздухе	Температурные условия теплового самовозгорания	Нижний предел воспламенения аэрозвеси
Максимальное давление взрыва	Температура вспышки	Температура самонагрева	Максимальное давление взрыва
Категория взрывоопасной смеси		Температура тления при самовозгорании	

1	2	3	4
Минимальная энергия зажигания			Минимальная энергия зажигания
Минимальное взрывоопасное содержание кислорода			Минимальное взрывное содержание кислорода
Нормальная скорость горения			
Критический (гасящий) диаметр			

### Пределы воспламенения веществ в различных агрегатных состояниях

К температурным показателям пожарной опасности относятся температурные пределы распространения пламени (нижний  $T_H$  и верхний  $T_B$ , температура вспышки в закрытом  $T_{BC}^3$  и открытом  $T_{BC}^0$  приборах, температура воспламенения  $T_{ВП}$ , температура самовоспламенения  $T_{СВ}$ , температура зажигания  $T_3$ , температура горения  $T_G$ . В порядке возрастания они могут быть расположены в виде ряда:

$$T_H \leq T_{BC}^3 < T_{BC}^0 < T_{ВП} < T_{СВ} < T_3 < T_G$$

Нижний (верхний) температурный предел воспламенения – температура жидкости, при которой концентрация насыщенных паров равна нижнему (верхнему) концентрационному пределу распространения пламени.

Существует несколько полуэмпирических методов расчета температурных пределов распространения пламени, однако они мало отличаются друг от друга по точности.

Температурные пределы воспламенения (ТПВ) жидкостей рассчитывают по температуре кипения

$$t_{H(B)} = k \cdot t_{кип} - l$$

где  $t_{H(B)}$  - нижний (верхний) температурный предел воспламенения;

$t_{кип}$  – температура кипения, 0С;

$k, l$  – константы для определенных групп (гомологических рядов) жидкостей.

Температурные пределы воспламенения могут быть определены по известным значениям концентрационных пределов

$$P_{H(B)} = \varphi_{H(B)} \cdot P_0 / 100$$

где  $P_{H(B)}$  – давление насыщенного пара, соответствующее нижнему (верхнему) концентрационному пределу воспламенения;

$\varphi_{H(B)}$  – нижний (верхний) концентрационный предел воспламенения;

$P_0$  – атмосферное давление.

Количественными характеристиками процессов воспламенения и горения газовых смесей являются:

- температура самовоспламенения.
- минимальная энергия зажигания,
- концентрационные пределы распространения пламени.
- нормальная скорость горения (нормальная скорость распространения пламени),
- минимальное взрывоопасное содержание кислорода,
- флегматизирующие концентрации инертных разбавителей,
- максимальное давление взрыва.

Теория распространения пламени в газовых смесях говорит о том, что скорость распространения пламени зависит от его температуры. Температура пламени определяется соста-

вом горючей смеси. Максимальная температура реализуется в смесях стехиометрического состава.

Горючее вещество, находящееся в газообразном состоянии и способное легко испаряться, представляет опасность, так как оно способно к воспламенению при наличии источника зажигания. Но такое воспламенение возможно только при определенных условиях.

Для концентраций горючего в смеси, отличных от стехиометрического, температура пламени снижается. Снижение температуры приводит к уменьшению скорости химических реакций в пламени. И, как следует из теории, при снижении температуры пламени на величину

$$\frac{RT_{теор}^2}{E}$$

где  $T_{теор}$  – теоретическая температура горения;  
 $E$  – энергия активации химической реакции;  
 $R$  – универсальная газовая постоянная

Способность вещества, находящегося в газо- или парообразном состоянии, к воспламенению характеризуют с помощью концентрационных пределов распространения пламени, которые в литературе часто называют концентрационными пределами воспламенения (КПВ). Концентрационные пределы воспламенения характеризуют способность газо- и паровоздушных смесей к кинетическому горению. КПВ являются важнейшими показателями пожарной опасности веществ и подлежат обязательному определению.

Выделяют два концентрационных предела воспламенения – нижний и верхний. Под **нижним пределом** ( $\varphi_n$ ) воспламенения понимают минимальную концентрацию горючего (газо- или парообразного) вещества в смеси с воздухом, при которой возможно не только воспламенение смеси, но и распространение процесса горения на весь объем. Процесс воспламенения должен быть инициирован с помощью источника зажигания. Под **верхним пределом** ( $\varphi_v$ ) понимают максимальную концентрацию горючего вещества (все условия процесса воспламенения сохраняются). КПВ измеряются в об. % или г/м<sup>3</sup>.

Концентрация веществ ниже нижнего КПВ и выше верхнего КПВ является безопасной при проведении различных работ, связанных с использованием открытого пламени или искрообразованием. В производственных помещениях различного рода определение безопасной концентрации веществ осуществляется не непосредственно на основании КПВ, а с учетом коэффициентов безопасности:

$$\begin{aligned} \varphi_{без} &\leq k_{без} \cdot \varphi_n \\ \varphi_{без} &\geq k_{без} \cdot \varphi_v \end{aligned}$$

Взрывобезопасная ПДК газо- и парообразных смесей в помещениях и аппаратах принимается равной 10 % от  $\varphi_n$ . При ведении ремонтных работ с использованием открытого огня или при искрообразовании ПДК взрывобезопасная принимается равной 5 % от  $\varphi_n$ .

Существует несколько способов определения КПВ:

Для газоздушных смесей НКПВ определяют по предельной теплоте сгорания. Установлено, что 1 м<sup>3</sup> различных газоздушных смесей на нижнем пределе выделяет при горении постоянное среднее количество тепла, равное 1830 кДж и называемое предельной теплотой горения. Следовательно,

$$\varphi_n = \frac{Q_{пр} \cdot 100}{Q_n},$$

Если принять  $Q_{пр} = 1830$  кДж, получим

$$\varphi_n = \frac{1830 \cdot 100}{Q_n}$$

Для парообразных смесей (пары жидких и твердых веществ) концентрационные пределы рассчитывают на основании температурных пределов воспламенения

$$\varphi_{н(в)} = \frac{p_{н(в)} 100}{p_0},$$

где  $p_{н(в)}$  – давление насыщенного пара вещества при температуре, соответствующей нижнему (верхнему) пределу воспламенения, Па; определяется по уравнению Антуана;

$p_0$  – давление окружающей среды, Па.

Существуют и другие способы расчета концентрационных пределов воспламенения, основанные на количественном и качественном составе горючего вещества.

Оценочный расчет концентрационных пределов воспламенения для горючих веществ нормального строения производится на основании следующей аппроксимационной формулы:

$$\varphi_n^0 = \frac{100}{a \cdot \beta + b}, \text{ об. \%}$$

Эмпирические константы  $a$  и  $b$  определяются по табл. 9.

Таблица 9.  
Константы для определения КПВ

Область применения	$a$	$b$
Расчет нижнего КПВ $\varphi_n^0$	8,684	4,679
Расчет верхнего КПВ $\varphi_v^0$		
при $\beta \leq 7,5$	1,55	0,56
при $\beta > 7,5$	0,768	6,554

Пределы распространения пламени обычно измеряют в воздухе нормального состава, содержащего около 21% об. кислорода и 78% об. азота. В соответствии с теоретическими представлениями при введении в парогазовоздушную смесь негорючих газов или химически активных ингибиторов концентрационная область распространения пламени сужается: верхний предел понижается, нижний – возрастает (рис. 13.1). Изменение концентрационных пределов зависит от природы и концентрации негорючего вещества, используемого в качестве флегматизатора. **Флегматизаторами** называют вещества, снижающие восприимчивость горючих составов к внешнему воздействию.

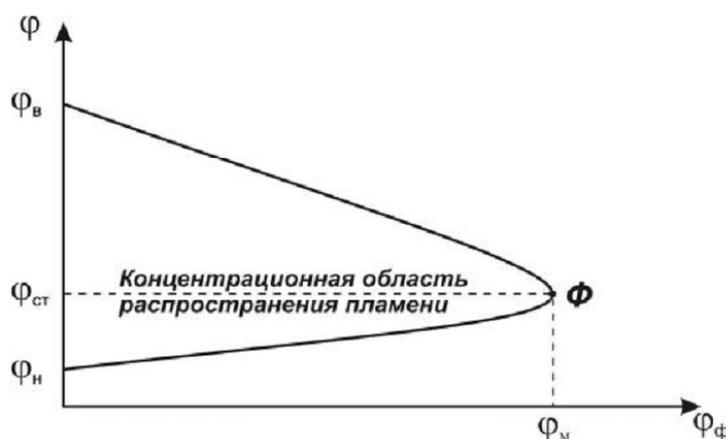


Рисунок 1. Влияние флегматизаторов на концентрационные пределы:

$\Phi$  - точка флегматизации;  $\varphi_m$  – минимальная флегматизирующая концентрация (МФК).

При введении некоторого количества флегматизатора пределы смыкаются, образуя точку флегматизации – предельную по горючести смесь, которая также называется экстремальной точкой области распространения пламени. Такая концентрация инертного газа или химически активного ингибитора называется минимальной флегматизирующей концентрацией (используется при расчетах безопасных составов газовых и пылегазовых смесей). В

сущности, – это минимальное количество флегматизатора, которое необходимо ввести в газозоудную смесь стехиометрического состава, чтобы сделать ее негорючей. Речь идет о стехиометрической смеси, так как она наиболее пожаровзрывоопасна.

Концентрация кислорода в точке флегматизации называется минимальным взрывоопасным содержанием кислорода (МВСК). Минимальную флегматизирующую концентрацию можно рассчитать, если исходить из того, что адиабатическая температура горения смеси стехиометрического состава не может быть меньше 1500 К.

### Способы зажигания горючих смесей

Для воспламенения (возгорания) горючих веществ необходимо наличие источника возгорания. Источники воспламенения могут быть различными, как различно и их воздействие на горючую смесь

#### Искровое зажигание

Одним из источников воспламенения является электрическая искра, наличие которой инициирует в газовой смеси нестационарное самораспространяющееся пламя. Возможны два варианта поведения горючей смеси при искровом воспламенении:

- Возникает узкий очаг пламени, который быстро (практически мгновенно) развивается в самораспространяющееся пламя.
- Очаг пламени не приводит к образованию самораспространяющегося пламени, наблюдается только локальное распространение, после которого пламя охлаждается и гаснет – **отказ от зажигания**.

Характер искрового зажигания зависит от состава, температуры, давления, динамического состояния смеси, а в случае течения смеси – от параметров течения и от энергии электрической искры.

Процесс искрового зажигания длится с момента начала электрического разряда до установления устойчивого режима распространения пламени.

Фотоисследования показывают, что при реализации процесса искрового зажигания наблюдаются две проблемные стадии:

- формирование очага пламени при искровом разряде;
- неустойчивое распространение очага пламени.

Величиной, характеризующей успешность процесса искрового зажигания, считают произведение скорости горения ( $v_{гор}$ , см/с) на температуру пламени ( $T$ , К).

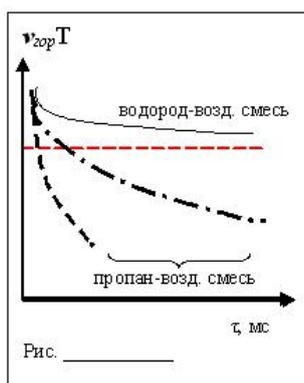
Проведение исследований водород-воздушной и пропан-воздушной смесей (рис. 2) показывает, что для успешной реализации процесса искрового зажигания  $v_{гор}T$  составляет  $10^5$  и  $9,8 \cdot 10^4$  (см/с)·К соответственно.

Для водород-воздушной смеси величина  $v_{гор}T$  асимптотически приближается к характерной для установившегося распространения пламени.

Для пропан-воздушной смеси величина  $v_{гор}T$  проходит минимум и предполагается, что в процессе зажигания скорость горения или температуры пламени (или обе величины) становятся меньше значений, необходимых для устойчивого распространения пламени. Поэтому в некоторых случаях происходит отказ зажигания (области ниже пунктирной линии).

На основании исследований можно сделать вывод о том, что для реализации успешного процесса зажигания интервал времени определяется в 1 миллисекунду.

В устройствах внутреннего сгорания время зажигания имеет длительность несколько мс, что усложняет картину зажигания, так как приводит к наложению процессов электрического разряда и роста очага пламени.



Исследования показывают, что немаловажную роль в процессе возгорания играет электрическая искра и ее свойства. *Электрическая искра* представляет собой электрический разряд в газовой среде и может быть двух типов: низкого и высокого напряжений.

Искра высокого напряжения пробивает промежуток заранее фиксированного размера. Ее называют просто *искрой*.

Низковольтная искра, называемая *электрической дугой*, образуется в точке разрыва цепи, когда при прерывании тока возникает самоиндукция.

В большинстве случаев в настоящее время используют искру высокого напряжения.

С точки зрения искрового зажигания рассматривают два типа электрической искры:

- *емкостная искра*, которая образуется благодаря выделению электростатической энергии, накопленной в конденсаторе;
- *индуктивная искра*, которая образуется благодаря электромагнитной энергии, накопленной в катушке индуктивности.

На эффективность искрового зажигания оказывает влияние охлаждающее действие электродов.

В реальных системах искрового зажигания генерируется напряжение определенной величины. При увеличении длины искрового промежутка необходимое для образования искры напряжение увеличивается и, в конце концов, разряд становится невозможным. Таким образом, длина искрового промежутка имеет *верхний предел*.

Но при уменьшении длины искрового промежутка возможно возникновение искры, которая не будет инициировать зажигание. То есть, имеется и нижний предел длины искрового промежутка. Этот предел называется *гасящим расстоянием*. Гасящее расстояние зависит от формы и размеров электродов: большое – для толстых и длинных; маленькое – для тонких. Гасящее расстояние также зависит от состава и вида газовой смеси.

Таким образом, состав газовой смеси и характеристики искры определяют *успешность искрового зажигания*. Для успешного зажигания необходимо, чтобы состав смеси не выходил за пределы воспламенения. При этом энергия искры должна превышать значение минимальной энергии зажигания.

По степени трудности зажигания принято характеризовать газовую смесь – воспламеняемостью, а искру – эффективностью зажигания.

Если состав горючей смеси изменяется, то минимальная энергия зажигания имеет минимум при определенном соотношении окислителя и горючего вещества, но ее значение возрастает по мере приближения к верхнему и нижнему пределам воспламенения.

Воспламеняемость горючей смеси зависит от температуры, давления, состояния смеси.

Чем выше энергия искры, тем зажигание успешнее.

В случае искрового зажигания потока газовой горючей смеси необходимо учитывать наличие или отсутствие турбулентности и скорость движения потока. Исследования Суэтта показывают, что при увеличении скорости потока для успешного зажигания требуется увеличение энергии искры.

При ламинарном течении воспламеняемость лучше, чем в случае неподвижной смеси.

Методы скоростной фотографии позволяют объяснить данную закономерность. В процессе воспламенения очаг пламени подвергается наиболее сильному охлаждающему влиянию электродов. С увеличением скорости потока очаг пламени отходит от зоны охлаждения, воспламеняемость возрастает и, начиная с некоторого расстояния от электродов, остается неизменной. При скоростях потока выше 2 м/с воспламеняемость становится постоянной.

При наличии турбулентности потери тепла очагом пламени затрудняют воспламеняемость, и с увеличением скорости потока ее величина уменьшается.

