Лекция №12

Диффузионное горение.

1.Диффузионное горение газов. Высота ламинарного и турбулентного диффузионного факела.

2.Горение паров над поверхностью жидкости как диффузионное горение. Характеристики горючих жидкостей. Температура вспышки, температурные пределы воспламенения жидкости. Температура воспламенения жидкости.

3.Скорость выгорания жидкостей.

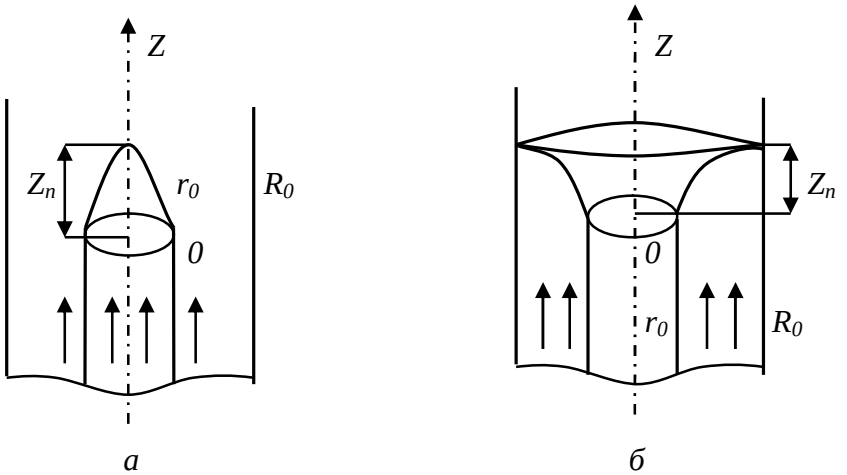
(I)

До сих пор мы рассматривали горение предварительно перемешанных горючих смесей, которые специально приготавливаются ещё до начала горения путём смешивания реагентов при низких температурах. Но очень часто в технических устройствах, в природных условиях и в быту встречаются другие виды горения, когда горючее и окислитель пространственно разделены и заранее не перемешаны. Химическая реакция горения между окислителем и горючим в таких условиях может произойти только после смешения реагентов в результате молекулярной или турбулентной диффузии, поэтому этот вид горения называется диффузионным.

Примером диффузионного горения служат: горение свечи, капель горючего в камерах сгорания, пожары и т.п.

Главное отличие диффузионного горения от горения заранее перемешанных горючих смесей состоит в том, что скорость химического превращения при диффузионном горении лимитируется процессом смешения окислителя и горючего: даже если скорость химической реакции очень велика, интенсивность горения ограничена условиями смешения. Поэтому в теориях диффузионного горения основным допущением является мгновенное протекание химических реакций.

Рассмотрим наиболее важный пример диффузионного горения. Пусть струя горючего вытекает из трубы радиуса r_0 в поток окислителя, который движется с той же скоростью по трубе большего радиуса R_0. Рис.1.



а *б*

Рис.1. Схема диффузионного горения в концентрических потоках окислителя и горючего. а) Избыток подаваемого окислителя б) Недостаток подаваемого окислителя

Пламя располагается на срезе трубки, через которую подаётся горючее и устанавливается там, где диффузионные потоки реагентов находятся в стехиометрическом отношении.

Оценим высоту факела при ламинарном потоке реагентов. Очевидно, что самая высокая точка факела расположена на оси Z, и время движения частиц горючего от среза горелки до верхней точки факела Z_h равно:

$$t_1 = \frac{Z_h}{V} \qquad (1)$$

V – скорость потока

Время достижения в точке Z_h концентрации окислителя соответствующей стехиометрическому составу определяется молекулярной диффузией в горизонтальном направлении и оценивается из соотношения:

$$X^2 = 2Dt_2 \qquad (2)$$

D – коэффициент диффузии

При стационарном факеле $t_2 = t_1$, а $X^2 = Kr_0^2$, из условия $t_2 = t_1$ имеем:

$$Z_h = \frac{Kr_0^2 V}{2D} = \frac{K\pi r_0^2 V}{2\pi D} \sim \frac{\text{объёмный расход}}{D} \qquad (3)$$

Коэффициент пропорциональности K зависит от стехиометрического отношения.

В случае турбулентного потока в выражении (3) достаточно заменить коэффициент молекулярной диффузии на его турбулентный аналог D_m. Для свободных турбулентных потоков хорошие результаты даёт теория пути смешения, согласно которой:

$$D_m = U_m l_m \qquad (4)$$

U_m – пульсационная составляющая скорости

l_m – интегральный масштаб турбулентности или путь смещения

$U_m \approx K_v V$ (V – осреднённая, глобальная скорость потока)

$l_m \approx K_l Z$

В результате:

$$D_m = K_v K_l V Z$$

Подставляя это выражение в (3) получаем:

$$Z_h = K_\Sigma * r_0 \qquad (5)$$

Таким образом, из (3) и (4) следует, что при ламинарном режиме потока высота диффузионного факела зависит от объёмного расхода горючего, а следовательно от скорости потока. При турбулентном режиме потока высота факела не зависит от скорости, а пропорциональна радиусу источника поступления горючего. Рис.2.

