

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГОРЕНИЯ

Одним из фундаментальных свойств пламени, впервые установленным В. А. Михельсоном, является способность его к самопроизвольному распространению. Возникнув в результате воздействия источника зажигания, пламя в дальнейшем самостоятельно перемещается по горючей смеси с некоторой скоростью. Установление связи скорости распространения пламени со скоростью химической реакции и теплофизическими свойствами горючей смеси представляет одну из основных задач теории горения.

Рассматриваемые ниже явления имеют также самое непосредственное отношение к повседневной практической деятельности органов пожарной охраны, так как пожар — это прежде всего система с распространяющимся горением. Основные количественные параметры, характеризующие этот процесс, — скорость распространения пламени и скорость выгорания в основном и определяют изменение площади и температурного режима пожара во времени. Поэтому знание законов распространения горения позволяет в принципе определять или прогнозировать динамику развития пожара, т. е. направление и скорость горения.

Горение на пожаре является чрезвычайно сложным многофакторным процессом. Классические законы организованного горения проявляются и на пожаре, но они существенно осложнены рядом случайных факторов, предвидеть которые заранее или даже установить в процессе пожара не всегда удастся. Поэтому умение правильно прогнозировать поведение вещества или материала в условиях пожара, оценить влияние тех или иных условий, при которых возможно протекание горения, немыслимо без глубоких знаний современных представлений по теории горения.

ГОРЕНИЕ ГАЗОВ

Кинетическое горение газов

Кинетическое горение представляет собой горение предварительно перемешанных смесей горючего и окислителя. Это наиболее простой, поддающийся теоретическому анализу вид горения, вследствие чего он является и наиболее изученным.

На пожаре этот вид горения встречается сравнительно редко. Его можно наблюдать, главным образом, на стадии воспламенения: при самовоспламенении или зажигании. Иногда он имеет место при пожарах технологического оборудования, и по внешнему проявлению этот режим горения обычно воспринимается как взрыв или вспышка.

Структура кинетического пламени. Для понимания механизма распространения пламени по смеси газообразного горючего и окислителя

приведем следующую принципиальную схему. При распространении горения по некоторой системе исходную смесь от продуктов горения отделяет узкая светящаяся зона, называемая фронтом пламени. Фронт пламени представляет собой трехмерную область, в которой начинается и завершается химическая реакция взаимодействия горючего с окислителем. В этой зоне в виде теплоты сгорания выделяется вся потенциальная (химическая) энергия топлива и температура повышается до максимального значения — температуры горения. В зоне перед фронтом пламени концентрация исходных компонентов почти не меняется, поскольку химическое взаимодействие между ними не протекает и температура горючей смеси равна начальной. Непосредственно перед фронтом пламени** (зоной химической реакции) (концентрация реагентов понижается, главным образом, вследствие разбавления ее продуктами реакции. Во фронте пламени в результате химической реакции горения концентрация исходных компонентов резко снижается до нуля, а температура достигает максимального значения. Вследствие молекулярной теплопроводности температура перед зоной химической реакции монотонно повышается от начальной температуры горючей смеси до температуры, близкой к температуре горения, образуя зону физического прогрева.

Для большинства углеводородных смесей фронт пламени представляет собой яркую зону свечения, которую можно наблюдать визуально или зарегистрировать с помощью фотосъемки. Свечение фронта пламени имеет химическую природу, является ; результатом превращения вещества и определяется радикалами/ Сг, СН и НСО. При этом толщина зоны свечения соответствует толщине зоны реакции.

Как будет показано ниже, толщина зоны пламени не превышает, как правило, долей миллиметра, поэтому условно фронт пламени считают поверхностью. Это значительно облегчает рассмотрение и теоретический анализ явления, позволяя параметры горения относить не к единице объема, а к единице поверхности фронта пламени.

Стационарные и нестационарные пламена. В зависимости от условий протекания процесса горения фронт пламени может быть неподвижным или движущимся. В первом случае имеет место стационарное пламя, а во втором — нестационарное или движущееся.