#### **Зажигание накаливаемой поверхностью**

Если горючая смесь соприкасается с накаливаемой металлической поверхностью или металлической проволокой, происходит зажигание. Такой процесс называется *зажиганием накаливаемой поверхностью*. Но этот процесс реализуется только при определенной температуре накаливаемой поверхности. Минимальная температура поверхности, при которой происхо-

дит зажигание горючей смеси, называется *температурой зажигания накалиной поверхностью*. Такая температура зажигания превышает температуру самовоспламенения.

Градиент температур в слое смеси, соприкасающейся с накалиной поверхностью, приводит к тому, что температура, близкая к температуре накалиной поверхности, возможна только в очень узком слое горючей смеси.

Тепло, выделяемое в ходе химической реакции вблизи накалиной поверхности, не способствует в значительной мере нагреву смеси, так как теплопередача из зоны химической реакции к металлу препятствует повышению температуры смеси.

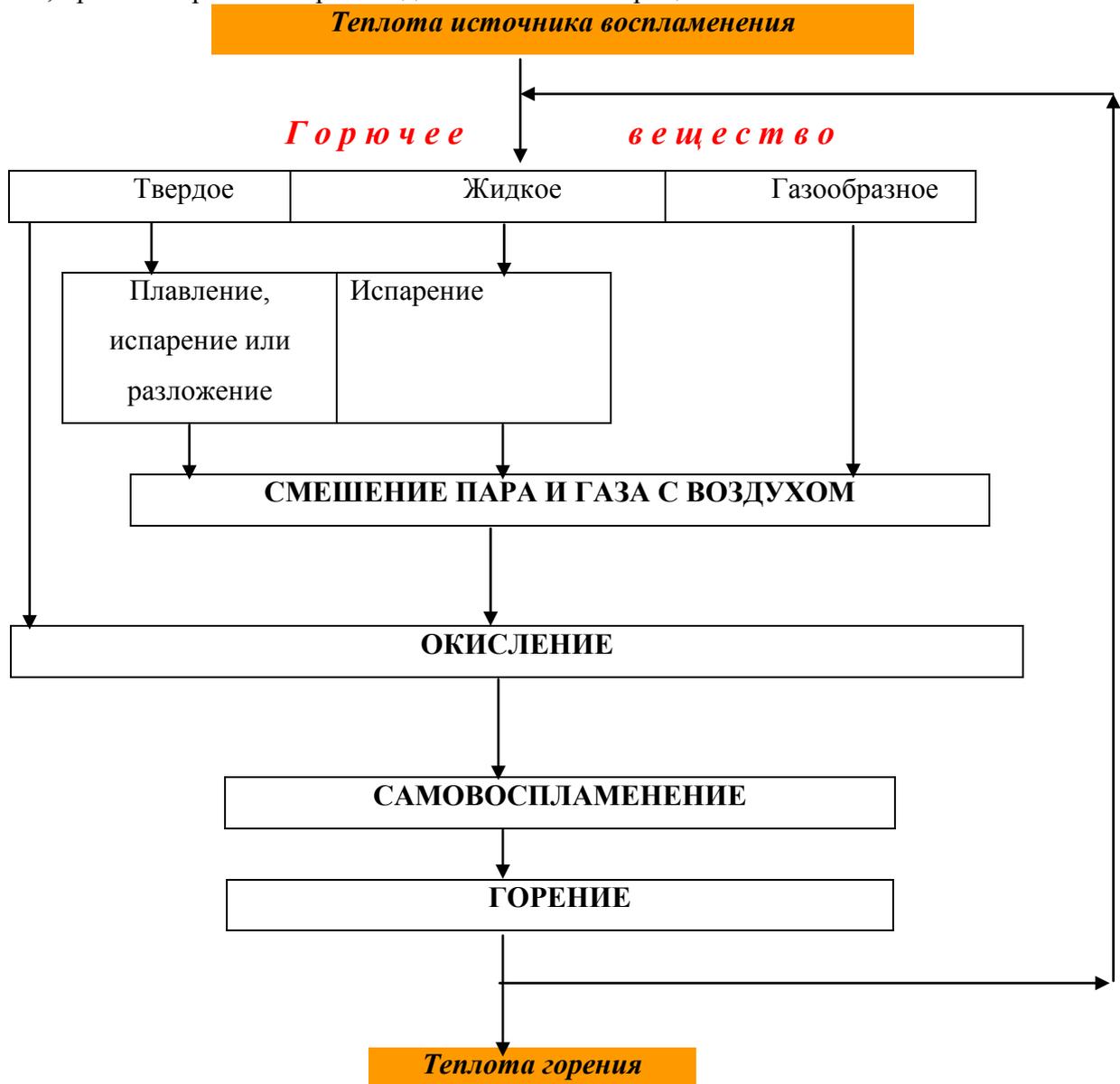
Чем меньше площадь накалиной поверхности, тем выше будет температура зажигания этой поверхностью.

Особенностью зажигания накалиной поверхностью является каталитическое действие этой поверхности. Это действие может приводить как к инициации, так и к затуханию очага пламени. Если в ходе цепной реакции происходит обрыв цепей, то необходимо повышение температуры накалиной поверхности. Если действие накалиной поверхности приводит к разветвлению цепной реакции, можно предполагать инициацию зажигания при значительно более низких температурах.

Температура зажигания накалиной поверхностью зависит от природы металла.

### Превращение горючих веществ при нагревании

Несмотря на то, что горючие вещества и их смеси могут различаться по составу и свойствам, при их нагревании происходят аналогичные процессы.



В зависимости от состава твердые горючие вещества могут при нагревании вести себя различно. Одни плавятся и испаряются (каучук, парафин, сера); другие – разлагаются с образованием газообразных продуктов и угля (бумага, древесина, каменный уголь). Существуют твердые вещества, которые при нагревании не плавятся и не разлагаются (кокс, антрацит, древесный уголь).

Горючие жидкости при достижении определенной температуры испаряются.

Таким образом, большинство горючих веществ при нагревании переходит в газообразное состояние. Взаимодействуя с воздухом, эти вещества образуют горючие смеси различного состава. Нагрев такой горючей смеси приводит к тому, что при определенной температуре  $T_{ок}$  в смеси начинается процесс окисления, сопровождающийся выделением тепла. Так как начальная скорость реакции окисления невелика (эта реакция протекает при достаточно низких температурах), большая часть тепла рассеивается в окружающую среду и самонагревание смеси практически не происходит.

При повышении температуры смеси увеличивается скорость окисления, тепло полностью не успевает отводиться в окружающую среду и начинается процесс самонагрева горючей смеси. При этом горючая смесь без внешнего источника нагревания может увеличивать свою температуру до температуры горения  $T_r$ . Это характеризуется появлением пламени с возникновением устойчивого процесса горения. Данный процесс может происходить вплоть до полного выгорания вещества.

Если твердые вещества при нагревании не образуют горючих газообразных смесей, реакция окисления будет протекать на их поверхности.

Тепло, которое выделяется при горении, расходуется на нагрев продуктов сгорания, остальное тепло идет на подготовку смеси к горению и на нагрев окружающей среды.

### **Типы пламен. Скорость горения**

Предварительное перемешивание или отсутствие этого явления определяют типы пламени. Для предварительно перемешанной и предварительно неперемешанной смеси выделяют, в зависимости от потока, турбулентное и ламинарное пламя.

Обычно рассматривают следующие примеры пламен:

Тип смеси	Тип пламени	Примеры
Предварительно перемешанная смесь	Ламинарное	Плоское пламя Пламя бунзеновской горелки
	Турбулентное	Двигатель внутреннего сгорания и искровым зажиганием Стационарные газовые турбины с низким выходом оксидов азота
Предварительно не перемешанная смесь	Ламинарное	Горение древесины Горение свечи Излучательные горелки для обогрева
	Турбулентное	Горение распыленного угля Двигатели самолетов Ракетные двигатели (водород-кислородное топливо)

**Ламинарные пламена предварительно перемешанной смеси** изучены более подробно, что объясняется их практическим интересом (безопасность работ в угольных шахтах; эксплуатация объектов, заполненных горючими газовыми смесями и/или ЛВЖ; исследовательские работы по изучению газовой горелки и т.п.).

Исследование скорости горения в сферических пламенах производят методом мыльного пузыря и методом сферической бомбы.

Первый метод разработан в 20-е гг. XX в. Ф. Стивенсоном и заключается в следующем. Мыльный пузырь надувают горючей смесью, которую зажигают с помощью электродов, расположенных в центре пузыря. Скорость горения в данном случае постоянна, так как мыльная пленка практически не препятствует расширению газов и процесс протекает при постоянном давлении.

Полученная расчетная зависимость имеет вид:

$$v_p / v_{гор} = A^3 / a^3$$

где  $v_p$  – скорость распространения пламени;

$v_{гор}$  – скорость горения;

$A$  – конечный радиус продуктов сгорания;

$a$  – начальный радиус мыльного пузыря.

Все предварительные измерения производят фотографированием.

Данный метод имеет ряд недостатков, в первую очередь – крайне малое время проведения эксперимента, обусловленное диффузией продуктов сгорания через мыльную пленку. Поэтому был разработан метод измерения скорости горения пламени в сферической бомбе: зажигание смеси производится в центре сферического герметичного сосуда.

Примерами ламинарных пламен предварительно перемешанной смеси могут быть:

- Горение паров и газов (рис. 3), поднимающихся с поверхности жидкости (горение газа, выходящего из трубы).

Парциальное давление кислорода воздуха составляет 21,2 кПа. В зоне горения  $p = 0$ , следовательно, кислород из окружающего зону горения воздуха будет диффундировать через слой продуктов сгорания в зону горения.

Полное время сгорания смеси составит:

$$\tau_{гор.} = \tau_{ф} + \tau_{х}$$

где  $\tau_{ф}$  – время, необходимое для возникновения

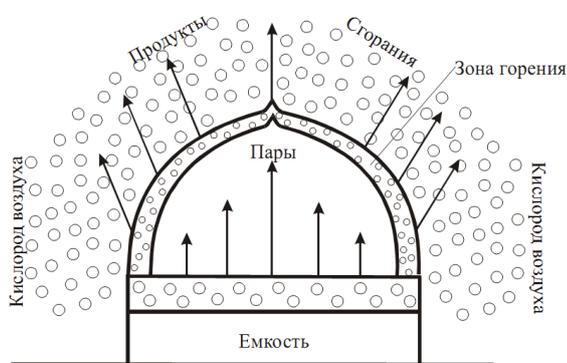


Рисунок 3

физического контакта между горючим веществом и окислителем;

$\tau_{х}$  – время протекания химической реакции

В случае предварительно перемешанной смеси  $\tau_{ф}$  называют временем смесеобразования.

По соотношению этих двух составляющих ( $\tau_{ф}$  и  $\tau_{х}$ ) определяют характер горения (пламени): кинетическое или диффузионное. При горении однородных смесей  $\tau_{ф} \ll \tau_{х}$ , и скорость горения определяется скоростью химической реакции. В этом случае пламя называется кинетическим, и можно считать, что скорость горения равна скорости химической реакции, так как  $\tau_{гор.} \approx \tau_{х}$ .

- Плоские пламена и пламя бунзеновской горелки

В этом случае скорость горения зависит от состава смеси и условий горения: начальной температуры смеси, давления.

Распространение плоского ламинарного пламени определяется скоростью ламинарного горения  $v_{лам.}$ . Если скорость ламинарного горения больше скорости потока несгоревшей смеси ( $v_{лам.} < v_{н.}$ ) пламя "сдувается" и процесс горения прекращается. Это явление называется "срыв" пламени. Таким образом, для горения плоских ламинарных пламен должно выполняться условие:

$$v_{лам.} > v_{н.}$$

Но для ламинарного горения возможен также и "проскок" пламени – резкое уменьшение высоты факела при снижении  $v_{н.}$ . Поэтому скорость потока должна коррелировать с величиной радиуса горелки (чем больше радиус, тем больше, во избежание "проскока", должна быть скорость подачи потока смеси).

Если фронт пламени расположен под углом к потоку горючей смеси, как это происходит в случае пламени бунзеновской горелки:

$$v_{\text{лам.}} = v_n \cdot \sin \theta$$

Измерение угла  $\theta$  при известном позволяет определить скорость ламинарного горения конического пламени горелки. Определение угла  $\theta$  можно выполнить посредством фотографирования пламени.

Измерение скорости горения по углу наклона пламени называется методом Михельсона.

В качестве основной характеристики реакций, происходящих в пламени, принимают **скорость нормального распространения пламени**  $U_n$  – линейную скорость перемещения плоского фронта пламени относительно несгоревшей смеси (рис. 4). Для искривленного фронта пламени эта характеристика рассматривается по направлению нормали к поверхности фронта в данной точке. Искривление фронта пламени происходит за счет конвекции. В каждой точке искривленного фронта пламени происходит распределение пламени перпендикулярно поверхности со скоростью  $U_n$ . Если поверхность нормали составляет угол  $\varphi$  по отношению к нормали распространения пламени, то

$$U = U_n / \cos \varphi$$

где  $U$  – наблюдаемая скорость распространения пламени.

Это выражение носит название закона Михельсона (авт. – закон косинуса) и является основным законом горения. Закон Михельсона определяет, что скорость распространения пламени увеличивается пропорционально  $\cos \varphi$ . Чем больше искривление поверхности фронта пламени, тем больше возрастает его площадь, а значит и количество сгорающей смеси. Для стабилизации положения фронта пламени увеличивают скорость подачи свежей смеси. При турбулизации потока смеси (турбулизации горения) площадь фронта пламени заметно возрастает за счет его искривления и разрывов, и это один из приемов интенсификации сжигания топлива. Из закона Михельсона следует: увеличение поверхности фронта пламени приведет к интенсификации

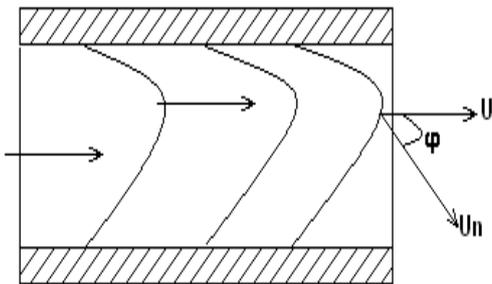


Рисунок 4

процесса сжигания смеси; можно определить форму фронта пламени путем вычисления  $\cos \varphi$  для любой точки данного фронта.

Скорость горения также можно определять по площади поверхности пламени (метод Гуи).

$$S = V/A$$

где:  $V$  – объемный расход,

$A$  – площадь пламени

Для определения площади пламени используют следующую зависимость, представляющую собой уравнение площади поверхности конуса:

$$A = \pi r \sqrt{r^2 + h^2}$$

где:  $r$  – радиус фронта пламени на срезе горелки,

$h$  – высота фронта пламени.

Оба метода дают корректные результаты только в случае ряда допущений. Считается, что измерение скорости горения с применением пламени горелки затруднено при давлениях выше и ниже н.у.

В процессе горения возникает разность давлений перед фронтом пламени ( $P_{\text{исх}}$ ) и за ним ( $P_{\text{сгор}}$ ). Эта разность давлений определяется по формуле:

$$\Delta P = P_{\text{исх}} - P_{\text{сгор}} = \rho_{\text{исх}} S (\rho_{\text{исх}} / \rho_{\text{сгор}} - 1)$$

где  $\rho_{\text{исх}}$ ,  $\rho_{\text{сгор}}$  – плотность исходного и сгоревшего газов, соответственно;

$S$  – скорость горения.

Так как разность давлений перед и за фронтом пламени менее 1 % от внешнего давления, давление во фронте пламени считают постоянным, хотя именно этот параметр является одной из причин, вызывающих изменение характера течения в волне горения.