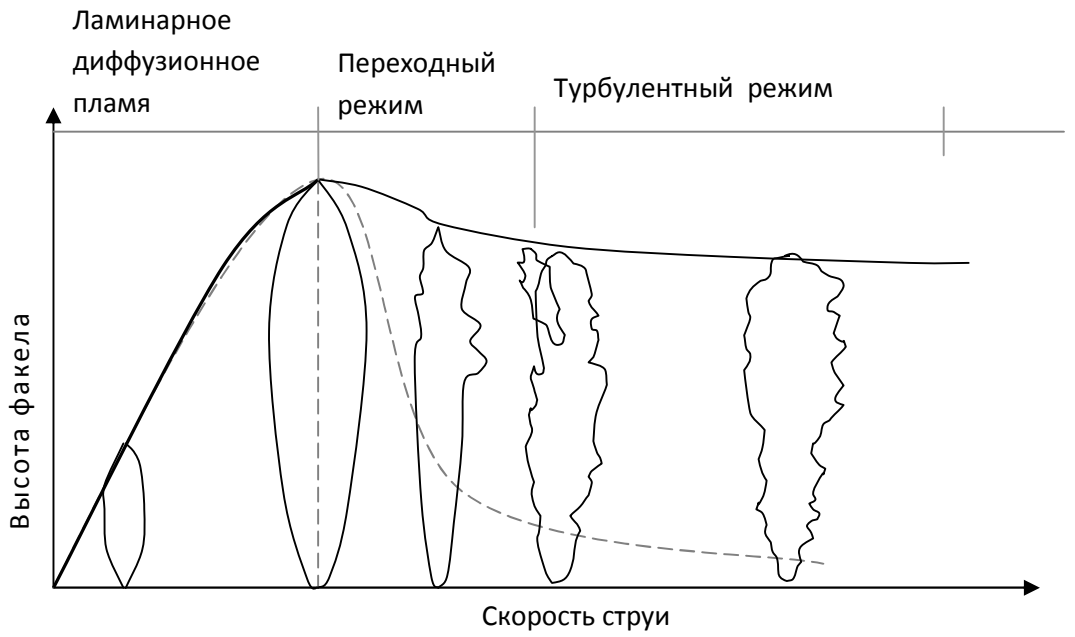


Рис.2. Изменение высоты пламени как функция скорости подачи горючего.

(II)

Наиболее важными примерами диффузионного горения являются горение пролитой горючей жидкости и горение при пожаре многих твёрдых горючих материалов. Рассмотрим в первую очередь горение жидкости. Опыт показывает, что горение происходит в паровой фазе и диффузионный факел располагается над поверхностью жидкости. Таким образом, первой стадией в процессе горения является испарение горючей жидкости.

Скорость испарения жидкости зависит от величины теплового потока, который падает на поверхность жидкости из зоны горения и от теплофизических свойств жидкости. Пролив горючей жидкости образует потенциально пожаровзрывоопасную ситуацию, и степень опасности этой ситуации зависит от скорости испарения и от состава паровоздушной среды, которая формируется над поверхностью жидкости. Равновесное состояние системы, состоящей из нескольких фаз, характеризуется кривыми фазовых равновесий. Рис.3.