Стационарное пламя можно наблюдать на бунзеновской горелке, где пространственное расположение фронта пламени фиксировано. В этом случае устанавливается динамическое равновесие между вытекающим из сопла горелки потоком свежей горючей смеси и встречным перемещением фронта пламени.

Нестационарное сферическое пламя образуется при инициировании

(зажигании) горения в большом объеме невозмущенной горючей смеси. В этом случае фронт пламени представляет собой сферическую поверхность, диаметр которой возрастает пропорционально скорости и времени горения. Нестационарное пламя с плоским или искривленным фронтом пламени можно наблюдать в трубе Коварда—Джонса, представляющей собой вертикально расположенный стеклянный сосуд, заполненный горючей смесью.

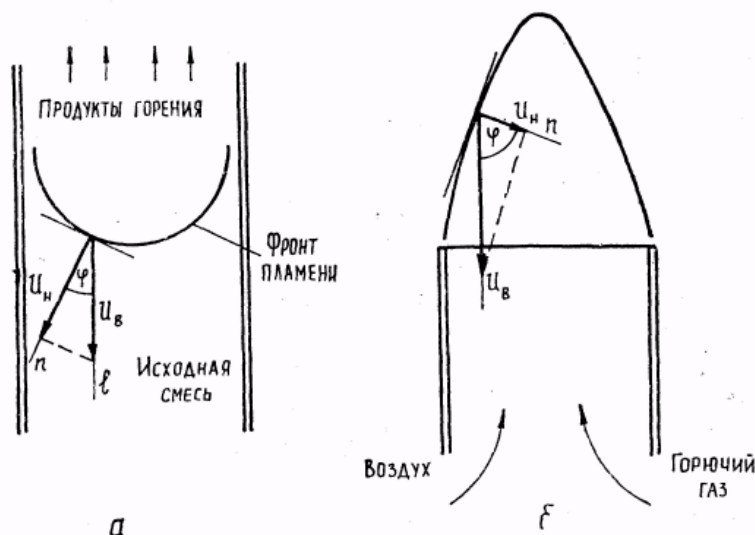


Рис. 6.3. Схема распространения пламени по однородной горючей смеси
 а — труба Коварда — Джонса; б — горелка Бунзена

Понятие нормальной скорости распространения пламен. В теории горения различают видимую и нормальную скорости.

Элементы тепловой теории распространения пламени. Существуют две теории, объясняющие природу распространения пламени по горючей смеси — диффузионная и тепловая.

Согласно первой теории, перемещение зоны химической реакции в пространстве связано с диффузией активных частиц — радикалов из зоны химической реакции, где при высокой температуре они образуются в избытке в свежую смесь. Обладая чрезвычайно высокой реакционной способностью (т. е. очень малым значением энергии активации), они способны уже при нормальной температуре являться центрами химической реакции взаимодействия горючего с окислителем. Поэтому, попадая в относительно холодную свежую горючую смесь перед фронтом пламени, они инициируют химическую реакцию горения и тем самым осуществляется перемещение фронта пламени в пространстве.

Принимая во внимание, что $T^{\wedge}T_T$, можно вывести выражение для нормальной скорости:

С учетом уравнения Аррениуса (для скорости химической реакции) выражение (6.9) примет следующий вид:

$$u_n = \frac{\sqrt{2 Q \lambda \kappa \varphi_{\Gamma}^{n_1} \varphi_{\text{ок}}^{n_2} e^{-\frac{E}{RT}} \frac{RT_{\Gamma}^2}{E}}}{c_p \rho_0 (T_{\Gamma} - T_0)}$$

λ , c_p , ρ_0 — соответственно теплопроводность, теплоемкость и плотность горючей смеси;

u_n — нормальная скорость распространения пламени; Q — тепловой эффект химической реакции; w — скорость химической реакции.