Факторами, влияющие на скорость ламинарного горения, являются:

1. Начальная температура горения.
2. Состав смеси
3. Теплофизические свойства горючей смеси
4. Давление
5. Влажность смеси и наличие добавок

#### Ламинарные пламена предварительно неперемешанной смеси.

Для предварительно неперемешанной смеси время горения лимитируется процессом диффузии кислорода к горючему веществу, т.е.  $\tau_{\phi}$ .

В случае гетерогенного горения называется временем транспортировки кислорода к горючему веществу. Так как  $\tau_{\phi} \gg \tau_x$ , то скорость горения фактически определяется скоростью диффузии и  $\tau_{\text{гор}} \approx \tau_{\phi}$ . Пламя такого процесса, как и сам процесс, называют диффузионным.

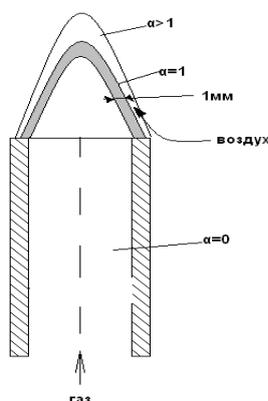


Рисунок 5

Структура ламинарного диффузионного пламени представлена на рис. 5. Фронт пламени расположен в зоне стехиометрической смеси.

В случае, когда через горелку подается газ, не содержащий в себе кислорода, при его поджигании горение происходит за счет потребления кислорода окружающего воздуха, поступающего посредством диффузии. Так как в данном случае газ и воздух подаются раздельно, а горение происходит в процессе их взаимной диффузии, причем скорость горения определяется интенсивностью процесса смешения, то подобное горение называют диффузионным.

В зависимости от характера движения различают ламинарное диффузионное горение и турбулентное диффузионное горение.

Ламинарное диффузионное горение происходит при ламинарном режиме движения газа, вытекающего из горелки. Кислород, необходимый для горения, поступает из окружающей атмосферы и смешивается с горючим газом. Получаемая в результате молекулярной диффузии смесь при поджигании образует факел, который при круглых горелках принимает конусообразную форму, так как по мере движения газ расходует на горение и зона горения перемещается к оси струи, доходя до нее в вершине конуса.

Ламинарный диффузионный факел поддерживается стационарно, так же как при горении однородной смеси, за счет существования кольцевой зоны зажигания. В случае, когда в горелку подается только газ, а окружающая среда находится в покое, у кромки горелки газ диффундирует наружу и, смешиваясь с воздухом, образует смесь, которая в зоне малых скоростей устойчиво сгорает. Благодаря образованию более богатой смеси в области зажигающего кольца и сгоранию ее в зоне меньших скоростей диффузионный факел обладает большей устойчивостью зажигания по сравнению с факелом однородной смеси.

При диффузионном горении также наблюдается явление отрыва факела. Но проскок пламени в горелку исключается из-за раздельной подачи горючего газа и воздуха.

Зона устойчивого горения устанавливается по поверхности, где поступающие молекулярной диффузией количества газа и кислорода находятся в стехиометрическом соотношении для полного горения. Это утверждение следует из того, что в зоне горения не может быть ни избытка газа, ни избытка кислорода, так как в противном случае она не может занять устойчивого положения.

Можно представить, что ламинарное диффузионное горение совершается следующим образом. Газ, вытекая из горелки, молекулярной диффузией смешивается с кислородом воздуха, полученная горючая смесь при поджигании образует достаточно резко очерченный конусообразный светящийся факел. Фронт пламени устанавливается по поверхности, где смесь

образуется в пропорции, теоретически необходимой для горения. В зону горения изнутри поступает газовое топливо в виде различных основных и промежуточных продуктов, а снаружи – кислород. Образующаяся горючая смесь воспламеняется за счет тепла, распространяющегося от фронта пламени. Химическое превращение совершается в узкой светящейся зоне фронта горения в смеси, которая значительно разбавлена горячими продуктами сгорания и тем самым сильно нагрета, но в которой концентрации горючих элементов и окислителя малы. В таких условиях химическое реагирование протекает наиболее интенсивно. Толщина зоны горения мала и не превышает 1 мм. Образующиеся продукты сгорания диффундируют как в окружающее пространство, так и внутрь факела. Поверхность пламени отделяет окислительную область вне факела, в которой имеются кислород и продукты сгорания, и нет горючего, от восстановительной области внутри факела, в которой нет кислорода, но есть газ и продукты сгорания.

Благодаря большой скорости химической реакции, поступающие в зону горения газ и кислород практически мгновенно сгорают, в результате чего в зоне горения их концентрации равны нулю, а температура равна адиабатической. Большая скорость химической реакции обуславливает малую толщину пламени и позволяет рассматривать ее как геометрическую поверхность, с одной стороны которой находится смесь воздуха с продуктами сгорания, а с другой – смесь газа с продуктами сгорания.

С увеличением теплоты сгорания газа в результате увеличения количества необходимого для горения воздуха длина факела увеличивается.

Диффузионное горение характеризуется наличием химической неполноты горения. В диффузионном ламинарном пламени температура достигает максимального значения в зоне горения. Вытекающий из горелки газ до поступления в зону горения нагревается за счет тепла, распространяющегося от пламени, как теплопроводностью, так и посредством диффузии горячих продуктов сгорания. Некоторые газы, как, например, водород и окись углерода являются теплостойкими и при нагреве до температур 2500 – 3000 К сохраняют свою молекулярную структуру. Горение теплостойких газов происходит в прозрачном факеле бледно-голубого цвета.

Находящиеся в пламени мелкодисперсные частицы сажи и свободного углерода, размеры которых чрезвычайно малы и составляют десятые доли микрона, раскалившись за счет выделившегося при горении тепла, излучают более или менее яркий свет, вызывая свечение пламени.

Диффузионное горение частиц протекает сравнительно медленно, в результате чего часть свободного углерода и тяжелых углеводородов не успевает сгорать и в виде сажи покидает факел. Наличие углерода согласно равновесию  $C + CO_2 = 2CO$  вызывает образование CO. Количество углерода, тяжелых углеводородов и CO, присутствующих в продуктах сгорания, определяет величину химического недожога.

Для такого пламени длина факела определяется следующим образом:

$$L = WR^2/2D$$

где W – скорость подачи смеси;

D – коэффициент молекулярной диффузии;

R – радиус горелки.

При теоретическом рассмотрении скорость подачи смеси и коэффициент диффузии принято считать постоянными, так как увеличение обоих параметров вследствие повышения температуры приводит к взаимной компенсации.

Примером ламинарного диффузионного пламени является также пламя, образующееся при горении антрацита.

К диффузионным пламенам относятся также:

- Ламинарные пламена с противотоками горючего вещества и воздуха
- Ламинарные пламена с параллельными потоками горючего вещества и воздуха

Ламинарное диффузионное пламя возникает, если потоки горючего вещества (газы, пары) движутся с невысокой скоростью и имеют небольшие сечения. Ламинарное диффузион-

ное пламя состоит из зоны горения и зоны паров, причем последняя занимает весьма значительный объем.

Примером диффузионного горения также является процесс горения капли жидкого горючего. Жидкое горючее вещество, распыленное в виде капель, является весьма неоднородным, так как состоит из частиц жидкости, паров жидкости и воздуха (окислителя). Исследование такого процесса имеет практическую направленность, так как подобный процесс находит широкое применение во многих областях техники.

Воспламенение капли реализуется либо за счет искрового зажигания, либо самовоспламенением при нагревании воздуха до соответствующей температуры. Одной из наиболее важных характеристик процесса горения капли является время ее сгорания ( $\tau_k$ ), которое определяется следующим образом:

$$\tau_k / D_0^2 = K$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от типа горючего и внешних условий;

$D_0$  – начальный диаметр капли.

Приведенная зависимость выведена С. Кумагаи, выполняется для различных горючих жидкостей и выражает основной закон горения капли жидкого топлива. Исследования процесса горения капли проводятся с использованием фоторегистрации пламени.

Исследование процесса горения капли горючей жидкости показывает, что выведенная математически зависимость скорости горения от диаметра капли (прямая пропорциональность), характерна, в основном, для углеводородов и спиртов, а для других горючих жидкостей имеет более сложный характер.

На скорость горения капли горючей жидкости влияют внешнее давление, температура окружающей среды (увеличивается скорость испарения), концентрация окислителя, колебания воздуха, окружающего каплю, конвекция (естественная и вынужденная).

### Турбулентные пламена

В ламинарном газовом потоке скорости газов малы, а горючая смесь образуется в результате молекулярной диффузии. Скорость горения в этом случае зависит от скорости образования горючей смеси. Турбулентное пламя образуется при увеличении скорости распространения пламени, когда нарушается ламинарность его движения. В турбулентном пламени завихрение газовых струй улучшает перемешивание реагирующих газов, так как увеличивается поверхность, через которую происходит молекулярная диффузия.

Переход ламинарного движения в турбулентное может происходить в некотором интервале скоростей. Выделяется зона переходного режима, ограниченная двумя значениями скорости течения. Эти граничные значения называются нижней и верхней критическими скоростями. Критической скоростью называется величина средней скорости, соответствующая критическому значению числа Рейнольдса ( $Re$ ). Переход от ламинарного к турбулентному режиму происходит по достижении так называемого критического числа Рейнольдса  $Re_{кр}$ . При  $Re < Re_{кр}$  течение происходит в ламинарном режиме, при  $Re > Re_{кр}$  возможно возникновение турбулентности. Критическое значение числа Рейнольдса зависит от конкретного вида течения (течение в круглой трубе, обтекание шара и т. п.) и в общем виде принимается как  $Re_{кр} = 2300$ . Турбулентное движение наблюдается при  $Re > 2300$ , ламинарное – при  $Re < 2300$ . Для потоков в закрытой трубе и открытом канале  $Re_{кр}$  зависит от линейных размеров.

Процессы, протекающие в турбулентном пламени, весьма сложны. В настоящее время в статистической теории турбулентности разработаны методы расчета течения для отдельных частных случаев и установлено качественное соответствие с экспериментальными наблюдениями. Экспериментальные исследования турбулентного горения проводятся в двух направлениях: исследование макро- и микроструктуры турбулентного факела с целью проверки той или иной модели горения и исследование суммарных характеристик, например, скорости и ширины зоны горения и влияние на эти характеристики различных факторов (параметров турбулентности, давления, температуры).

Экспериментальные методы измерения характеристик распространения пламени в турбулентном потоке делятся на три группы. Они основаны на измерении локальных характеристик потока с помощью малогабаритных зондов пульсации скорости, температуры, плотности и т. д. Основными методами в этой группе являются методы термоанемометрии, метод анемометра с тлеющим разрядом. Анемометр (от греческого анемос — ветер, и метрео — измерение) — измерительный прибор, предназначенный для определения скорости потока газовой среды. Состоит из чашечной (или лопастной) вертушки укрепленной на оси, которая соединена с измерительным механизмом. При возникновении воздушного потока, последний толкает чашечки, которые начинают крутиться вокруг оси.

Ко второй группе относятся методы, основанные на изучении диффузии в турбулентных потоках.

## Теории горения

### Теория окисления

При нормальных температурах молекулярный кислород не отличается высокой реакционной способностью, но, тем не менее, взаимодействует с рядом веществ даже при н.у.

Механизм взаимодействия горючих веществ с кислородом был предложен в 1897 г. А.Н. Бахом и К. Энглером.

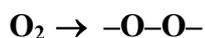
Цепные реакции были открыты в 1913 г. М. Боденштейном, в 1918 г. Нернст объяснил механизм цепной реакции взаимодействия хлора с водородом.

Дальнейшее развитие теория цепных реакций получила в работах Н.Н. Семенова (с сотрудниками) и К. Хиншелвуда (с сотрудниками) в 1926 – 1928 г.г. и, позднее, ряда других ученых.

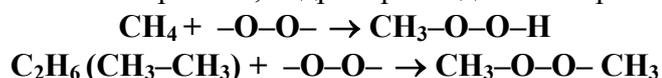
Первая теория, предложенная Бахом и Энглером, предполагала, что в качестве продуктов окисления горючих веществ на первой стадии образуются пероксиды и гидропероксиды. Общее название теории – перекисная.

Пероксиды, образование которых происходит при окислении горючих органических веществ, являются производными пероксида водорода (H–O–O–H). Оба атома водорода могут замещаться на органические радикалы, образуя соединение вида R<sub>1</sub>–O–O–R<sub>2</sub>. При замещении одного атома водорода радикалом образуется гидропероксид R<sub>1</sub>–O–O–H.

Переход кислорода от молекулы O<sub>2</sub> к активному состоянию, согласно перекисной теории, объясняется тем, что энергия разрыва одной связи в молекуле O<sub>2</sub> (343,6 кДж/моль) меньше энергии диссоциации молекулы O<sub>2</sub> на два атома кислорода (488,3 кДж/моль). То есть, легко реализуется процесс:



Активная молекула кислорода взаимодействует с молекулами горючих веществ, образуя, в зависимости от их состава и строения, гидропероксиды или пероксиды:



Образованные молекулы обладают высокой реакционной способностью, так как энергия разрыва связи в них порядка 125 – 167 кДж/моль, что значительно ниже, чем в молекуле кислорода. Связь O–O легко разрывается, при этом образуются новые вещества или радикалы, которые, в свою очередь, становятся активными центрами для других взаимодействий.

Удобная и легкая для понимания, перекисная теория окисления, к сожалению, не объясняла ряда особенностей процессов окисления горючих веществ.

Только формирование и развитие теории цепных реакций позволило полностью объяснить не только все процессы, происходящие при окислении горючих веществ кислородом, но и другие процессы, протекающие с высокими скоростями.

### Теория цепных реакций

Первыми разработками в этой области стали исследования процессов взаимодействия хлора и водорода при освещении, выполненные немецким физхимиком Боденштейном.

При поглощении кванта света молекула хлора распадается на 2 атома хлора, которые мгновенно, со взрывом, взаимодействуют с водородом. Опыты показывают, что в этой реакции образуется не 2 молекулы хлороводорода, как можно было ожидать, а гораздо большее их количество (до 100 000).

Для объяснения такого процесса было выдвинуто предположение об образовании в процессе реакции вещества, способного, вступая во вторичные реакции, "возродиться" и продолжать реакцию.

Было выдвинуто предположение, что в результате действия первичной реакции возникает несколько различных реакций, называемых цепными. Количество реакций, протекающих от момента образования до обрыва цепи, называется длиной цепи. Обрыв цепи может произойти при взаимодействии двух атомов хлора или двух атомов водорода с образованием соответствующих молекул. Обрыв цепи также может произойти в результате столкновения активных центров с поверхностью твердого вещества (например, стенки сосуда).

Цепные реакции делят на 2 типа:

- **цепные неразветвленные реакции**, т.е. реакции в которых каждый активный центр инициирует появление только одного нового активного центра (взаимодействие хлора и водорода). Такие реакции протекают достаточно продолжительное время, но не способны к самоускорению;
- **цепные разветвленные реакции**, т.е. реакции в которых каждый активный центр инициирует появление двух или более новых активных центров. В этом случае будет происходить не только протяженная цепная реакция, но несколько новых реакций в различных направлениях, т.е. начальная реакция будет самоускоряться. Примером цепной разветвленной реакции может быть взаимодействие кислорода и водорода);
- частным случаем разветвленных цепных реакций являются **реакции с вырожденными разветвленными цепями**. В ходе таких реакций новые цепи могут образовываться не при участии активных центров, а при превращении стабильных продуктов реакции в свободные радикалы. Это происходит в том случае, если продукты реакции образуют радикалы легче, чем исходные вещества. К веществам, способным распадаться на радикалы, относятся гидроксиды.