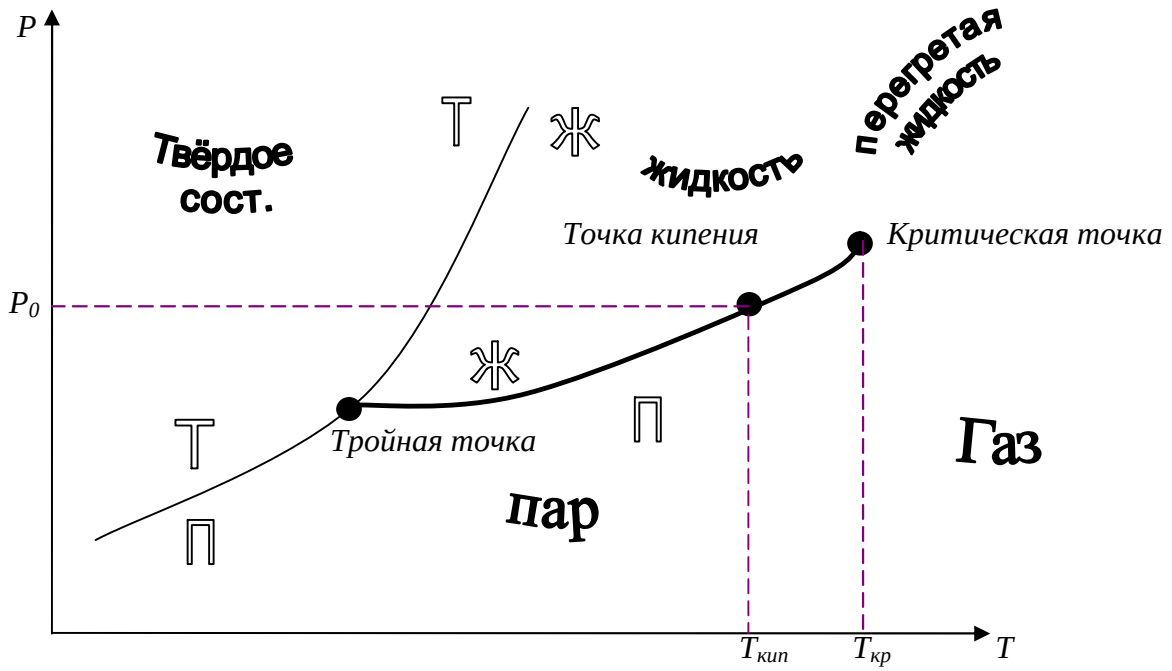


Рис.3. Диаграмма PT.

Линии разделяют фазы, вдоль линий соблюдается равновесие между фазами. Т – тройная точка. $T_{кип}$ – температура кипения, характеризуется тем, что равновесное давление пара равно внешнему давлению. $T_{кр}$ – критическая температура, справа от неё существует только газовая фаза.

Зависимость P(T) вдоль линии пар жидкость описывается уравнением Клаузиуса-Клапейрона:

$$ln\frac{P_1}{P_0} = -\frac{\Delta H}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0}\right) \qquad (6)$$

Это выражение даёт возможность определять температуру равновесного насыщенного пара T_1 при давлении P_1, если известно давление пара P_0 при температуре T_0. В качестве температуры T_0 чаще всего удобнее принимать температуру кипения, при которой давление паров равно внешнему давлению, в обычных условиях это атмосферное давление P_0 = 101,3 кПа.

Теплота испарения может быть взята из справочников или оценена с помощью формулы, например, Трутона-Кистявского:

$$\Delta H_u = T_{кип}(8{,}75+4{,}57lgT_{кип}) \qquad (7)$$

ΔH_u – теплота испарения кал/моль

$T_{кип}$ – температура кипения ^0K

В формуле (6) универсальная газовая постоянная равна R = 1,987 кал/моль^0

Температура, при которой давление насыщенных паров над горючей жидкостью соответствует нижнему концентрационному пределу воспламенения, называется нижним температурным пределом воспламенения $T_{нпв}$.

Пример: Оценить $T_{нпв}$ жидкого углеводорода с эффективным молекулярным весом $\mu_э$ = 175 и температурой кипения $T_{кип}$ = 240 ^0C.

Решение:

1)Оценим брутто формулу вещества, представив её в виде C_xH_{2x+y}; $y \leq 2$

Запишем условие, вытекающее из молекулярного веса:

$12x+2x+y = 175$

Предположим $y=0$, тогда $x=175/14 = 12,5$

Брутто формула $C_{12,5}H_{25}$

Так как наше вещество представляет смесь углеводородов, то структурной формулы не существует, но можно представить, что на брутто молекулу $C_{12,5}H_{25}$ имеется одна двойная связь.

Теплота сгорания определяется по формуле:

$Q = (48,97n+10,52m+x)$ кал/моль

n – число атомов кислорода, необходимое для полного сгорания вещества

m – число молей образующейся воды

x – поправка в пределах гомологического ряда, для двойной связи x=21

Для определения n и m запишем стехиометрическое отношение для уравнения реакции:

$$C_{12,5}H_{25} + \frac{37,5}{2}(O_2 + 3,77N_2) = 12,5CO_2+12,5H_2O+70,688N_2$$

$n = 37,5$

$m = 12,5$

$Q = 48.97*37,5+10,52*12,5+21 = 1969,9$ ккал/моль

Принимаем, что нижний концентрационный предел воспламенения соответствует критическому тепловому потоку $q_{кр}$=435 ккал/м^3 смеси. Число молей горючего вещества в 1 м^3 смеси $Z=435/1969,9 = 0,221$ моль/м^3. Мольная или объёмная доля горючего:

$$\nu_г = \frac{0,221 \cdot 22,4}{1000} = 4,95 \cdot 10^{-3}$$

$C\%_{об.} = 0{,}495\ \%$

Парциальное давление горючего:

$P_1 = \nu_г P_0 = 4{,}95 * 10^{-3} * 101{,}3 = 0{,}5$ *кПа*

Нижний температурный предел воспламенения жидкости:

Из (6) $T_1 = \frac{T_0}{1 - \frac{RT_0}{\Delta H} ln \frac{P_1}{P_0}}$

Теплота испарения $\Delta H_u = T_{кип}(8{,}75 + 4{,}57 lg T_{кип}) = 10842{,}38$ *кал/моль*

$T_1 = \frac{513}{1 - \frac{1{,}987 * 513}{10842{,}38} ln \frac{0{,}5}{101{,}3}} = 342^0 K$, *или* $69^0 C$

Этот результат означает, что при температуре $69^0 C$*, насыщенные пары нашей жидкости будут иметь концентрацию соответствующую нижнему концентрационному пределу воспламенения. Величина нижнего температурного предела воспламенения* $T_{нпв}$ *сильно зависит от температуры кипения. Для углеводородов с* $\mu = 175$ *температура кипения может изменяться в пределах* $200\text{-}250^0 C$*. Допустим, что* $T_{кип} = 200^0 C$*, тогда:*

$\Delta H_u = 473(8{,}75 + 4{,}57 lg 473) = 9920{,}77$ *кал/моль*

$T_{нпв} = \frac{473}{1 - \frac{1{,}987 * 473}{9920{,}77} ln \frac{0{,}5}{101{,}3}} = 314{,}7^0 K$, *или* $41{,}7^0 C$

Если паровоздушная смесь над жидкостью, имеет температуру $T_{нпв}$ *и находится в равновесии с жидкостью, то произойдёт вспышка смеси, но дальнейшего горения жидкости не последует.*

Для того, чтобы вспышка паровоздушной смеси привела в дальнейшем к её устойчивому стационарному горению, необходимо чтобы температура жидкости была выше чем Тнпв и концентрация пара была больше, чтобы их вспышка могла обеспечить испарение новой порции пара, которая, в свою очередь может подхватить первоначальную вспышку. Но для того чтобы последующие порции пара могли гореть, в зоне горения должно быть достаточно воздуха, а это может быть только в случае, если воздух имеет возможность поступить туда из окружающего пространства. Поступление воздуха в зону горения может быть достаточным, если в системе его хватает или он может поступать в систему извне. Минимальная температура жидкости, при достижении которой жидкость продолжает гореть после первоначальной вспышки от внешнего источника зажигания, называется температурой воспламенения $T_{вос}$*. Определяют эту температуру экспериментально в специальных приборах (тиглях). Существуют открытые и закрытые тигли. В открытых тиглях насыщение не достигается, так как пары постоянно диффундируют из объёма тигля, а в закрытом тигле поджиг смеси производится до наступления насыщения. Аналогично температуре воспламенения устанавливается опытным путём температура вспышки. Температура вспышки* $T_{вс}$ *– это минимальная температура, при которой впервые происходит воспламенение от внешнего источника зажигания, паровоздушной смеси (также как и* $T_{нпв}$*), в специальных условиях, реализуемых в тиглях. В отличии от определения* $T_{нпв}$*, пар в*

тигле ненасыщенный. Очевидно, что давление паров при температуре вспышки такое же, как и при $T_{нпв}$ (состав соответствующий $C_{нкпв}$), поэтому после вспышки, горения жидкости не происходит. Между температурой вспышки, температурой воспламенения и нижним температурным пределом существует связь в виде неравенства:

$$T_{нпв} < T_{вс} < T_{вос} \qquad (8)$$

Аналогично определению $T_{нпв}$ вводится верхний предел воспламенения $T_{впв}$, когда давление насыщенных паров соответствует составу верхнего концентрационного предела воспламенения.