Это выражение показывает, что нормальная скорость распространения пламени является функцией ряда физико-химических свойств смеси и скорости химической реакции при температуре горения, а именно:

Следовательно, толщина фронта пламени может быть представлена как сумма толщин зон физического подогрева и химической реакции. Она изменяется обратно пропорционально скорости горения.

С увеличением скорости горения толщина зоны пламени уменьшается. Для большинства смесей углеводородных топлив в воздухе, у которых нормальная скорость не превышает $1,0 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, толщина зоны пламени составляет $0,1\text{--}1,0 \text{ мм}$.

Влияние некоторых факторов на величину нормальной скорости горения. Нормальная скорость распространения пламени является одной из важных характеристик пожарной опасности газообразных веществ. Как следует из (6.9), ее величина зависит от химической природы горючего и окислителя, физических и теплофизических параметров горючей смеси (c_p , ρ_0 , H , T_0 , T_{Γ} , Q), т. е. она определяется физико-химическими свойствами горючей смеси, являясь, по определению В. А. Михельсона, ее фундаментальной характеристикой. Сущность горения заключается в том, что оно не может существовать, не распространяясь, и изменение условий его протекания приводит к изменению величины нормальной скорости распространения горения.

Сущность тепловой теории заключается в том, что от поверхности фронта пламени, где достигается максимальная температура, к свежей смеси за счет теплопроводности передается поток тепла. Под его действием происходит разогрев смеси до температуры самовоспламенения, в результате происходит самопроизвольная химическая реакция. Поскольку тепловой поток передается непрерывно, происходит последовательное воспламенение горючей смеси, т. е. перемещение фронта пламени по свежей горючей смеси.

Деление механизма распространения пламени на тепловой и диффузионный является условным и отражает недостаточно полное представление о фактическом механизме процесса. Тепловая теория может быть применима при различных механизмах реакции в пламени, если только соблюдается подобие полей температур и концентраций. Диффузионная теория применяется при цепном механизме в пламени и особенно в тех случаях, когда велика концентрация атомов водорода в зоне реакции. По-видимому, на самом деле в процессе перемещения фронта пламени по свежей горючей смеси существенны оба фактора: и тепловой, и диффузионный, т. е. имеет место диффузионно-тепловой механизм распространения пламени.

Для смесей с высокой скоростью распространения форма фронта пламени приближается к полусфере, что значительно облегчает расчет поверхности фронта пламени. В медленно горящих смесях форма фронта пламени значительно сложнее и это затрудняет вычисления, снижая его точность. Поэтому этот метод применяется для быстрогорящих смесей.

Диффузионное горение газа

На пожаре в основном встречается диффузионное горение, когда скорость лимитируется (определяется) скоростью образования горючей смеси, т. е. смешением горючего с окислителем (кислородом воздуха) за счет диффузии.

Типичное диффузионное пламя образуется при сгорании горючего газа, вытекающего из трубки в атмосферу воздуха. Когда скорость струи невелика, граница пламени устойчивая, пламя на вид «гладкое», горение протекает спокойно. С увеличением скорости истечения высота пламени пропорционально возрастает (рис. 6.10). Такое горение является ламинарным.

Хотя в большинстве случаев на практике приходится иметь дело с диффузионными турбулентными пламенами, большая часть научных работ посвящена исследованию ламинарных диффузионных пламен, более доступных для лабораторных исследований и теоретического анализа.

Структура диффузионного пламени. Согласно общепринятым представлениям, при горении вытекающего горючего газа в атмосферу воздуха кислород последнего, диффундируя через слои продуктов горения,

поступает к зоне горения, где вступает в химическую реакцию окисления с горючим (рис. 6.11,а).