Новые цепи в вырожденно-разветвленных реакциях, в отличие от разветвленных реакций возникают через промежуток времени, значительно превосходящий время существования цепи.

Согласно современным представлениям, начальной стадией процесса является активация молекул окисляющегося вещества, а не молекул окислителя (кислорода).

Температура, при которой начинается процесс окисления горючих веществ, зависит от массы молекул и их строения (табл. 10). Для изомеров по мере усложнения цепи температура начала реакции окисления повышается..

Таблица 10  
Изменение температуры окисления

№	Вещество	$T_{\text{окисления}}, ^\circ\text{C}$
1.	Метан (CH <sub>4</sub> )	> 400
2.	Этан (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	400
3.	Гексан (C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> )	300
4.	н-октан(C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> )	250
5.	Изооктан (2,2,4 – триметилпентан)	500
6.	Бензол	>500

В гомологическом ряду по мере увеличения массы температура окисления, наоборот, понижается. Окисление веществ с кратными связями происходит по месту разрыва кратной связи, причем непредельные углеводороды окисляются сложнее, чем предельные. Для окисления ароматических углеводородов требуется более высокая температура, чем для других

соединений, содержащих такое же число атомов. Наиболее опасными при промышленном использовании являются вещества с низкой температурой окисления, т.к. они способны к самовозгоранию. Устойчивость метана по сравнению с другими предельными углеводородами объясняется тем, что энергия образования связи С–Н (98,5 ккал/моль) выше энергии образования связи С–С (81 ккал/моль).

### **Взрыв: определение, классификация**

Взрыв представляет собой один из видов физических или химических превращений веществ. В широком смысле слова взрывом называется явление крайне быстрого перехода системы веществ из одного состояния в другое, сопровождающееся столь же быстрым превращением ее потенциальной энергии в механическую работу над окружающей средой.

Энергия взрыва может иметь разную природу. Выделение ядерной, химической, электрической, тепловой, кинетической энергии, энергии упругого сжатия способно проходить в виде взрывного процесса.

При ударе движущегося с большой скоростью тела о прочную преграду его кинетическая энергия переходит в тепловую, при достаточном высоком значении энергии могут образовываться сильно сжатые газы. Примером взрывов такой природы является падение крупных метеоритов.

Физическую природу имеют взрывы баллонов со сжатыми газами или взрывы паровых котлов. В первом случае взрыв происходит или за счет чрезмерного повышения давления, например от случайного разогрева, или вследствие механических повреждений и уменьшения прочности стенок. Во втором случае явление вызвано быстрым переходом перегретой воды в парообразное состояние. При подобных взрывах изменяется только физическое состояние вещества с сохранением неизменности его химического состава.

Примером электрического взрыва могут служить взрывы, которые возникают при мощных искровых разрядах, например молниях, или при пропускании электрического тока высокого напряжения через тонкие металлические проволочки. При мощных разрядах разность потенциалов выравнивается за промежутки времени  $10^{-6}$ - $10^{-7}$  с, благодаря чему в зоне разряда колоссально растут плотность энергии и температура (до десятков тысяч градусов), что, в свою очередь, приводит к сильному подъему давления воздуха в месте разряда и распространению интенсивного возмущения в окружающей среде.

Примерами взрыва за счет энергии упругого сжатия могут служить гигантские взрывы, протекающие внутри земной коры и приводящие к землетрясениям или разрушению вулканов при их извержении. Накапливаемые в отдельных участках земной коры напряжения могут охватывать весьма большие объемы, а при землетрясении внезапно освобождаются с выделением огромного количества энергии. Энергия сильнейших землетрясений оценивается в  $10^{13}$ - $10^{15}$  кДж, т.е. превосходит энергию взрыва миллионов тонн взрывчатых веществ (ВВ).

При атомных взрывах, обусловленных реакциями деления или синтеза ядер, достигаются весьма высокие значения таких параметров, как температура и давление продуктов реакции.

Взрыв может произойти также за счет потенциальной химической энергии, которая превращается в энергию сжатых газов в результате быстрого протекания химической реакции.

Химическую реакцию, сопровождающуюся или способную сопровождаться взрывом, называют взрывчатым превращением. Вещества, способные к взрывчатым превращениям, называют взрывчатыми веществами (ВВ).

Взрыв в более узком смысле слова представляет собой процесс чрезвычайно быстрого химического превращения вещества, сопровождающийся столь же быстрым выделением тепла и образованием газов.

**Взрывом** называется быстропотекающий процесс физического и химического превращения вещества, сопровождающийся освобождением значительного количества энергии в ограниченном объеме, в результате которого в окружающем пространстве образуется и

распространяется ударная волна, способная привести или приводящая к возникновению техногенной чрезвычайной ситуации.

**Техногенной чрезвычайной ситуацией** называют состояние, при котором в результате возникновения источника техногенной чрезвычайной ситуации на объекте, определенной территории или акватории нарушаются нормальные условия жизни и деятельности людей, возникает угроза их жизни и здоровью, наносится ущерб имуществу населения, народному хозяйству и окружающей природной среде

На сегодняшний день единой классификации взрывов не существует. С точки зрения протекающих процессов можно выделить следующие типы взрывов:

- **физический** – вызывается изменением физического состояния вещества. Различают физические взрывы 1, 2 и 3 рода. Под **физическим взрывом 1 рода** понимают взрыв при расширении газовых объемов высокого давления (взрыв электрической проволоки; взрыв газового баллона). Взрыв газопылевой системы – **взрыв 2 рода** (взрыв вулкана: выброс вулканического пепла; падение метеорита). **Взрыв 3 рода** – взрывоподобное расширение объемов высокотемпературных жидкостей, заключенных в прочную оболочку (парового котла). На этом классификация физических взрывов не исчерпывается: к ним также относят ядерный и термоядерный взрывы, аннигиляционный взрыв и т.п..

- **химический** – вызывается быстрым химическим превращением веществ, при котором потенциальная химическая энергия переходит в тепловую и кинетическую энергию расширяющихся продуктов взрыва;

- **аварийный** – происходит в результате нарушения технологии производства, ошибок обслуживающего персонала, ошибок, допущенных при проектировании.

Кроме того, с позиций взрыва конденсированного ВВ в окружающей среде различают следующие типы:

- **Воздушный взрыв** – взрыв заряда ВВ в газе (в воздухе) в отсутствие отражающих поверхностей. Этот взрыв характеризуется минимальными искажениями процесса разлета продуктов взрыва в окружающую среду, и, следовательно, наименее осложнен различными преломлениями и отражениями волн на произвольных границах вблизи заряда.

- **Наземный взрыв** – взрыв заряда ВВ в газе (в воздухе) в случае, когда заряд ВВ размещен на ограничивающей поверхности (грунте).

- **Приподнятый взрыв** – взрыв заряда ВВ в воздухе на определенном расстоянии от ограничивающей поверхности (грунта).

- **Подземный взрыв** – взрыв заряда ВВ в грунте.

- **Подводный взрыв** – взрыв заряда ВВ, заглубленного в жидкость.

### Характеристики взрыва

К важнейшим характеристикам взрыва относятся:

- **Ударная (взрывная) волна** – это распространяющаяся со сверхзвуковой скоростью переходная область в газе, жидкости или в твердом теле, в которой происходит резкое увеличение плотности, давления и скорости среды. Таким образом, ударная волна представляет собой фронт резкого, почти мгновенного, изменения параметров среды: давления, температуры, объема. Ударные волны называют также скачками уплотнения (сильными разрывами). Ударная волна распространяются в среде со сверхзвуковой скоростью. Введение этого понятия приписывают Бернхарду Риману (1876 г.).

**Микроскопически** ударная волна представляет собой тонкую переходную область, в которой происходит резкое увеличение плотности и др. параметров. Ударная волна является примером нормального гидродинамического разрыва и через нее течет поток вещества.

С **макроскопической** точки зрения ударная волна представляет собой воображаемую поверхность, на которой термодинамические характеристики среды испытывают конечные скачки. При переходе через фронт ударной волны меняются не только давление, температуры и плотность вещества, но и скорость движения среды относительно фронта ударной волны.

Все эти величины изменяются не независимо. Они связаны с характеристикой ударной волны – *числом Маха*. Математическое уравнение, связывающее между собой термодинамические величины до и после прохождения ударной волны, называется уравнением адиабаты Гюгонио (ударной адиабатой).

УВ не обладает свойством аддитивности, т.е. термодинамическое состояние среды, возникающее после прохождения данной УВ нельзя получить последовательным пропуском двух более слабых УВ.

Рассмотрим стационарно движущийся однородный плоскопараллельный поток газа (рис. 6). Примем, что газ движется с постоянной скоростью  $u$ .

Пусть в некоторой точке  $O$ , неподвижной в пространстве, газ подвергается малому возмущению, которое распространяется в направлении  $n$  со скоростью  $c$  относительно газа. В этом случае скорость распространения исходящего из точки  $O$  возмущения относительно неподвижной системы координат будет  $u + cn$ , и она будет различна в зависимости от направления единичного вектора  $n$ .

Все возможные значения скорости можно получить, отложив из точки  $O$  вектор  $u$ , а из его конца, взяв его за центр, построить сферу радиуса  $c$ . Векторы, проведенные из точки  $O$  в точки сферы, определяют возможные величины и направления скорости распространения возмущения.

Предположим, что  $u < c$  (дозвуковая скорость). Тогда  $u + cn$ , т.е. векторы, определяющие скорость возмущения и ее направления могут распространяться в пространстве в любом направлении. Таким образом, в потоке, движущемся с дозвуковой скоростью, точечное возмущение распространяется по всему газу.

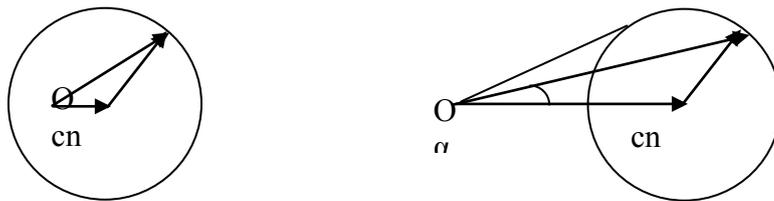


Рисунок 6.

Если  $u > c$  (сверхзвуковая скорость), то направления векторов  $u + cn$  могут лежать только внутри конуса с вершиной в точке  $O$ , касающегося построенной из конца вектора сферы. Угол раствора конуса будет  $2\alpha$ , и мы получим

$$\sin \alpha = c/u$$

Таким образом, в сверхзвуковом потоке возмущение, исходящее из точки  $O$ , будет распространяться только внутри конуса. При этом, чем меньше отношение (чем больше), тем меньше раствор конуса. На поток вне конуса возмущение не распространяется.

Угол  $\alpha$ , выражение для которого мы получили, называется *углом Маха*.

Обратное отношение  $M = u/c$  называется *числом Маха*.

Поверхность, ограничивающую область, которую достигает выходящее из заданной точки возмущение, называют *поверхностью Маха* или характеристической поверхностью.

Число Маха является мерой влияния сжимаемости среды в потоке данной скорости на его поведение: из уравнения состояния идеального газа и уравнения Бернулли следует, что относительное изменение плотности в газовом потоке пропорционально квадрату числа Маха.

Характер сверхзвукового течения совершенно отличен от характера дозвукового течения. Если дозвуковой поток газа встречает на своем пути препятствие (обтекает тело), то изменяется движение во всем пространстве как вверх, так и вниз по течению.

Для сверхзвукового потока влияние обтекаемого тела распространяется только на область вниз по течению (в пределах конуса Маха). Поэтому говорят, что сверхзвуковой поток набегающий на препятствие "слеп".

• **Бризантное действие** (от франц. *brisant* – дробящий) проявляется на расстоянии до 3–4 радиусов зарядов взрывного устройства, при этом происходит “дробящее” воздействие на предметы окружающей обстановки, ткани биологических объектов. Повреждения такого рода происходят за счет динамических напряжений, превышающих пределы прочности разрушающихся материалов в результате совместного воздействия ударной волны и продуктов детонации. Такое действие характерно для взрывных устройств с взрывчатыми веществами, имеющими значительную скорость детонации и относительно большую плотность.

• **Фугасное действие** – работа взрыва по перемещению элементов среды. Так, если взрыв произошел на открытой поверхности, то фугасное действие будет минимальным, взрыв практически не произведет работы, то есть работа будет бесполезной (такой же, что от двигателя, работающего вхолостую), будет взрывная волна, которая быстро погаснет. Если же взрыв происходит в чем-то, например, в стенах здания, то фугасное действие может быть значительным, работа взрыва через взрывную волну может привести к разрушению (не дроблению!) стен, и обрушению здания или его части. Максимальную опасность взрыв несет, происходя внутри чего-то. Именно поэтому заряды гранат облачают в корпус, причем, чем он будет массивней (до некоторого предела, разумеется), тем фугасное действие будет сильнее (такие припасы называют осколочно-фугасными).

*Бризантное и фугасное действие легко показать на примере:* если взять кирпич и ударить по нему кувалдой, то этот кирпич сначала расколется (бризантное действие), а обломки отлетят на некоторое расстояние (фугасное действие). Вот реальный пример: если мы положим заряд под бетонную плиту, то после взрыва мы обнаружим нашу плиту на некотором расстоянии от места взрыва и с дырой или выбоиной в этой плите: это и есть соответственно фугасное и бризантное действие.

• **Осколочное воздействие.** При взрыве заряда взрывчатого вещества, помещенного в оболочку, под действием быстро расширяющихся газов происходит ее разрыв на осколки и их метание. Осколки, образованные за счет разрушения оболочки (корпуса) заряда взрывчатого вещества, называются *первичными*. В качестве примера могут служить боеприпасы в виде осколочных гранат, снарядов, мин или самодельных трубчатых взрывных устройств. Осколки, образованные при разрушении предметов, находящихся в непосредственной близости к заряду взрывчатого вещества (до 20 диаметров объема взрывчатого вещества) за счет бризантного действия взрыва, называются *вторичными*. Например, разлет фрагментов корпуса и деталей автомобиля при взрыве заряда взрывчатого вещества в салоне. В зависимости от состава взрывчатого вещества и его массы скорость разлета осколков может достигать 2000 м/с. В ходе полета осколки разрушают (пробивают) окружающие предметы, ricochetируют, в определенных условиях вызывают воспламенение горючих материалов. Нагрев осколков происходит в момент детонации, а также из-за трения в момент соударения с преградой, например, при пробивании топливного бака автомобиля. При взрыве бризантных взрывчатых веществ осколки представляют собой мелкие фракции оболочек, при взрыве взрывчатых веществ пониженной мощности, а также порохов, как правило, образуются крупные осколки без заметного изменения структуры материала оболочки.

• **Термическое действие.** Термическое действие, вызванное взрывом, в зависимости от используемого взрывчатого вещества различается по интенсивности и длительности воздействия на окружающие предметы и материалы. Как правило, взрыв пороха вызывает более длительное зажигательное действие, чем взрыв бризантных взрывчатых веществ. Термическое действие сопровождается долями секунды. Бризантные взрывчатые вещества при взрыве создают более высокую температуру. Термическое воздействие носит локальный характер и по дальности не превышает 10–30 диаметров объема заряда взрывчатого вещества. На объектах, предметах и материалах, находящихся в непосредственной близости к месту взрыва, если не возникло открытое горение, наблюдаются следы окопчения и оплавления.