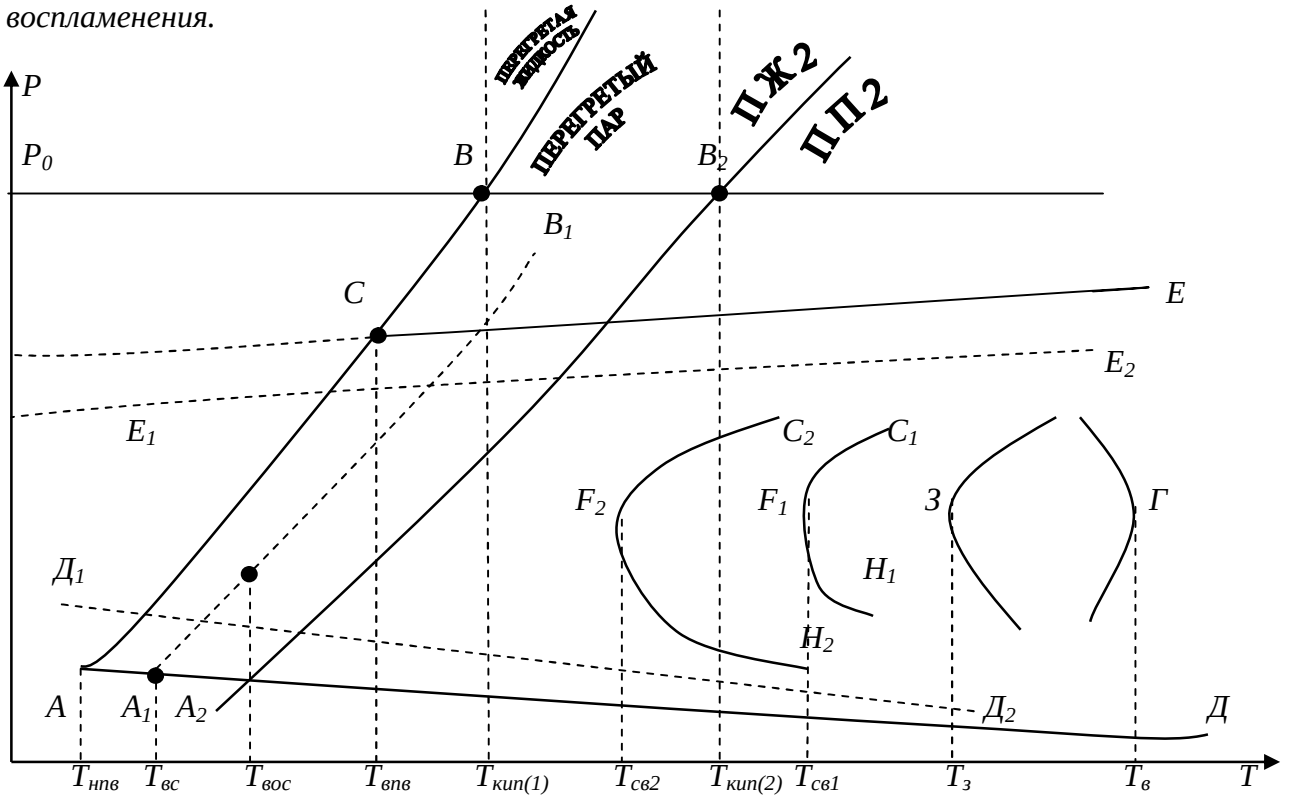


Рис.4. Связь между различными температурами при горении жидкости.

AB – кривая равновесия пар – первая жидкость.

A_1B_1 – кривая состояния неравновесного пара в тигле для первой жидкости.

A_2B_2 – кривая равновесия пар – вторая жидкость.

Температура кипения второй жидкости выше температуры кипения первой жидкости.

АД и $Д_1Д_2$ – линии $C_{нкпв}$ для первой и второй жидкостей.

CE и E_1E_2 – линии $C_{вкпв}$ для первой и второй жидкостей.

$T_{нпв}$, $T_{вс}$, $T_{вос}$, $T_{впв}$, $T_{кип(1)}$, $T_{св1}$, $T_з$, $T_в$ – температурный ряд для первой жидкости, температура стоящая слева меньше температуры стоящей справа. $T_{св}$ - температура самовоспламенения смеси пара с воздухом.

$T_з$ – температура зажигания посторонним источником.

$T_в$ – температура горения (продуктов горения).

P_0 – давление окружающей среды (обычно P_0=101,3 кПа).

Кривая C_2, F_2, H_2 – самовоспламенение второй жидкости.

Кривая C_1, F_1, H_1 – самовоспламенение первой жидкости.

З – кривая зажигания.

Г – кривая температуры продуктов сгорания.

Вторая жидкость представляет случай, когда температура кипения выше температуры воспламенения. Такая ситуация возможна для высокомолекулярных жидкостей, так как для углеводородов температура кипения увеличивается с увеличением молекулярного веса, а температура самовоспламенения в основном понижается. Следует отметить, что температуры $T_{нпв}$, $T_{вс}$, $T_{вос}$, $T_{кип}$ и теплота испарения (её нужно затратить), характеризуют способность жидкости испаряться, то есть образовывать горючие смеси в газовой фазе. Способность испаряться не зависит от кинетических характеристик вещества, которые определяются энергией связи внутри молекул, а зависит от энергии связи между молекулами. Температура самовоспламенения зависит от низкотемпературной кинетики (цепные реакции) и от энергетики смеси, температура зажигания определяется высокотемпературной кинетикой и энергетикой смеси, температура горения определяется только энергетикой.