Вследствие диффузии окислителя из окружающей среды концентрация горючего на некотором расстоянии от среза горелки x_6 снизится с 100% до верхнего концентрационного предела воспламенения и с этого момента станет возможным протекание

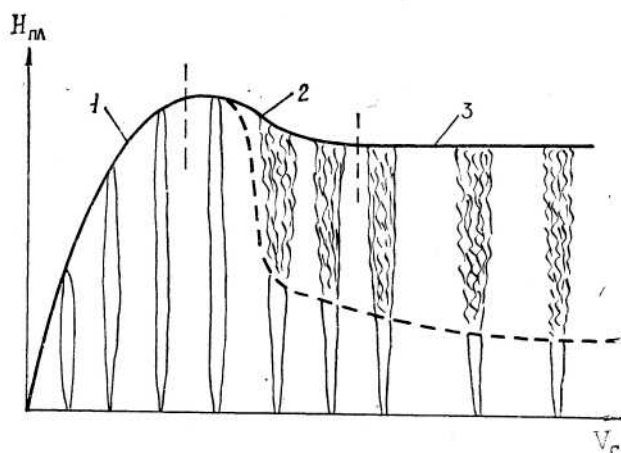


Рис. 6.10. Изменение высоты пламени от скорости истечения газа из горелки постоянного диаметра 1 — ламинарный режим горения; 2 — переходный режим горения; 3 — турбулентный режим горения

химической реакции (рис. 6.11,б). Из-за большого избытка горючего в этой области образуются в основном продукты неполного окисления (CO , CH_4 , углерод и т. п.). Образование в этой области углерода обуславливает ярко-желтое свечение диффузионного пламени. По мере расходования горючего и повышения концентрации окислителя, скорость химической реакции изменяется в соответствии с графиком.

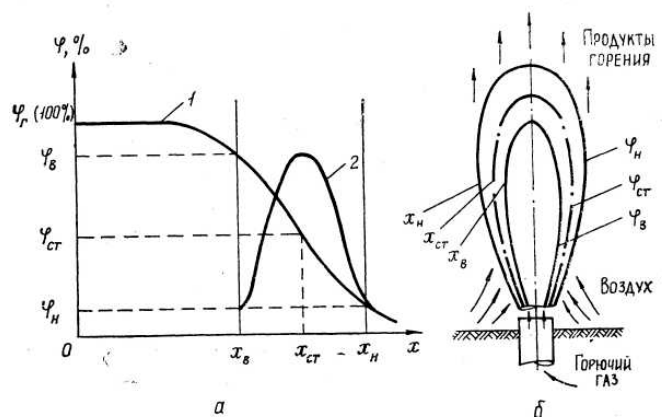


Рис. 6.11. Структура диффузионного ламинарного пламени а — схема горения газового фонтана; б — изменение концентрации горючего (1) и скорости химической реакции (2) во фронте пламени

Высота диффузионного пламени. Ее зависимость от различных факторов.

В работах по диффузионным пламенам нормальная скорость горения, как это принято для кинетических смесей, как правило, не определяется. В отличие от кинетического горения скорость диффузионного горения, рассчитанная, например, как расход газа, отнесенный к элементу конической поверхности пламени, зависит от коэффициента диффузии окислителя, диаметра горелки, т. е. не является константой процесса горения.

Поэтому для диффузионных пламен в настоящее время ограничиваются определением лишь высоты факела пламени. Исходя из соображений размерности,

$$H_{пл} \sim \frac{vr^2}{D} ,$$

где $H_{пл}$ — высота пламени, м;

v — скорость истечения газа, м/с; r — радиус струи горючего газа (горелки), м; D — коэффициент диффузии окислителя в продуктах реакции, м²/с.

В работах Блинова В. И. и Худякова Г. Н. получена более полная зависимость для определения высоты диффузионного факела пламени:

где k — количество граммов окислителя, необходимое для окисления 1 г горючего;

ρ — плотность горючего газа, кг/м³;

ϕ_0 — концентрация окислителя вдали от пламени, кг/м³.