• **Кумулятивный эффект** – явление, при котором разлет продуктов взрыва во время детонации при помощи схождения потоков продуктов детонации концентрируется в определенном направлении. Если в заряде бризантного ВВ сделать выемку конусной, параболической

ской или полусферической формы, то продукты взрыва, разлетаясь с поверхности выемки по нормали, сталкиваются в месте схождения противоположных потоков продуктов взрыва изменяют направление своего движения. При этом они дополнительно сжимаются и начинают двигаться с повышенной скоростью, обладая соответственно увеличенным пробивным эффектом.

В результате концентрации энергии взрыва и создания уплотнённой газовой-металлической струи в области кумулятивной выемки (рис. 7), частицы наружного слоя металла воронки под действием упругого удара получают движение, отрываются от воронки и летят с большей скоростью (до 12-15 км/с), образуя иглу кумулятивной струи.

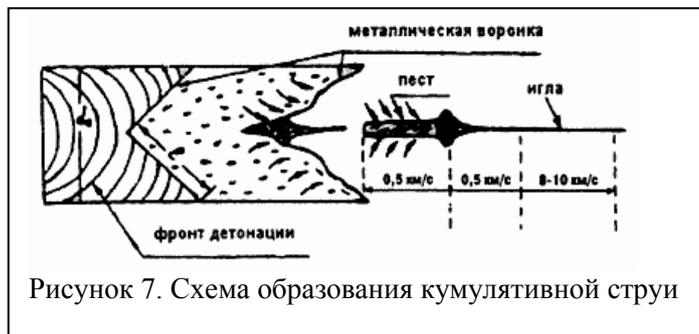


Рисунок 7. Схема образования кумулятивной струи

Кумулятивная энергия струи переходит в энергию давления (1–2 млн. кг/см<sup>2</sup>), в результате чего металл брони течет, не нагреваясь, до температуры плавления (температура кумулятивной струи составляет 200–600 °С).

Кумулятивный эффект открыт в 1864 г. русским военным инженером генералом М. М. Андриевским, использовавшим это явление при создании капсюля-детонатора. Значительный вклад в теорию кумулятивного эффекта внесли русские учёные М. Я. Сухаревский, М. А. Лаврентьев, Е. И. Забабахин, Г. И. Покровский, Ф. А. Баум и другие.

Кумулятивный эффект нашёл широкое использование не только в военном деле, но и в строительстве и горнорудной промышленности, в исследованиях свойств веществ при высоких давлениях.

### Взрывчатые вещества

Взрыв представляет собой выделение определенного количества энергии. Под выделением энергии понимается процесс перехода потенциальной энергии в кинетическую. Взрывчатые вещества (ВВ) имеют запас энергии в молекулах, и при определенных условиях возможен выход этой энергии наружу. Количество энергии, запасенной в каждом кг ВВ называется *удельной энергией* ВВ. Эта характеристика используется для теоретических расчетов.

Обычные ВВ называют химическими, потому, что энергия при взрыве выделяется как результат химических реакций. ВВ могут быть жидкими, твердыми, газообразными. Большая часть применяемых на практике ВВ – это твердые вещества или наполнители (уголь, мелкодисперсные древесные опилки, продукты переработки целлюлозы), пропитанные жидкими ВВ. В чистом виде жидкие ВВ используются редко. Газообразные ВВ и аэрозоли на практике не используются, но их непредусмотренные взрывы очень опасны, и могут возникать в рабочих зонах производственных помещений (распыление угольной пыли, сахарной пудры).

Выделяют несколько групп взрывчатых веществ.

- ВВ, в составе которых каждая молекула является "взрывоспособной" (рис. 1). Эти молекулы представляют в виде двух активных групп атомов, разделенных малоактивной прослойкой, в качестве которой, как правило, выступают атомы азота. Повышение температуры такого ВВ приводит к увеличению скорости движения молекул, следовательно, – к увеличению количества и силы соударений. Сильные соударения разрушают молекулы ВВ, освобождая активные атомные группы. При взаимодействии таких групп образуются взрывные газы, которые быстро расширяются и передают окружающей среде энергию своих молекул.
- Смеси частиц горючего вещества. Необходимый для сгорания кислород получают, вводя в состав смеси вещества, разложение которых приводит к его выделению (рис. 2). Это обусловлено тем, что кислорода воздуха недостаточно для проведения реакции. Выделяющийся при термическом разложении веществ кислород соединяется с горючим мате-

риалом, температура резко повышается, и образуются газообразные быстро расширяющиеся продукты сгорания. Этим обуславливается действие взрыва на окружающую среду.

К смесям относится еще одна группа веществ, называемых оксиликвитами. Оксиликвиты представляют собой смесь мелкодисперсного твердого горючего вещества (древесные опилки, уголь) с достаточным количеством жидкого кислорода. Такие смеси необходимо использовать сразу же после приготовления, т.к. температуру, при которой возможно существование жидкого кислорода составляет  $-180^{\circ}\text{C}$ . Такое охлаждение достаточно сложно, а кислород, контактируя с окружающей средой, быстро испаряется, переходя в газообразное состояние и покидает зону реакции. Такие смеси практически не используются на практике.

- Смеси двух жидких веществ, одно из которых – горючее, другое разлагается с выделением большого количества окислителя. Так как молекулы веществ в жидком состоянии находятся на гораздо меньшем расстоянии друг от друга, чем в газах, реакции, происходящие при взаимодействии жидких веществ протекают с гораздо большими скоростями.

Различие химического состава и строения ВВ и продуктов реакции взрыва на практике учитывается достаточно редко, так как определяющим фактором при взрыве является детонационная волна

### Удельная энергия ВВ

Чем больше энергия, выделяющаяся при взрыве, тем больше воздействие взрыва на окружающую среду. Для определения энергии взрыва используют методики, основанные на соотношении энергии, выделяемой при взрыве различных веществ и прочности материалов, подвергающихся действию взрыва. Деформацию материала рассматривают как средство измерения силы взрыва.

Прибор, используемый для определения энергии взрыва на основании деформации материала, называют свинцовой бомбой, или бомбой Трауцля (рис. 3). Заряд определенной массы помещают в свинцовый сосуд стандартной формы, закрывают его массивной пробкой из песка и производят взрыв. Происходит деформация сосуда и увеличение его внутреннего объема. Увеличение объема сосуда легко определить, заполняя его водой до и после взрыва. Исследования показывают, что увеличение объема бомбы при взрыве пропорционально выделяющейся энергии. Этот вывод обосновывается и теоретически.

При небольшом увеличении объема шарообразного сосуда сила будет равна произведению давления взрывных газов на общую внутреннюю поверхность сосуда.

$$F = P \cdot S$$

Под действием этой силы радиус сосуда увеличится на некоторую величину  $\Delta R$ . Как и всякая механическая работа, работа расширения равна произведению силы на путь.

$$A = F \cdot \Delta R$$

Используя приведенные ранее уравнения, получим, что

$$A = P \cdot S \cdot \Delta R$$

Произведение  $S \cdot \Delta R$  есть увеличение объема сосуда. Таким образом:

$$A = P \cdot \Delta V$$

Увеличение объема сосуда будет продолжаться до тех пор, пока величина давления не снизится до некоторого предела, зависящего от прочности материала сосуда и его формы. То есть при стандартных сосудах величину  $P$  можно считать постоянной. При этих условиях работа расширения сосуда будет пропорциональна увеличению объема сосуда.

Работа, производимая взрывными газами, будет тем больше, чем больше масса заряда. Можно считать, что эта работа пропорциональна удельной энергии  $U$  ВВ, то есть той энергии, которая содержится в единице массы этого вещества и пропорциональна общей массе заряда  $q$ .

Сравнение взрывчатых веществ, взорванных в двух одинаковых бомбах, позволяет сравнивать значения удельных энергий этих веществ.

При проведении подобных опытов учитывают, что не все ВВ взрываются полностью, даже если их количество очень мало. Поэтому проводят серию опытов, постепенно увеличивая массу заряда ВВ. При достижении массы, обеспечивающей полноценный взрыв, дальнейшее увеличение заряда приведет только к увеличению объема, пропорциональному массе заряда (рис. 4). Т.о. можно определять удельную энергию взрыва для зарядов различной массы, считая правильным такое значение энергии, которое является максимальным и постоянным при дальнейшем увеличении массы заряда.

### Бризантность и фугасность ВВ

Помимо удельной энергии важными характеристиками ВВ являются его бризантность, фугасность, детонационная способность и кислородный баланс.

**Бризантность** служит мерой способности ВВ к локальному дробящему воздействию на среду, в которой происходит взрыв.

Бризантность зависит от состава взрывчатого вещества, его плотности, физического состояния, степени измельчения. Как правило, бризантность возрастает с увеличением плотности и скорости детонации ВВ.

Существует несколько способов определения бризантности. Наиболее простым и рас-

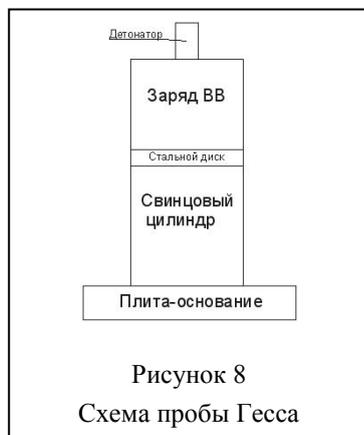


Рисунок 8  
Схема пробы Гесса

пространственным является проба Гесса. Этот способ в Российской Федерации используется для промышленных ВВ как стандартный. Испытание проводят путем подрыва заряда массой 50 г, установленного на свинцовом цилиндре. После подрыва заряда измеряется уменьшение высоты цилиндра. Разность между средними высотами цилиндра до и после взрыва является мерой бризантности ВВ. Традиционно измеряется в миллиметрах.

Измерение бризантности взрывчатых веществ с высокой скоростью детонации и малым предельным диаметром детонации по обжатию свинцового цилиндра затруднительно из-за разрушения цилиндра. Для таких ВВ в России обычно применяют метод измерения, известный как бризантность по Касту (обжатие медного крешера). Данный метод принципиально аналогичен пробе Гесса. Импульс взрыва через металлическую прокладку действует на массивный стальной поршень, который сплюсчивает небольшой медный крешер (цилиндр).

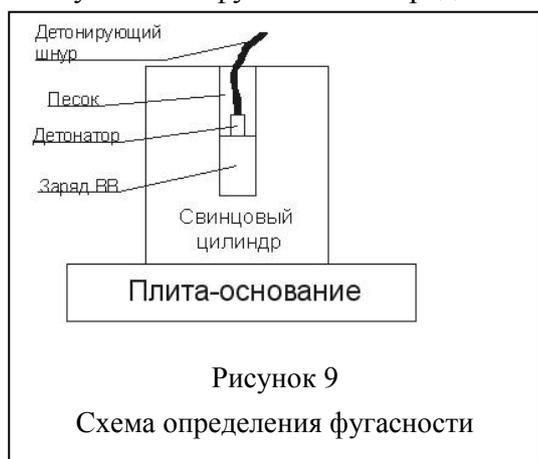
В качестве стандартного обычно используют заряд прессованного флегматизированного гексогена плотностью  $1,65 \text{ г/см}^3$ .

Таблица 11  
Бризантность ВВ

Бризантность некоторых ВВ по пробе Гесса		Бризантность некоторых ВВ по обжатию медного крешера	
Вещество	Бризантность	Вещество	Бризантность
Тротил	16,5 мм	Гексоген флегматизированный	4,1 – 4,2 мм
Аммонит скальный №1 прессованный	22 мм	Гексоген при плотности $1,75 \text{ г/см}^3$	4,8 мм
Аммонит № 6ЖВ	14 – 17 мм	Октоген при плотности $1,83 \text{ г/см}^3$	5,4 мм
Аммонал	16 мм		
Гексоген	оценивается в 24 мм (разбивает свинцовый цилиндр).		

**Фугасность** ВВ служит мерой его общей работоспособности, разрушительного, металлического и иного действия взрыва.

Основное влияние на фугасность оказывает объем газообразных продуктов взрыва. Точное определение истинной работоспособности связано с техническими трудностями, поэтому обычно фугасность определяют и выражают в относительных единицах по сравнению



со стандартными ВВ (как правило, кристаллическим тротилом). Для измеренной таким образом фугасности часто применяют термин тротиловый эквивалент.

Существует несколько способов определения фугасности. Наиболее простым и распространенным является проба Трауцля. Этот способ в Российской Федерации используется для промышленных ВВ как стандартный.

Испытание проводят путем подрыва заряда массой 10 граммов, установленного внутри свинцового цилиндра (часто называемого бомбой Трауцля). До и после подрыва заряда измеряется объем полости

внутри цилиндра. Разность между ними с учетом влияния температуры и капсюля-детонатора сравнивается с результатами испытания кристаллического тротила (тротиловый эквивалент).

Таблица 12  
Фугасность ВВ

Вещество	Фугасность	Тротиловый эквивалент
Тротил кристаллический	285 ± 7 см <sup>3</sup>	
Аммонит скальный № 1 прессованный	450 – 460 см <sup>3</sup>	1,6
Аммонит № 6ЖВ	365 см <sup>3</sup>	1,3
Аммонал	400 см <sup>3</sup>	1,4
Гексоген	480 см <sup>3</sup>	1,7
Нитроглицерин	550 см <sup>3</sup>	
Этиленгликольдинитрат	650 см <sup>3</sup>	

**Тротиловый эквивалент** – масса условного заряда химического ВВ (ТНТ) энергия взрывчатого разложения которого равна энергии, выделяемой при данном ядерном взрыве. Т. э. характеризует мощность взрыва ядерного и термоядерного зарядов и вычисляется по формуле:

$$N = Q_{\text{яв}} / Q_{1\text{тТНТ}}$$

где  $Q_{\text{яв}}$  – энергия, выделяемая при ядерном взрыве,

$Q_{\text{тнт}}$  – энергия взрыва 1 т тринитротолуола., кг (энергия, выделяемая при взрыве 1 т тротила = 4,6 ГДж).

Помимо способности производить ту или иную работу, области применения ВВ определяются их химической и физической стойкостью (т. е. способностью сохранять свои свойства в процессе снаряжения, транспортировки и хранения) и чувствительностью к внешним воздействиям, характеризуемой минимальным количеством энергии, необходимым для возбуждения взрыва. Важной характеристикой ВВ является также их **детонационная способность**, мерой которой служит критический диаметр детонации, т. е. наименьший диаметр цилиндрического заряда, при котором детонация ещё распространяется, несмотря на разброс вещества из зоны реакции. Детонационная способность ВВ тем больше, чем меньше критический диаметр.

Основным источником энергии взрыва является окисление. Окислителем обычно служит кислород, который входит в состав ВВ и обеспечивает возможность их горения и взрыва без доступа воздуха. Чем больше кислорода в ВВ, тем выше их **кислородный баланс**. Если кислорода достаточно для превращения всего углерода ВВ в  $\text{CO}_2$ , а водорода — в  $\text{H}_2\text{O}$ , ки-

слородный баланс ВВ равен нулю. У ВВ с недостатком кислорода он отрицателен, с избытком — положителен.

### **Классификация взрывчатых веществ**

**Взрывчатые вещества (ВВ)**, индивидуальные вещества или смеси, способные под влиянием каких-либо внешних воздействий (нагревание, удар, трение, взрыв другого ВВ и т.п.) к быстрой самораспространяющейся химической реакции с выделением большого количества энергии и образованием газов. Реакция, возникшая в ограниченном объеме вещества, распространяется по ВВ благодаря передаче энергии по массе вещества. Расстояние, на которое перемещается фронт реакции в единицу времени, называется скоростью взрывчатого превращения.