Температура вспышки и воспламенения в отличие от $T_{нпв}$ и $T_{впв}$ не являются чистыми характеристиками вещества, а зависят ещё от конструкции прибора и методики испытания (кривых для неравновесного пара существует много с разной степенью насыщенности пара 90%, 80% и т.д.). Поэтому для идентификации измерений $T_{нпв}$ и $T_{впв}$ этого не требуется, они уже определены по определению. Температуры самовоспламенения и зажигания также зависят от аппаратных условий: размеров и формы сосуда, размеров и формы источника зажигания. Температура продуктов горения зависит только от свойств смеси. Температура кипения однозначно определяется свойствами жидкости – это физическая величина характеризующая жидкость. Встаёт резонный вопрос насколько температура вспышки характеризует горючую жидкость полнее в реальных ситуациях, по сравнению с $T_{нпв}$, ведь в реальных аварийных ситуациях пар скорее ненасыщен. Но ведь он ненасыщен по-разному в каждой отдельной ситуации.

Например, при проливе жидкости в открытой атмосфере насыщенность пара будет зависеть от времени года, от времени суток, от скорости ветра и в результате реальные ситуации будут отличаться друг от друга, более значимо, чем отличаются между собой величины $T_{нпв}$ и $T_{вс}$. В конечном счёте, всё определяет квалификация специалиста по безопасности. Если на рис.4 ещё отложить температуру жидкости в технологической установке, температуру окружающей среды, которые могут располагаться относительно температур уже нанесённых на рисунок многими вариантами, то перед нами предстанут все возможные сценарии развития аварии при выбросе жидкости. Поскольку температура вспышки в строгом смысле не является физической характеристикой горючей жидкости, то её определение через физические параметры всегда содержит некие эмпирические константы. В нашу задачу не входит

приведение здесь зависимостей для оценки $T_{вс}$ и $T_{вос}$, укажем только на то, что температура вспышки превышает Тнпв на несколько градусов для жидкостей, чей нижний температурный предел воспламенения $T_{нпв}<50^0C$. С ростом Тнпв эта разница растёт. Верхний температурный предел менее используемая величина при оценке возможных сценариев развития аварийных ситуаций, связанных с обращением горючих жидкостей. Один из возможных вариантов примера обращения к $T_{впв}$ – это опорожнение резервуаров с жидкостью, имеющей температуру выше $T_{впв}$. Если опорожнение проводить достаточно медленно, так чтобы успевало испариться необходимое количество паров, и их концентрация всё время превышала $C_{вкпв}$, то в резервуаре не сможет произойти воспламенение.

(III)

При горении пролива жидкости или горении жидкости в резервуаре, пары жидкости поступают в зону горения после испарения в результате естественной или вынужденной конвекции. Процесс горения жидкости включает в себя ряд последовательных стадий: испарение (кипение) жидкости, формирование струи пара над поверхностью жидкости, смешение и реагирование пара с кислородом воздуха.

Скорость горения жидкости определяется интенсивностью тепло и массопереноса в газовой и жидкой фазах, кинетикой испарения и горения топлива. Химическая реакция горения протекает в газовой фазе на некотором расстоянии от поверхности жидкости, так как пары должны смешиваться с воздухом, а ещё прогреться до температуры близкой и температуре горения, которая существенно больше, чем температура кипения жидкости. Кислород, необходимый для горения, поступает в зону горения из окружающего воздуха, а пары горючего со стороны поверхности жидкости. Зона пламени отделяет область, где имеется кислород и нет горючего, от области, в которой существуют только пары горючего. Горение жидкого топлива является горением его паров, в основе которого лежит химическая реакция окисления, протекающая в гомогенной парогазовой фазе. Сгорание паров жидкости горючего происходит интенсивно, практически мгновенно после их подвода и смешивания с воздухом, а скорость выгорания определяется скоростью испарения топлива, как наиболее медленного из этих двух последовательных процессов. В связи с этим под скоростью выгорания понимают массу топлива, испарившегося при горении с единицы поверхности жидкости в единицу времени. Массовая скорость выгорания (m) связана с линейной (u) и плотностью жидкости ($\rho_ж$) соотношением:

$$m = \rho_ж u \qquad (9)$$

Опыт показывает, что после воспламенения довольно быстро устанавливается стационарный режим горения, который характеризуется постоянством скорости выгорания и температуры поверхности жидкости. Переходный период, определяющий разгорание топлива, обычно не рассматривается, и определение скорости выгорания относится к стационарному процессу горения.

Очевидно, что скорость испарения определяется интенсивностью теплообмена жидкости с газовой средой и с поверхностью пролива или стенками резервуара.

Тепло к жидкости поступает путём теплопроводности, конвекцией и излучением от факела пламени. Иногда в тепловой баланс необходимо включить член, учитывающий теплообмен между жидкостью и поверхностью, на которую пролита жидкость. Для криогенных жидкостей (жидкий метан, жидкий водород и т.д.) большое значение имеет тепловой поток от грунта, что увеличивает скорость выгорания, наоборот, для зимних условий при проливе на холодный грунт скорость выгорания обычных жидкостей меньше.