Проведем анализ выражения (6.14) с точки зрения соответствия их опыту. Из формулы следует, что отношение высоты факела пламени $H_{пл}$ к объемному расходу газа vr^2 , или весовому расходу ρvr^2 , не должно зависеть от расхода горючего газа. Действительно, согласно данным Бурке и Шумана, при изменении расхода метана в воздухе от $17,9 \cdot 10^{-6}$ до $5,9 \cdot 10^{-6}$ м³/с высота пламени изменяется с $25,1 \cdot 10^{-2}$ до $8,6 \cdot 10^{-2}$ м, при этом отношение высоты пламени к объемному расходу газа остается практически постоянным и составляет $1,2 \cdot 10^4$ с/м².

Распространение пламени в турбулентном потоке.

Турбулентное горение является наиболее распространенным видом горения, встречающимся на практике. Ведущее место в теоретическом и экспериментальном исследовании турбулентного горения занимают работы Щелкина К. И., Хитрина Л. Н., Щетинкова Е. С., Талантова А. В., Соколика А. С. и др.

Диффузионное турбулентное горение можно наблюдать в лабораторных условиях. При истечении горючего газа, начиная с некоторой скорости, когда число Рейнольдса больше 2300, граница пламени становится неустойчивой, причем неустойчивость возникает вначале лишь у вершины пламени, а затем, по мере увеличения скорости подачи горючего, распространяется к срезу горелки. При этом наблюдается заметное уменьшение высоты пламени (см. рис. 6.10). При большем увеличении расхода газа высота пламени или слабо меняется, или остается практически постоянной, пламя отрывается от среза горелки и устанавливается на некотором расстоянии. Такое пламя называют приподнятым.

Турбулентное движение характеризуется беспорядочным нерегулярным изменением величины и вектора скорости со временем в каждой точке потока.

Картина турбулентного движения в принципе аналогична молекулярному движению, где вместо хаотического движения молекул происходит такое же движение макрочастиц — отдельных объемов газа, при этом сами эти объемы не являются устойчивыми в пространстве и во времени. Траектории объемов газа при развитой турбулентности очень сложны, что приводит к его сильному перемешиванию, вследствие чего весьма сильно интенсифицируется горение, в частности, увеличивается скорость распространения пламени. Турбулизация потока происходит от следующих причин:

- при движении смеси, при котором число Рейнольдса больше 2300;
- от воздействия завихрителей и тел с плохо обтекаемой формой;
- от обратного воздействия процесса горения на характер движения смеси.

Турбулентность имеет статистическую природу: в течение длительного промежутка времени средняя скорость потока в данной точке является постоянной величиной. Однако мгновенная скорость потока непрерывно отклоняется от среднего значения.

Разность между мгновенной и средней скоростями движения потока называют пульсационной скоростью:

$$\Delta v = v_i - v_{cp}$$

где Δv — пульсационная скорость, м/с; v_i — мгновенная скорость, м/с; v_{cp} — средняя скорость, м/с.

Кроме пульсационной скорости, различают среднеквадратичную пульсационную скорость $v_{СК}$, которая является одной из основных величин, характеризующих турбулентность:

$$(6.16)$$

Другой характерной величиной для турбулентного горения является масштаб турбулентности или длина пути смешения l_T , представляющий собой путь, на протяжении которого перемещающийся объем газа не изменяет своей скорости, температуры и состава.

По аналогии с молекулярным переносом при турбулентном движении за скорость молекул может быть принята среднеквадратичная пульсационная скорость, а за длину их свободного пробега — масштаб турбулентности. В этом случае к турбулентному движению можно применить положения кинетической теории газов, согласно которой, коэффициенты массо- и теплопереноса (коэффициент теплопроводности, коэффициент диффузии, коэффициент кинематической вязкости) пропорциональны произведению среднеквадратичной пульсационной скорости на масштаб турбулентности:

где a , D_T , ν_T — соответственно коэффициенты теплопроводности, диффузии и кинематической вязкости турбулентного переноса.