Для ВВ характерны два режима химического превращения – детонация и горение. При детонации реакция распространяется очень быстро (1–10 км/с в зависимости от природы ВВ, свойств и размеров заряда) в результате передачи энергии посредством ударной волны. Материалы, находящиеся в контакте с зарядом детонирующего ВВ, сильно деформируются и дробятся (местное, или бризантное, действие взрыва), а образующиеся газообразные продукты при расширении перемещают их на значительное расстояние (фугасное действие). Бризантное действие зависит от плотности заряда и скорости детонации, фугасное действие определяется теплотой взрыва, объемом и составом выделившихся газообразных продуктов.

При горении распространение реакции обеспечивается передачей энергии к непрореагировавшему веществу в результате теплопроводности. Скорость горения (от десятых долей мм/с до десятков см/с) в значительно большей степени зависит от природы ВВ, чем скорость детонации. Небольшие добавки катализаторов, повышение начальных температуры и давления увеличивают скорость горения.

Горение при определенных условиях может переходить в детонацию. По условиям этого перехода ВВ делят на инициирующие взрывчатые вещества (первичные ВВ), промежуточные детонаторы, бризантные взрывчатые вещества (вторичные ВВ) и пороха (метательные ВВ).

Метательными (порохами) называются такие вещества, основной формой взрывчатого превращения которых является горение. Пороха делятся на дымные и бездымные.

Иницирующие взрывчатые вещества обладают высокой чувствительностью к внешним воздействиям (удару, наколу, трению и воздействию огня). Взрыв сравнительно небольших количеств инициирующих взрывчатых веществ в непосредственном контакте с бризантными взрывчатыми веществами возбуждает детонацию последних. Вследствие указанных свойств инициирующие взрывчатые вещества применяются для снаряжения средств взрывания (капсюлей-воспламенителей, капсюлей-детонаторов и запалов). К инициирующим взрывчатым веществам относятся: гремучая ртуть, азид и тринитррезорцинат свинца. Также к ним можно отнести капсюльные составы, которые используются для возбуждения детонации инициирующих взрывчатых веществ или для воспламенения порохов.

Бризантные взрывчатые вещества более мощны и менее чувствительны к внешним воздействиям, чем инициирующие взрывчатые вещества. Возбуждение детонации бризантного взрывчатого вещества производится взрывом капсюля-детонатора или заряда другого бризантного взрывчатого вещества.

Бризантные взрывчатые вещества применяются для снаряжения инженерных боеприпасов в чистом виде, а также в виде сплавов и смесей. К бризантным взрывчатым веществам относятся ТЭН, гексоген, тетрил, тротил и аммиачно-селитренные взрывчатые вещества.

Иницирующие ВВ воспламеняются от слабого импульса и горят в десятки и даже сотни раз быстрее других, их горение легко переходит в детонацию при атмосферном давлении. Горение порохов не переходит в детонацию даже при давлениях в сотни МПа. Бризантные ВВ занимают промежуточное положение между порохами и инициирующими ВВ. В соответствии с этим пороха применяют в режиме горения в ствольном оружии, в качестве твердого ракетного топлива; бризантные ВВ – в режиме детонации для промышленных взрывных

работ, снаряжения боеприпасов и др.; инициирующие и промежуточные детонаторы – для возбуждения взрывчатого превращения других ВВ.

ВВ способны к самопроизвольному термическому разложению, которое со временем приводит к потере необходимых свойств. Способность сохранять эксплуатационные свойства при переработке и хранении (хим. стойкость) – важная характеристика ВВ. Разложение ВВ при затрудненном теплоотводе может привести к саморазогреву и тепловому взрыву. ВВ опасны в обращении. Их взрывчатые превращения вызываются простыми воздействиями, чувствительность к которым всегда учитывается при работе с ВВ.

Важнейшие представители индивидуальных ВВ:

- из ароматических нитросоединений: тринитротолуол (тротил, тол), тринитрофенол, тринитроксиллол и др.;
- из нитраминов: гексоген, октоген, тетрил;
- из нитроэфиров: нитроглицерин, целлюлозы нитраты, пентаэритрит-тетранитрат (ТЭН);
- из солей неорганических кислот: аммония нитрат, аммония перхлорат, свинца азид.

Большинство применяемых ВВ представляют собой смеси (смесевые ВВ), в качестве компонентов которых используют как взрывчатые, так и невзрывчатые соединения. В последнем случае смеси содержат вещества, способные окисляться, или горючее (например, порошкообразный металл, древесная мука), и окислитель (например,  $\text{NH}_4\text{ClO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}_4$ ).

Примерами бризантных смесевых ВВ являются октоген или гексоген и тротил; динамиты – нитроглицерин, нитроглицоль или диэтиленгликоль-диншпрат и древесная мука; аммониты –  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  и нитросоединения; динамоны –  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  и древесная мука или др. орг. горючее; аммоналы –  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  с порошкообразным  $\text{Al}$ ; игданиты –  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  и дизельное топливо; жидкие смеси конц.  $\text{HNO}_3$  или  $\text{N}_2\text{O}_4$  с горючим. Используются также смеси мощных индивидуальных ВВ с флегматизаторами (парафин и др. легкоплавкие вещества), позволяющими улучшить технологические свойства ВВ, снизить их чувствительность к внешним воздействиям. В целях повышения безопасности применения бризантных ВВ в шахтах, опасных по пыли и газу, в их состав вводят пламегасители, или ингибиторы горения, обычно соли щелочных металлов ( $\text{NaCl}$  и др.). Такие смеси называют предохранительными взрывчатыми веществами (антигризутными). Их разновидности – селективно-детонирующие ВВ, представляющие собой смеси  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{NaNO}_3$  и нитроглицерина. Для эксплуатации зарядов при повышенных температурах (напр., при разработке глубоких нефтяных скважин) применяют термостойкие взрывчатые вещества, например, тринитробензол, октоген, диаминотринитробензол, гексанитростильбен.

Главное требование, предъявляемое к порохам, метательным ВВ, – надежная устойчивость горения в жестких условиях применения (быстро растущее давление до десятков и сотен МПа, большие динамические перегрузки, перепады температуры). Оно удовлетворяется введением в смеси связующего (полимера), благодаря которому получают монолитный высокопрочный нехрупкий заряд. В качестве метательных ВВ в ствольных системах используют пороха на основе нитрата целлюлозы: пироксилиновые и баллиститы. В ракетных системах в основном применяют композиции, содержащие небольшое количество полимерного связующего, окислитель (гл. обр.  $\text{NH}_4\text{ClO}_4$ ), горючее ( $\text{Al}$ ), а иногда и мощные индивидуальные ВВ; используют также баллиститы.

Иницирующие ВВ – гремучая ртуть и азид свинца. В случае малочувствительных ВВ инициирующие устройства содержат также небольшой промежуточный заряд бризантного ВВ (промежуточные детонаторы). Для возбуждения горения порохов используют смеси гремучей ртути, свинца тринитрорезорцината или тетразена с добавками, повышающими чувствительность к механическому воздействию.

Ряд взрывчатых смесей на основе таких окислителей, как хроматы, дихроматы, хлораты, пероксиды, оксиды, нитраты металлов, в сочетании с горючими добавками применяют в пиротехнике. Мировое производство ВВ составляет несколько млн. т/год.

Пиротехника – искусство огня. Пиротехнические составы представляют собой механические смеси горючих веществ с окислителями и цементирующими веществами. Часто в пиротехнические составы добавляют флегматизаторы, т.е. вещества, уменьшающие скорость горения. Некоторые пиротехнические составы содержат вещества, сообщающие им специальные свойства: заданную окраску или дымовыделение.

Горючие вещества, входящие в пиротехнические составы, должны легко окисляться с выделением достаточного количества теплоты, быть устойчивыми в заданных интервалах температур, и т.д. Основными компонентами ПС являются алюминий, магний и сплавы на их основе.

В качестве окислителей используют твердые вещества, имеющие температуру не менее  $60^{\circ}\text{C}$ , содержащие в своем составе достаточное для сгорания ГВ количество кислорода. Эти вещества должны легко разлагаться с выделением кислорода, быть устойчивыми в интервале температур от  $-60$  до  $+60^{\circ}\text{C}$  и обладать низкой гигроскопичностью.

Цементаторами называют вещества, обеспечивающие необходимую прочность ПС и заданную форму. Эти вещества не должны снижать ТТХ ПС и активно участвовать в процессе горения. Чаще всего в качестве цементаторов используют различные искусственные и природные смолы, а также легко сохнувшие масла, клеи и неорганические вещества (сера).

Флегматизаторы – это вещества, которые снижают чувствительность ПС к механическим воздействиям и уменьшают скорость горения ПС. К таким веществам относятся парафин, вазелин, различные смолы и масла.

Процесс сгорания ПС состоит из 3 этапов:

- зажжение – создание в ПС местного повышения температуры (использование спец. воспламенительных составов);
- воспламенение – распространение горения по поверхности состава. На скорость воспламенения влияют степень измельчения компонентов, плотность состава, его начальная  $T$  и внешнее давление.
- горение – распространение процесса внутрь состава. Скорость горения ПС во много раз меньше скорости воспламенения. На скорость горения влияют те же параметры, что и на скорость воспламенения. Воспламенение ПС происходит специальными воспламенительными ПС, дымным порошком, огнепроводным шнуром.

Пиротехнические составы классифицируют по характеру действия. Различают осветительные, фотоосветительные, зажигательные, трассирующие ПС; составы сигнальных огней, составы маскирующих дымов, специальные составы. В зависимости от характера процессов, протекающих при горении, выделяют пламенные, термитные, дымовые ПС.

ПС используются не только в военном деле, но и в промышленности и с/х-ве. В промышленности термитные ПС используют для сварки рельсов, труб, электропроводов, при производстве различных сплавов. ПС применяют для накачки лазеров, создания цезиевой плазмы, при исследовании верхних слоев атмосферы. Также ПС могут использоваться для получения газов: кислорода (хлоратные шашки), водорода и др. Получение спичек – также область применения ПС. Сигнальные ПС (аварийные сигналы) применяются на различных видах транспорта. Также – при киносъёмках и для фейерверков.

В с/х-ве ПС используют для окуливания растений (особенно цитрусовых), борьбы с вредителями, дезинфекции хранилищ и винных бочек (серные шашки), разработаны противогодавые составы.

### **Инициация взрыва**

Для того чтобы произошел взрыв вещества, необходимо определенное воздействие на взрывчатое вещество (ВВ). Если инициировать взрывную реакцию в бесконечно малом объеме, это не всегда приведет к взрыву всего вещества, так как температура, инициированная в этом малом объеме, может быть израсходована на нагрев прилежащих слоев вещества, в результате чего произойдет снижение температуры инициации.

Для каждого вещества необходимо, чтобы нагрев происходил в определенном объеме (массе). Только тогда можно говорить о том, что инициированная взрывная реакция приведет к взрыву. Для того чтобы обеспечить успешный взрыв заданного количества вещества, используют детонаторы. Детонаторы – это приспособления, в которых взрыв происходит при незначительном воздействии внешних сил сначала в малом объеме определенного вещества, и энергии этого взрыва достаточно для взрыва заряда в полном объеме. Причиной инициации взрыва детонатора может быть действие тепла, выделяющегося при сгорании огнепроводного шнура или электрической искры. Нагревание вызывает взрыв небольшого, высокочувствительного к воздействию энергии, заряда (например, азида свинца), энергия которого, в свою очередь передается к другому заряду, состоящему из вещества, более устойчивого. Таким веществом может быть тетрил. Взрыв всей массы ВВ происходит под действием взрыва тетрила. Инициация взрыва возможна также при интенсивном ударе (например, воспламенение пистонов в ружейных и револьверных патронах).

Несмотря на то, что инициирование взрыва ударом на практике применяется достаточно редко, для теоретических исследований этот способ инициации взрыва очень удобен. Инициацию взрыва ударом используют для определения чувствительности ВВ к механическим воздействиям для определения условий их использования, хранения и транспортировки.

Установки, на которых происходит испытание ВВ на чувствительность к механическому удару, называют копрами. Удар по образцу установленной массы и размеров производится падающим грузом с бойком. Сила удара зависит от высоты расположения груза. Исследования проводятся при различной высоте падения груза до тех пор, пока каждое падение груза с определенной высоты на образец ВВ не заканчивается взрывом. Так как определение чувствительности ВВ к удару производится на основании статистических данных, результаты эксперимента обычно представляют в виде графика или таблицы.

Характеристикой чувствительности вещества является вероятность взрыва. Под вероятностью взрыва понимают такое состояние испытательной системы, при котором относительное число взрывов будет постоянным по отношению к общему количеству опытов. Под относительным числом взрывов понимают отношение количества взорвавшихся образцов к общему числу испытанных образцов при постоянной высоте падения груза. Таким образом, вероятность взрыва будет зависеть от высоты, на которой находится груз, от массы груза, формы и размера образцов ВВ.

Груз, падающий на образец, приводит к уплотнению последнего и, как следствие, к его нагреву. Зная массу груза, его начальную высоту, а также первоначальные размеры и сжатие образца, можно рассчитать давление, которое груз оказывает на образец (или на единицу площади образца).

При падении груза на образец может произойти не только уплотнение материала, но и его сдвиг. При этом повышение температуры образца в различных его точках может быть неравномерным. В тех точках, где повышение температуры будет максимально, и произойдет инициация взрыва.

ВВ различаются физической природой источника энергии и способом ее высвобождения. Химические ВВ обладают способностью к быстрому химическому разложению, при котором энергия выделяется в виде теплоты. Это приводит к повышению температуры и, как следствие, к увеличению скорости химического разложения. При небольших температурах в таких веществах разложение протекает весьма медленно, и химическое ВВ не претерпевает заметных изменений. Между ВВ и окружающей средой устанавливается равновесие, в результате которого теплота, выделяющаяся при разложении ВВ, невелика, и вся отводится в окружающую среду посредством теплопроводности. Когда возникают условия, нарушающие равновесие, и скорость тепловыделения превышает скорость теплоотвода, развивается самоускоряющийся процесс разложения ВВ, называемый тепловым взрывом. Так как выделение теплоты происходит во всем объеме ВВ, а отвод теплоты происходит только через поверх-

ность ВВ, тепловое равновесие может быть нарушено и при увеличении массы ВВ. Эти факторы учитываются при хранении ВВ.

Основным процессом для других ВВ, в результате которого происходит взрыв веществ, считается сжатие и следующий за ним быстрый и сильный разогрев ВВ. Химическое превращение ВВ распространяется по веществу последовательно, от слоя к слою в виде волны. Процесс передачи взрыва волной сжатия называется детонацией, а сама волна, передающая детонацию, – детонационной волной. Скорость распространения детонационной волны очень высока (всегда превышает скорость звука в данном веществе). Превращение вещества в газ с очень высоким давлением (несколько сотен тысяч атмосфер) происходит за доли секунды, при этом взрывное действие химического ВВ может быть усилено в определенном направлении путем применения зарядов ВВ специальной формы (кумулятивный эффект).

### Гидродинамическая теория детонации

Явление детонации открыто в 1881 г. Бертло и Вьелем. Опыты показывают, что после установления стационарного режима распространение взрывчатого превращения в веществе достигает скорости 3500–4000 м/с. Явление детонации исследовалось также Маляром и Лешателье (распространение пламени в трубах, заполненных горючим газом).