Оставляя пока в стороне последние два случая, полагаем что тепло к поверхности поступает путём теплопроводности, конвекцией и излучением. Для суммарного теплового потока q можно записать:

$$q = \frac{\lambda}{d}(T_{\text{п}} - T_{\text{кип}}) + \alpha(T_{\text{п}} - T_{\text{кип}}) + \sigma\varepsilon(T_{\text{п}}^4 - T_{\text{кип}}^4)(1 - e^{-\chi d}) \qquad (10)$$

d – диаметр поверхности жидкости

λ – коэффициент теплопроводности промежутка пламя – поверхность жидкости

$T_п$, $T_{кип}$ – температура пламени и кипения соответственно.

α – коэффициент теплоотдачи от газа к жидкости (учёт конвекции)

σ – постоянная Стефана – Больцмана

ε – степень черноты пламени

χ – коэффициент поглощения излучения

Для стационарного режима, когда тепловой поток весь идёт на поддержание постоянной скорости испарения, скорость выгорания определяется простым соотношением:

$$m = \frac{q}{\Delta H_u + C_{\text{рж}}(\mathrm{T}_{\text{кип}} - \mathrm{T}_0)} \qquad (11)$$

ΔH_u – теплота испарения

$C_{\text{рж}}$ – теплоёмкость жидкости

T_0 – температура окружающей среды

Для малых размеров очага горения при ламинарном режиме, доминирующим является перенос тепла, теплопроводностью и скорость выгорания изменяется обратно пропорционально диаметру (первый член в (10)). Для переходного режима преобладает второй член, отражающий влияние конвекции и скорость выгорания приблизительно постоянна в некотором диапазоне изменения диаметра. По мере дальнейшего увеличения диаметра, произведение χd возрастает, что ведёт к увеличению скорости выгорания. Рис.5 иллюстрирует зависимость скорости выгорания от диаметра горелки.

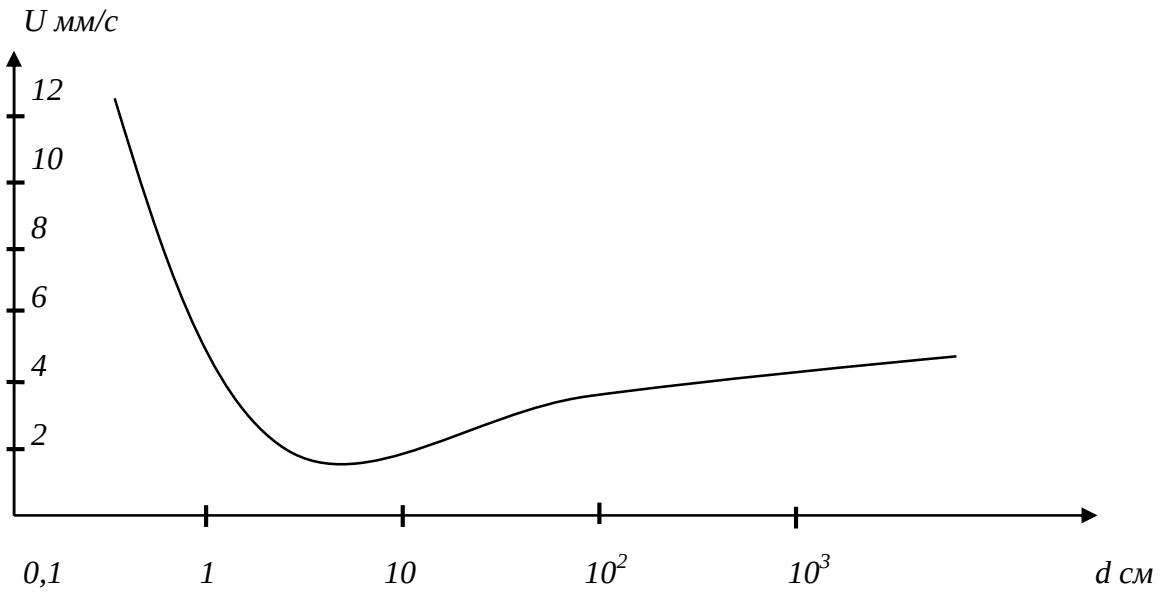


Рис.5. Зависимость скорости выгорания керосина от диаметра горелки.