Турбулентные коэффициенты переноса в сотни и тысячи раз больше соответствующих коэффициентов молекулярного переноса. Поэтому и перенос массы и тепла в турбулентном потоке в тысячи раз выше, чем в ламинарно движущемся или неподвижном газе. Это связано главным образом с тем, что длина пути смешения (масштаб турбулентности) на несколько порядков выше длины свободного пробега молекул. Величина же пульсационной скорости меньше скорости движения молекул. Пульсации скорости в турбулентном потоке вызывают также и пульсации концентрации, давления и температуры. Под температурой турбулентного движущегося газа понимают ее усредненное по времени значение. Истинная температура газа испытывает такие же нерегулярные хаотические пульсации, как и скорость. Следует особо подчеркнуть при этом, что скорость химической реакции, например, реакции горения, нельзя рассматривать как функцию средней температуры, поскольку она весьма сильно зависит от температуры

(уравнение Аррениуса).

В случае горения предварительно перемешанной кинетической смеси различают мелкомасштабную и крупномасштабную турбулентность. Если масштаб турбулентности l_T меньше толщины фронта пламени δ , турбулентность является мелкомасштабной, в том случае, когда масштаб турбулентности больше толщины фронта пламени, — крупномасштабной.

При мелкомасштабной турбулентности повышение скорости сгорания объясняется увеличением скорости массо- и теплопереноса в зоне пламени. Увеличение скорости распространения пламени в этом случае по сравнению с нормальной скоростью в неподвижной горючей смеси пропорционально значению коэффициентов температуропроводности при турбулентном и молекулярном теплопереносе:

где $u_{m,T} > u_n$ — соответственно скорость распространения пламени при мелкомасштабной турбулентности и нормальная скорость в неподвижной и ламинарно движущейся горючей смеси;

a_m, a — соответственно коэффициенты турбулентной и молекулярной температуропроводности.

Согласно модели, разработанной Щелкиным К. И., при крупномасштабной турбулентности происходит раздробление фронта пламени. Турбулентное пламя состоит как бы из отдельных объемов свежей смеси, горящих с нормальной скоростью и окруженных со всех сторон продуктами горения, имеющими высокую температуру — температуру горения. Распространение горения происходит за счет «забрасывания» пламени в свежую смесь в результате турбулентных пульсаций. Эта модель известна как эстафетная передача горения. Исходя из ее положений, величина турбулентной скорости пропорциональна нормальной скорости и относительному увеличению поверхности горения:

F — суммарная поверхность фронта горения при крупномасштабной турбулентности;

F_0 — поверхность фронта пламени при горении в неподвижной или ламинарно движущейся смеси.

В дальнейшем Талантов А. В., анализируя увеличение поверхности фронта пламени, предложил скорость турбулентного горения принимать равной

сумме нормальной скорости и среднеквадратичной скорости пульсаций, что более полно соответствует модели «забрасывания» пламени турбулентными пульсациями:

$$u_T = u_n + v_{ск} . \quad (6.18)$$

Наряду с турбулентностью, вызванной характером движения горючей смеси, имеет место и турбулентность, порождаемая пламенем. Она существует лишь в зоне турбулентного горения.

Модель поверхностного турбулентного горения имеет границы

применения. Она справедлива лишь в условиях, когда характерное время турбулентного горения $\tau_T = \frac{l_T}{v_{ск}}$ выше для такового в случае нормального горения $\tau_n = \frac{\delta}{u_n}$

Если $\tau_T < \tau_n$, т. е. когда характерное время турбулентного горения ниже нормального, справедлив механизм объемного горения. Ведущее место в разработке теории объемного турбулентного горения принадлежит Щетинкову Е. С. и Саммерфильду М.

В противоположность поверхностной модели, в которой скорость горения не зависит от масштаба турбулентности, скорость объемного турбулентного горения пропорциональна квадратному корню из масштаба турбулентности.