Детонационная волна движется во ВВ так, как если бы ВВ было бы сжимаемой жидкостью. Поэтому в основе теории взрыва лежит гидродинамическая теория детонации; в настоящее время эта теория считается общепризнанной. Основные положения гидродинамической теории детонации были разработаны Михельсоном в 1889 г.

Исходным положением данной теории является то, что реакция разложения ВВ осуществляется в зоне, непосредственно примыкающей к фронту детонационной волны (рис. 10). Фронт детонационной волны, как и фронт пламени, – это область, разделяющая реакцию взрыва и область, где взрыв еще не произошел. Движение фронта детонационной волны происходит с очень большой скоростью. Область, расположенная за фронтом волны детонации, характеризуется высокой температурой и давлением. Такая разница является причиной высокой скорости протекания реакции взрыва в небольшом объеме. В последних работах фронтом детонационной волны принято считать всю зону протекания химических реакций; заднюю границу этой зоны называют плоскостью Чепмена–Жуге. Переднюю границу зоны химических реакций называют фронтом ударной волны (плоскостью химического пика).

Скорость детонационной волны высока и постоянна, и зависит от удельной энергии ВВ и давления взрывных газов. В случае неполного разложения ВВ скорость детонационной волны уменьшается, но в случае развития взрыва неразложившееся вещество вступает в реакцию и скорость детонационной волны увеличивается.

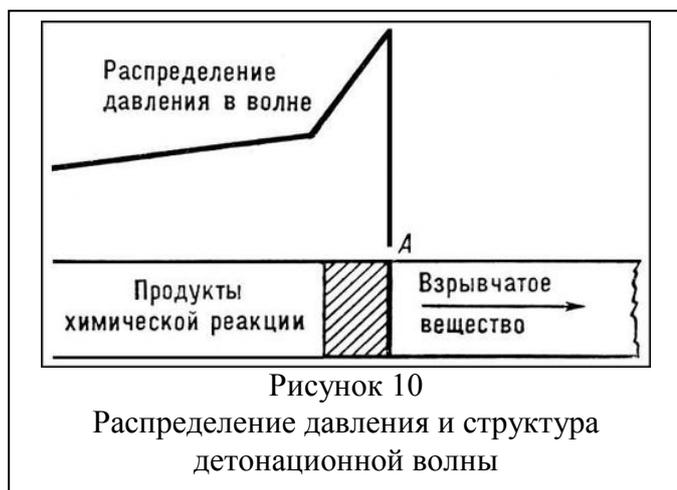
Давление взрывных газов при изменении их объема выражается законом состояния, сформулированным Ландау и Станюковичем (1944 г.)

$$P_1/P_2 = (V_2/V_1)^k$$

где  $P_1$  и  $P_2$  – давления, соответствующие объемам  $V_1$  и  $V_2$ .

Показатель степени  $k$  характеризует жесткость взрывных газов. С увеличением  $k$  сопротивление газа увеличивается и давление растет при уменьшении объема гораздо быстрее.

Если газы сжимаются медленно (давление невелико),  $k = 1$  и давление становится обратно пропорционально объему (закон Бойля–Мариотта). Высокое давление взрывных газов приводит к быстрому сжатию, при этом жесткость газов возрастает. Теоретически установ-



Станюковичем (1944 г.)

лено, что для большинства химических ВВ  $k = 3$ . То есть, при изменении объема в 2 раза давление увеличится в 8 раз.

Чем выше жесткость взрывных газов и удельная энергия взрыва ( $U_1$ ), тем больше будет скорость детонационной волны, которую рассчитывают как

$$D = \sqrt{2(k^2 - 1)U_1g},$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

Условие  $k = 3$  позволяет упростить уравнение:

$$D = 12,6\sqrt{U_1}$$

Обычно величину  $D$  определяют фотографированием и на ее основании рассчитывают энергию взрыва. Давление взрывных газов  $P_D$  за фронтом детонационной волны, также как и скорость волны, зависит от жесткости газов и удельной энергии взрыва:

$$P_D = 2(k-1)\rho U_1g = 4\rho U_1g$$

Плотность ВВ  $\rho$  в технических единицах массы, отнесенных к  $1 \text{ м}^3$ , при умножении на  $g$  является плотностью ВВ  $\gamma$  ( $=\rho g$ ), определяемой в  $\text{кг/м}^3$ . Поэтому можно записать:

$$P_D = 4\gamma U_1$$

Расчеты показывают, что первоначальное давление взрыва очень велико, что и обуславливает разрушающее действие этого процесса. Высокое давление за фронтом детонационной волны приводит к движению взрывных газов в одном направлении с волной детонации со скоростью  $u$ . Для удлиненного заряда с сечением  $1$  и бесконечной длиной можно определить  $u$ . За единицу времени волна пройдет вдоль заряда путь  $D$ . Тогда при  $k = 3$ , а  $g = 10 \text{ м/с}^2$  скорость газа будет равна

$$u = D/(k+1) \text{ (приблизительно } 1/4 D)$$

При любом способе реализации взрыва первым его признаком является звук. Звук взрыва – это первый качественный сигнал, позволяющий контролировать качество взрывных работ. Процесс взрыва начинается с расширения ВГ газов. При взрыве в воздухе ВГ не встречают со стороны воздуха заметного сопротивления и начинают интенсивно расширяться во все стороны в направлении, перпендикулярном свободным поверхностям заряда. Скорость процесса разлета у таких молекул максимальна и нарастает до тех пор, пока к ним передается энергия изнутри массы газа. Этот процесс протекает до тех пор, пока скорость движения наиболее быстрых молекул не достигнет некоторого предельного значения – скорости звука.

Так как волна детонации распространяется по ВВ в результате передачи энергии от сильно сжатых ВГ еще недетонировавшей части заряда со скоростью  $D$ , можно определить скорость звука. Пусть газы движутся со скоростью  $u$ . Энергия газов передается вслед за фронтом волны со скоростью  $v$ . Скорость детонации превосходит скорость движения газов на величину скорости звука. Зависимость скорости звука от скорости движения газов будет иметь вид

$$v = Dk/(k+1); v = ku$$

$$v = 3u \text{ (} k = 3)$$

При боковом расширении продуктов взрыва наиболее быстрые молекулы движутся со скоростью звука ( $v$ ) в направлении, перпендикулярном первоначальной боковой поверхности заряда, а в сторону распространения детонации – со скоростью  $u$ . Обе скорости складываются по правилу параллелограмма, и полученная величина называется результирующей скоростью ( $v$ ). Эта величина и является реальной скоростью движения фронта молекул ВГ, расширяющихся в результате взрыва. При сложении скоростей вектор результирующей скорости отклоняется от перпендикуляра на некоторый угол, величина которого ( $14^{\circ}5'$ ) определяется из условия  $\text{tg}\varphi = u/v = 1/4$ . Сразу же после прохождения волны детонации объем ВГ быстро растет, а давление и температура в них уменьшаются. Вследствие этого близко расположенное к поверхности заряда вещество не успевает разложиться полностью и поэтому энергия взрыва в поверхностном слое выделяется частично.

Если диаметр удлиненного заряда мал, то и энергия взрыва будет мала; следовательно, уменьшится и детонация. При увеличении диаметра энергия взрыва возрастает. Таким образом, варьируя диаметр заряда ВВ можно получить такую величину заряда, при которой детонация затухнет, и взрыв станет невозможен. Предельный (min) диаметр удлиненного заряда, при котором детонация исчезает, называется *критическим диаметром заряда*. Критический диаметр зависит от химического состава ВВ и является очень важной характеристикой ВВ. Чем меньше критический диаметр, тем выше чувствительность ВВ к инициированию при ударе или нагревании. Для тротила критический диаметр составляет 5–7 мм, для азида свинца – около 0,1 мм. Поэтому азид свинца используется в качестве первого звена в детонаторах.

Если необходимо обеспечить взрыв вещества, малочувствительного (имеющего большой критический диаметр), кроме детонатора используют промежуточные заряды (например, тетрил). Все указанное характерно для взрывов в воздухе.

Взрыв в воздухе характеризуется минимальным искажением процесса разлета продуктов взрыва. В связи с этим используемые заряды ВВ по весу минимальны. Перепад давления во фронте ударной волны ( $\Delta P = P_1 - P_0$ ) составляет 5,5 – 0,003 МПа и определяется как разность давлений за и перед фронтом. В предлагаемой диаграмме профиля давления во взрывной волне начало отсчета времени соотнесено с выходом волны взрыва из центра. Импульс положительной фазы сжатия вычисляется интегрированием и вместе с величиной перепада давления считается наиболее важной характеристикой взрывной волны. Для определения некоторых последствий взрыва иногда аналогичным образом определяют импульс отрицательной фазы давления.

Если заряд заключен в плотную оболочку, находится внутри плотной среды, то при взрыве газы не могут быстро расширяться. Способность ВВ в этом случае производить работу резко возрастает, так же, как возрастает энергия взрыва.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Значительную роль в изучении дисциплины выполняют практические занятия, которые призваны, прежде всего, закреплять теоретические знания, полученные в ходе прослушивания и запоминания лекционного материала, ознакомления с учебной и научной литературой, а также выполнения самостоятельных заданий. Тем самым практические занятия способствуют получению наиболее качественных знаний, помогают приобрести навыки самостоятельной работы.

Практические занятия – форма учебного процесса, построенная на практической работе по отработке ранее полученных знаний, формированию умений и навыков. Задачей практических занятий является изучение методов расчета типовых задач, а также практическое осмысление основных теоретических положений курса. При решении задач обращается внимание на логику решения, на физическую сущность используемых величин, их размерность. Далее проводится анализ полученного решения, результат сопоставляется с реальными объектами, что вырабатывает у студентов инженерную интуицию.

Очевидны три структурные части практического занятия: предваряющая (подготовка к занятию), непосредственно само практического занятия (обсуждение вопросов темы в группе, решение задач по теме) и завершающая часть (последующая работа студентов по устранению обнаружившихся пробелов в знаниях, самостоятельное решение задач и выполнение заданий по рассмотренной теме). Не только само практическое занятие, но и предваряющая, и заключающая части его являются необходимыми звеньями целостной системы усвоения вынесенной на обсуждение темы.

Перед практическим занятием необходимо изучить материал, изложенный на лекции и выполнить самостоятельную работу, предусмотренную рабочим планом. Для этого используются: конспект лекций, соответствующие разделы печатных и электронных учебников, ответы на вопросы для самоконтроля знаний, задания для самостоятельной работы. После практического занятия рекомендуется самостоятельно решить задачи.

Семинарские занятия (или семинар) – форма учебного процесса, построенная на самостоятельном изучении студентами по заданию преподавателя отдельных вопросов, проблем, тем для дальнейшего совместного обсуждения. Главной составляющей семинарской работы является самостоятельная работа студента по подготовке теоретического материала. В процессе проведения семинара студенты более глубоко осмысливают учебный материал, а преподаватель может оценить степень их готовности к занятию, уровень понимания обсуждаемых вопросов, прояснить наиболее сложные места.

Подготовка к семинарскому занятию включает 2 этапа: организационный; закрепление и углубление теоретических знаний.

На первом этапе студент планирует свою самостоятельную работу, которая включает:

- уяснение задания на самостоятельную работу;
- подбор рекомендованной литературы;
- составление плана работы, в котором определяются основные пункты предстоящей подготовки.

Одной из форм работы для подготовки к семинару является выполнение доклада и презентации к нему. Презентация как документ представляет собой последовательность сменяющих друг друга слайдов. Демонстрация презентации проецируется на экране. Количество слайдов адекватно содержанию и продолжительности выступления (как правило, 1 слайд соответствует одной минуте доклада).

На первом слайде обязательно представляется тема выступления и сведения об авторах. Следующие слайды содержат фактический материал по теме (текст, таблицы, графики, изображения и т.п.). Содержание доклада должно соответствовать материалу презентации. Подготовленное выступление должно входить во временные рамки регламента.

На каждом занятии для проверки уровня самостоятельной подготовки и углубления знаний по теме решаются задачи или рассматриваются проблемные задания. Закрепления материала происходит при выполнении заданий соответствующей домашней работы. Кроме

того, для контроля над самостоятельной работой и усвоением материала на каждом занятии проводится проверочная работа/тест по теме предыдущего либо текущего занятия.

### **Составление уравнений горения. Определение коэффициента реакции горения и типа горючей смеси**

Цель занятия: Формирование навыков составления уравнений горения и определения основных характеристик горючих веществ

Требования к знаниям:

Состав и свойства основных классов органических и неорганических соединений  
 Стехиометрические уравнения химических реакций  
 Горючее вещество, окислитель, горючая смесь, горючая система  
 Количество вещества, мольные доли  
 Коэффициент горючести  
 Характер свечения пламени

Примеры задач для решения на занятии:

1. Составить уравнения горения метанола, ацетилен, нитротолуола, уксусного альдегида.
2. На основании уравнений горения определить мольные доли горючего вещества, окислителя и азота для приведенных веществ
3. Рассчитать коэффициенты горючести перечисленных в задании 1 веществ.
4. Для веществ, приведенных в задании 1 определить характер свечения пламени

### **Материальный баланс процесса горения: расчет воздуха, необходимого для горения веществ различного состава**

Цель занятия: Формирование навыков составления материальных балансов процессов горения веществ индивидуального состава и топлив в различных агрегатных состояниях

Требования к знаниям:

Состав и свойства основных классов органических и неорганических соединений  
 Стехиометрические уравнения химических реакций  
 Горючее вещество, окислитель, горючая смесь, горючая система  
 Количество вещества  
 Состав воздуха (объемные и массовые доли)  
 Элементный состав топлива  
 Виды топлив

Примеры задач для решения на занятии:

1. Определить объем воздуха, необходимого для сгорания 5,3 кг ксилола при температуре 30 °С и давлении 99,5 кПа. Каков будет коэффициент избытка воздуха, если горения происходит в помещении объемом 80 м<sup>3</sup>.
2. Определить объем воздуха, необходимого для сгорания 29 кг ацетона при температуре 15 °С и давлении 92 кПа, если коэффициент избытка воздуха составляет 1,2.
3. Определить объем воздуха, необходимого для сгорания 100 м<sup>3</sup> доменного газа, если горения протекает в избытке воздуха. Коэффициент избытка воздуха равен 1,5. Состав доменного газа: угарный газ - 27,5 %, водород - 2,8 %, углекислый газ - 12,5 %, метан - 0,65, азот - 56,6 %.

### **Материальный баланс процесса горения: продукты сгорания**

Цель занятия: Формирование навыков составления материальных балансов процессов горения веществ индивидуального состава и топлив в различных агрегатных состояниях

Требования к знаниям:

Состав и свойства основных классов органических и неорганических соединений

Стехиометрические уравнения химических реакций

Горючее вещество, окислитель, горючая смесь, горючая система, продукты сгорания

Состав продуктов сгорания

Количество вещества, объемные доли

Элементный состав топлива

Виды топлив

Примеры задач для решения на занятии:

1. Определить объем продуктов сгорания и их процентный состав, если сгорает 4 кг уксусного альдегида при температуре 15 °С и давлении 740 мм. рт. ст. Коэффициент избытка воздуха 1,5.
2. Сколько этилбензола сгорит в помещении объемом 300 м<sup>3</sup>, если горение прекращается при концентрации кислорода в воздухе 14,8 %. Условия нормальные.
3. Определить объем и процентный состав продуктов сгорания 100 кг древесины, если горение протекает с коэффициентом избытка воздуха 1,2 при температуре 30 °С и давлении 750 мм. рт. ст. Состав древесины: углерод - 46 %, водород - 6 %, кислород - 40 %, влага - 6 %, азот - 2%.