Поверхностная и объемная модели представляют собой предельные случаи турбулентного горения. В реальных условиях возможны любые промежуточные стадии.

Горение на пожаре, как уже отмечалось, в подавляющем большинстве случаев протекает в диффузионном режиме в условиях развитой турбулентности. Появление пульсационной скорости приводит к взаимному переносу целых объемов воздуха и горючего. Это резко интенсифицирует процесс массообмена, и следовательно, скорость горения.

При турбулентном режиме горения отношение высоты пламени к расходу газа в 10^4 раза больше, чем при ламинарном. Отсюда следует, что интенсивность турбулентного горения на несколько порядков выше ламинарного. На участке турбулентного горения с увеличением расхода газа величина несколько снижается. Так, при увеличении расхода в 6 раз, с 5 до $30 \text{ м}^3/\text{с}$, значение $H_n J V_r$ снизилось в 2,5 раза. Эти результаты показывают, что с повышением скорости истечения струи на участке турбулентного горения продолжается интенсификация процесса смешения горючего с окислителем и, следовательно, растет скорость диффузионного горения.

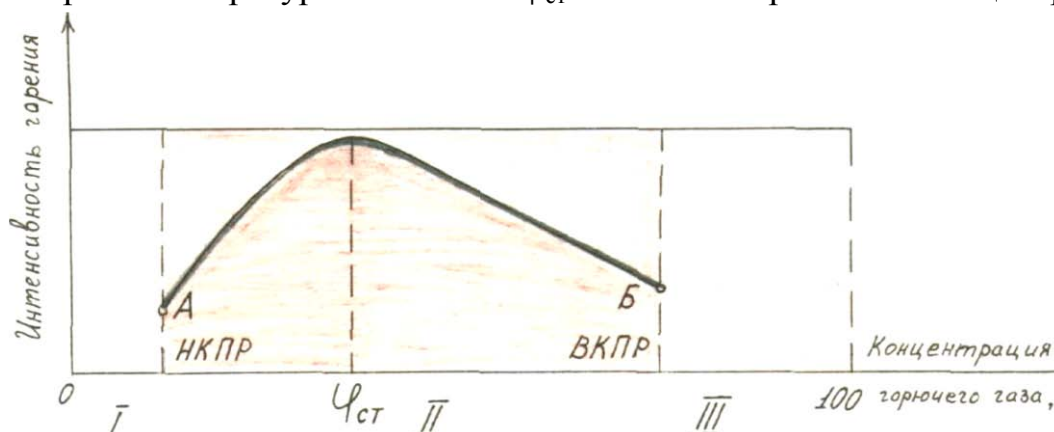
Образование взрывопожароопасных газовоздушных смесей в производственных условиях и оценка их пожарной опасности.

Образование взрывоопасных (в/о) и пожароопасных (п/о) смесей может происходить в различных технологических процессах, связанных с производством, хранением, применением, перекачкой или перевозкой горючих газов или жидкостей.

Поведение готовых газо- или паровоздушных смесей при горении отличается: большими скоростями, резким ростом t -ры и давления (до 10-кратного), т.к. горение является кинетическим.

Принятые сокращения:

- НКПР (НКПВ) - нижний концентрационный предел распространения пламени (воспламенения)
- ВКПР (ВКПВ) - верхний концентрационный предел распространения пламени (воспламенения)
- КПР (КПВ)- концентрационные пределы распространения пламени
- в/о - взрывоопасный п/о - пожароопасный
- t -ра – температура $\varphi_{ст}$ – стехиометрическая концентрация



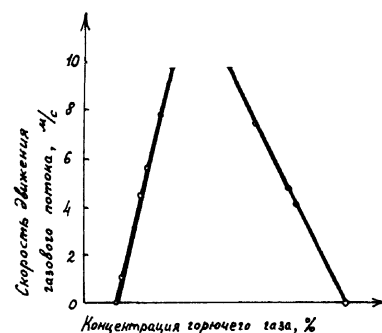
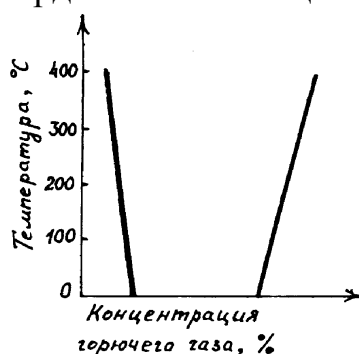
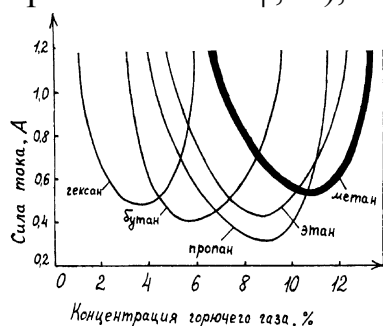
- I. Область безопасных концентраций
- II. Область воспламенения (взрывоопасных концентраций)
- III. Область пожароопасных концентраций

Нижним (верхним) концентрационным пределом распространения пламени наз. минимальное (максимальное) содержание горючего в смеси “горючее вещество - окислительная среда”, при котором возможно распространение пламени по смеси на любое расстояние от источника зажигания.

Чем ниже НКПР и шире область воспламенения, тем опаснее газ.

Зависимость концентрационных пределов распространения пламени (КПР) от различных факторов.

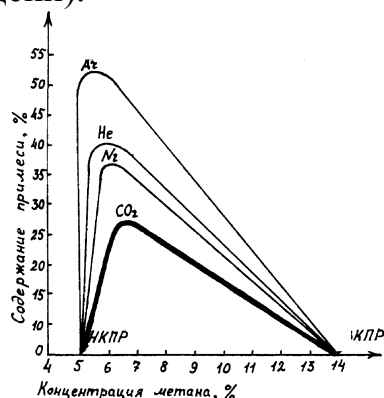
В приведённых ниже зависимостях, в отличие от общепринятого способа, по оси абсцисс отложена зависимая величина (концентрация горючего газа – φ , %), по оси ординат – влияющий фактор.



1. Зависимость КПР от мощности источника зажигания (силы тока в цепи).

2. Зависимость КПР от начальной t -ры смеси

3. Зависимость КПР от скорости движения газового потока.



4. Влияние примесей негорючих газов на КПР метано-воздушных смесей.

5. Зависимость КПР от давления.

6. Зависимость КПР газозвушных смесей от диаметра сосуда.

1. Допустимая энергия искрового разряда в производственных условиях для газо-паровоздушных смесей не должна превышать 0,4 минимальной энергии зажигания. Большое влияние на воспламеняющую способность электрических искр оказывают имеющиеся в цепи индуктивные сопротивления (дрессели, реле и т.п.).
2. С повышением температуры увеличивается скорость химической реакции, и область воспламенения расширяется. При предельных концентрациях смеси, сильно разбавленные горючим или воздухом, становятся горючими при высоких температурах.

3. Турбулентное движение газа, возникающее при его движении, затрудняет воспламенение из-за теплоотдачи в свежий газ и через стенки трубопровода.
4. Влияние инертных газов зависит от их теплоёмкости и теплопроводности. Эта зависимость используется при объёмном тушении. Некоторые смеси (галогидуглеводороды) способны подавить воспламенение при добавлении малых концентраций.
5. Горючие смеси различных веществ при повышении давления ведут себя неодинаково, что объясняется физико-химическими свойствами горючей смеси. Заметное изменение КПР наблюдается только при пониженном давлении.

При уменьшении объёма и диаметра сосуда (или потока) увеличивается поверхность теплоотдачи, приходящейся на единицу объёма смеси. Для каждого горючего газа существует минимальный объём и диаметр, ниже которого он не способен воспламениться при любом соотношении с воздухом. Этот принцип используется при работе огнепреградителей.