### **Термодинамика процессов горения: определение теплот горения и сгорания. Расчет адиабатической температуры горения веществ индивидуального состава и топлив**

Цель занятия: формирование навыков расчета тепловых эффектов процессов горения веществ индивидуального состава и топлив в различных агрегатных состояниях, определения температуры горения

Требования к знаниям:

Состав и свойства основных классов органических и неорганических соединений

Стехиометрические уравнения химических реакций

Горючее вещество, окислитель, горючая смесь, горючая система

Количество вещества

Элементный состав топлива

Виды топлив

Закон Гесса

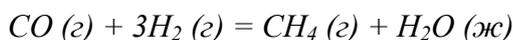
Термодинамические характеристики и способы их определения

Низшая и высшая теплота сгорания топлив

Температура горения, классификация

Примеры задач для решения на занятии:

1. На основании стандартных теплот образования и абсолютных стандартных энтропий вычислите интервал температур, в котором возможно самопроизвольное протекание реакции:



2. Рассчитать низшую и высшую теплоту сгорания топлива в соответствии с составом, приведенным в таблице. Состав задан по рабочей массе топлива.

Название вещества	С	Н	О	N	S	влага	зола
Каменный уголь	76,0	4,8	3,6	2,8	1,8	2,8	8,2

3. Рассчитать адиабатическую температуру горения ацетилен
4. Рассчитать адиабатическую температуру горения каменного угля. Состав которого приведен в задании 2.

### **Температурные пределы распространения пламени. Температура самовоспламенения и особенности ее расчета для различных классов соединений**

Цель занятия: Формирование навыков определения количественных характеристик процессов воспламенения и горения смесей различного состава и агрегатного состояния

Требования к знаниям:

Состав и свойства основных классов органических и неорганических соединений  
 Температурные показатели пожарной опасности веществ  
 Парциальное давление  
 Уравнение Антуана

Примеры задач для решения на занятии:

1. Рассчитать температуру самовоспламенения 2,2-диметилпентана
2. Рассчитать температуру самовоспламенения 2-метил-1-пропанола
3. Рассчитать температуру самовоспламенения 1,2-диметилбензола

**Концентрационные пределы воспламенения. Расчет стехиометрической концентрации горючего вещества**

Цель занятия: Формирование навыков определения количественных характеристик процессов воспламенения и горения смесей различного состава и агрегатного состояния

Требования к знаниям:

Состав и свойства основных классов органических и неорганических соединений  
 Стехиометрическая концентрация  
 Стехиометрические уравнения химических реакций  
 Концентрационные пределы распространения пламени  
 Флегматизаторы и их назначение

Примеры задач для решения на занятии:

1. Рассчитать стехиометрическую концентрацию и концентрационные пределы воспламенения паров ацетиленов при н.у. и при заданных ( $p = 110$  кПа,  $t = 35$  °С) условиях. Расчеты всех параметров выполнить в объемных % и в г/м<sup>3</sup>.
2. Определить для вещества, указанного в задании 1 МФК, МВСК, НТПР
3. Построить зависимость КПР указанного вещества от концентрации флегматизатора
4. Для газовой смеси заданного состава рассчитать концентрационные пределы воспламенения при н.у. Расчеты всех параметров выполнить в объемных %.

СО	Н <sub>2</sub>	СН <sub>4</sub>	СО <sub>2</sub>	О <sub>2</sub>	Н <sub>2</sub>	Н <sub>2</sub> S	2,2-диметил-1 пропанол
15,0	60,0	0,5	4,5	3,7	10,0	1,3	5,0

**Воспламенение и возгорание горючих смесей. Инициация горения и взрыва**

Цель занятия: Формирование знаний о процессах воспламенения и возгорания

Требования к знаниям:

Теории горения веществ  
 Теории самовоспламенения  
 Воспламенение и возгорание

Вопросы для обсуждения на занятии:

1. Теория окисления и ее недостатки
2. Теория цепных реакций
3. Цепные реакции в техносфере
4. Тепловое самовоспламенение
5. Диаграмма Н.Н. Семенова
6. Необходимые и достаточные условия теплового самовоспламенения
7. Цепное самовоспламенение
8. Температура самовоспламенения и ее зависимость от различных факторов
9. Период индукции
10. Процессы воспламенения и возгорания

11. Температура воспламенения

12. Процессы, происходящие с веществами в различном агрегатном состоянии при горении

**Параметры взрыва паро- и газозвудушных смесей. Давление и температура взрыва. Мощность взрыва и безопасное расстояние по действию воздушных ударных волн**

Цель занятия: Формирование навыков расчета параметров взрыва

Требования к знаниям:

Взрыв

Взрывчатые вещества

Кислородный баланс взрывчатых веществ

Параметры взрыва

Воздействие взрыва на ОС

Примеры задач для решения на занятии:

1. Рассчитать температуру и давления взрыва паровоздушной смеси по приведенным параметрам

Вещество	Концентрация, %	Начальная температура, °С	Давление, МПа
этанол	1,6	27	0,08

2. Рассчитать тротиловый эквивалент возможного взрыва смеси паров этанола с воздухом (концентрация этанола – по нижнему КПВ) и определить безопасное расстояние по действию ударной воздушной волны: в технологическом оборудовании и в облаке

**Расчет избыточного давления при взрыве горючих веществ.**

Цель занятия: Формирование навыков расчета параметров взрыва

Требования к знаниям:

Взрыв

Взрывчатые вещества

Кислородный баланс взрывчатых веществ

Параметры взрыва

Воздействие взрыва на ОС

Примеры задач для решения на занятии:

Рассчитать избыточное давление взрыва газо-воздушной смеси в лаборатории, определив ее размеры (в свободном объеме и при текущем заполнении оборудованием и мебелью). Принять  $K_1 = 2$  и  $K_1 = 3$ . Сравнить полученные результаты. Сделать вывод о влиянии наличия оборудования и внешних факторов на параметры взрыва.

Вещество	Удельная теплота сгорания, МДж/кг	Начальная температура, лето/зима, °С	z
Бутан	2,78	30/18	0,5

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМУ

Лабораторные занятия являются важной составной частью учебного процесса. В рамках этих занятий по дисциплине «Теория горения и взрыва» предполагается изучение процессов горения, выработка практических навыков проведения экспериментальных исследований.

Цель лабораторного практикума – формирование навыков самостоятельного выполнения заданий на базе существующих методик для достижения желаемого результата.

До начала занятия студенту необходимо ознакомиться с теоретическим материалом, соответствующим данной теме.

Выполнение работы включает несколько этапов:

формулировка и обоснование цели работы;

определение теоретического аппарата применительно к данной теме;

выполнение задания;

анализ результатов;

практическое применение изученной методики (выводы);

защита работы.

Индивидуальные задания представлены конкретно-практическими и творческими задачами.

На первой ступени изучения темы выполняются конкретно-практические задачи, при решении которых формируется минимальный набор умений. Преподаватель опосредованно руководит познавательной деятельностью студентов, консультирует и подробно разбирает со студентами возникшие затруднения в ходе решения задачи, обращает внимание группы на возможные ошибки.

Вторая ступень изучения темы дифференцируется в зависимости от степени усвоения его обязательного уровня. Студенты, усвоив содержание типовых методов и приемов решения задач, приступают к решению творческих задач. Если уровень знаний и умений, демонстрируемых студентом при контрольном обследовании, не соответствует установленным требованиям, студент вновь возвращается к стандартным упражнениям, но под более пристальным наблюдением преподавателя.

После изучения отдельной темы курса дисциплины каждый студент получает оценку по результатам выполнения поставленной задачи.

Лабораторный практикум предполагает выполнение следующих работ:

1. Инструктаж по технике безопасности при работе с горючими веществами. Контроль остаточных знаний по пререквизитам.
- 2-3. Определение основных характеристик процесса горения.
4. Продукты сгорания.
- 5-6. Определение температуры вспышки.
7. Особенности горения и возгорания веществ в различных средах и различных агрегатных состояниях.
8. Определение критического зазора для взрывоопасной смеси.
9. Критерии фугасного поражения (работа с номограммами и диаграммами). Экспертная оценка воздействия ударной волны на человека и другие биообъекты.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Для успешного усвоения материала студент должен кроме аудиторной работы заниматься самостоятельно. Самостоятельная работа студентов – вид деятельности, при котором в условиях систематического уменьшения прямого контакта с преподавателем студентами выполняются учебные задания. Целью самостоятельной работы студентов является формирование навыков самостоятельного получения новых знаний в определенных областях во взаимосвязи с уже полученными знаниями. Условием эффективности самостоятельной работы студентов является ее систематическое выполнение.

Результаты выполнения самостоятельной работы учитываются в индивидуальном рейтинге студентов.

### *Цели и задачи самостоятельной работы:*

- расширение и углубление теоретических знаний;
- формирование и развитие навыков самостоятельной работы с литературными и Internet-источниками информации;
- формирование способности к приобретению новых профессиональных знаний с использованием современных образовательных и информационных технологий;
- формирование способности к самостоятельному применению методов и средства познания, обучения и самоконтроля для приобретения новых знаний и умений в областях, непосредственно не связанных со сферой профессиональных компетенций;
- привитие навыков анализа, синтеза, сравнения, обобщения и использования полученной информации;
- приобретение практических навыков работы с документами разного уровня сложности и навыков конспектирования;

Самостоятельная работа студентов по дисциплине предусматривается в следующих формах:

- проработка конспектов лекций;
- работа с учебной литературой и Интернет-ресурсами;
- предварительная подготовка к лабораторным занятиям;
- выполнение отчетов по лабораторным работам;
- подготовка к защите лабораторных работ;
- подготовка к мероприятиям промежуточного контроля;
- выполнение расчетно-графических работ;
- подготовка к сдаче коллоквиумов;
- подготовка к зачету.

В структуре содержания самостоятельной работы по дисциплине можно выделить два основных блока: изучение теоретических основ и формирование практических навыков.

Все формы СРС, а также методы контроля способствуют многократному повторению материала, что, в свою очередь, позволяет студенту лучше запомнить термины и определения, понять изучаемый материал, разобраться в алгоритме решения задач и выполнения лабораторных работ. Таким образом, СРС как одна из активных форм обучения студентов способствует формированию у них знаний, умений и навыков, направленных на самостоятельное, творческое решение задач, возникающих в практической деятельности.

Для успешного освоения курса студенты обязаны самостоятельно выполнить ряд работ:

- изучить предлагаемые преподавателем темы теоретического материала и представить их в виде сжатого конспекта, пройти собеседование;
- выполнить в указанные сроки варианты расчетно-графических работ по предложенным темам;
- подготовиться к выполнению лабораторных работ, оформляя в лабораторной тетради проведение опытов, а затем к защите лабораторной работы, пройдя собеседование;
- подготовиться к выполнению заданий промежуточного контроля на аудиторных и внеаудиторных занятиях по изученным темам.

После изучения темы теоретического материала, выполнения лабораторной работы и освоения расчетных методик студентам предлагается выполнить либо письменную проверочную работу, либо тест. Работа выполняется на отдельных бланках, содержащих задания, варианты ответов (закрытые задания) и место для выполнения открытых заданий. Для успешной подготовки к текущему контролю студентам предлагаются вопросы для изучения и задания.

### Коллоквиум

Коллоквиум сдается группой студентов из 4-5 человек и состоит из теоретического вопроса и практикоориентированного задания (используется технология «Мозговой штурм»). После успешного ответа на теоретический вопрос, выслушанного и дополненного (при необходимости) товарищами, каждый студент получает конкретное практикоориентированное задание, решение которого предполагает как знание теоретического материала по теме коллоквиума, так и сформированную к моменту изучения данного материала профессиональную компетентность. На подготовку к ответу по заданию студенту отводится не более 15 минут. Ответ на задание после его изложения обсуждается группой.

#### *Вопросы для подготовки к коллоквиуму 1. Теоретические основы процессов горения*

1. Температура самонагрева и способы ее определения. Факторы, влияющие на температуру самонагрева. Переход самонагрева в горение.
2. Тепловое самовозгорание различных органических и неорганических веществ.
3. Микробиологическое самовозгорание.
4. Химическое самовозгорание.
5. Теории горения газо- и паровоздушных смесей. Пожаро- и взрывоопасность смесей.
6. Определение температуры и давления при взрыве газо- и паровоздушных смесей.
7. Определение избыточного давления взрыва для различных веществ.
8. Концентрационные пределы воспламенения и методики их расчета. Использование концентрационных пределов воспламенения.
9. Влияние различных факторов на концентрационные пределы воспламенения (температура, давления, примеси, турбулентность, источник зажигания, агрегатное состояние горючего вещества).
10. Факторы, определяющие горения жидкостей. Процессы, протекающие при горении жидкостей и их влияние на скорость выгорания. Вскипание и выброс жидкости при горении.
11. Особенности горения твердых веществ. Стадии горения и процессы, протекающие при горении твердых веществ (горение металлов и древесины, пиролиз полимеров).
12. Пожарная опасность горючих веществ. Категории помещений по пожарной опасности.
13. Экологические проблемы, связанные с процессами горения в техносфере.

#### *Вопросы для подготовки к коллоквиуму 2. Взрывчатые вещества и их воздействие на ОС*

1. Основные типы взрывчатых веществ (ВВ), способы их классификации.
2. Удельная энергия взрывчатых веществ, ее определение и влияние на поведение взрывчатых веществ.
3. Инициация взрыва. Чувствительность ВВ к детонации. Критический диаметр детонации. Кислородный баланс ВВ.
4. Превращение ВВ при различных воздействиях. Физические и химические взрывы. Воздействие взрывов на ОС.
5. Используемые ВВ (динамиты, баллиститы, аммониты, динамомиты), их основные компоненты. Продукты взрыва, их зависимость от условий проведения взрыва и влияние на ОС.
6. Использование ВВ.

### **Расчетно-графические работы**

Расчетно-графические работы предназначены для проверки освоения теоретического материала и навыков выполнения расчетов, практического применения полученных знаний по разделам дисциплины, а также текущего контроля знаний студентов по разделам дисциплины. При необходимости выполнение этих работ поддерживается консультациями преподавателя.

РГР выполняются в отдельной тетради или на листах формата А-4. Индивидуальные задания для выполнения РГР выдаются старосте группы после изучения соответствующей темы и сдаются в установленные сроки. Срок сдачи каждой РГР оговаривается при выдаче работы (обычно – в течение 2 недель с момента выдачи). После проверки задания при наличии в нем ошибок задание отдается на доработку. При сдаче РГР позже установленного срока оценка за него снижается (в индивидуальный рейтинг студента начисляются штрафные баллы).

#### *Тематика расчетно-графических работ*

1. Материальный баланс процессов горения. Расчет процессов горения веществ индивидуального состава и газообразных, твердых и жидких топлив.
2. Тепловой баланс процессов горения. Расчет теплоты сгорания веществ индивидуального состава и топлив в различном агрегатном состоянии, температуры горения, температуры самовоспламенения и температурных пределов распространения пламени.
3. Расчет концентрационных пределов воспламенения и стехиометрической концентрации горючих смесей.
4. Параметры взрыва газо- и паровоздушных смесей. Расчет максимального давления и температуры взрыва. Определение мощности взрыва и безопасного расстояния по действию ударной волны.
5. Определение параметров взрыва в замкнутом объеме (помещении).