Для резервуара с d >1,3 м, используется для оценок скорости выгорания формула:

$$m = \frac{\alpha(T_п - T_к)}{\Delta H_u + C_{рж}(T_к - T_0)} \qquad (12)$$

$\alpha = 15{,}07 * 10^{-3} \frac{кДж}{м^2 \cdot с \cdot град}$

Более точные и обоснованные результаты даёт подход, учитывающий различные режимы течения (движения) пара над жидкостью. Эти решения определяются числом Галилея:

$$Ga = \frac{gR^3}{\nu_п^2} \qquad (13)$$

$g = 9{,}81$ *м/сек*^{2}

R – радиус очага

$\nu_п$ *– кинематическая вязкость пара над поверхностью жидкости*

Рассматриваются четыре диапазона выгорания (горения), в зависимости от числа Галилея рис.6. На этом рисунке использованы обозначения:

$$M = \frac{md}{\mu} \qquad (14)$$

M – безразмерная скорость выгорания

m – скорость выгорания кг/м^2*сек*

μ - динамическая вязкость паров жидкости при температуре поверхности жидкости

d – диаметр очага

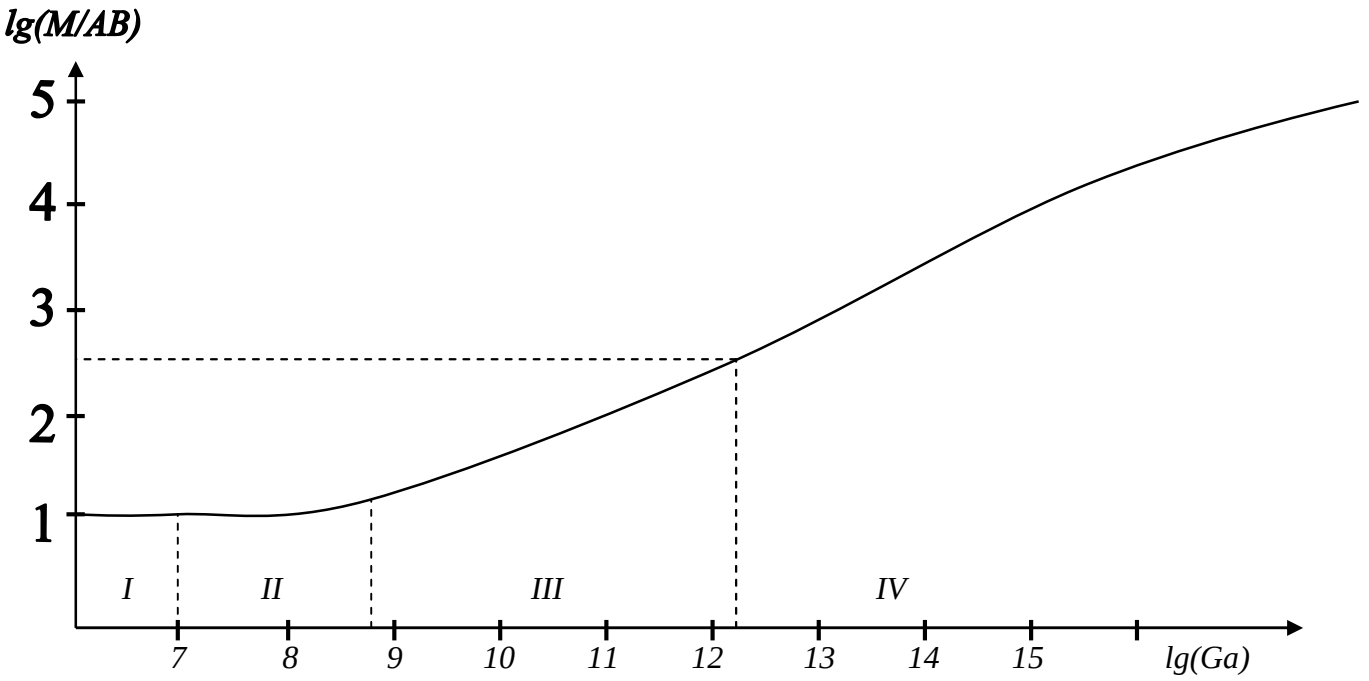


Рис.6. Скорость выгорания (приведённая), в зависимости от числа Галилея.

При любом режиме горения:

$A = 0{,}57+0{,}773\frac{M_0}{M_T}r^{\square}$ *(15)*

M_0, M_T – молекулярные веса кислорода и топлива

$r^{\square}$ *- количество граммов окислителя, необходимых для сгорания 1 грамма топлива*

$B = \frac{\frac{X_0}{r^*}Q - C_п(T_{кип}-T_0)}{\Delta H_u + C_{ж}(T_{кип}-T_0)}$ *(16)*

B – параметр переноса

Q = теплота сгорания Дж/кг

C_n – теплоёмкость пара

X_0 – относительная весовая концентрация окислителя, кислорода в газовой смеси.

При отсутствии необходимых данных для углеводородов применяют формулу:

$B = \frac{1438-0{,}5T_{кип}}{155+T_{кип}}$ *(17)*

Для турбулентного режима горения, если $Ga>3*10^{12}$:

$M = 0{,}114ABGa^{1/3}$ *(18)*

Для переходного режима $4{,}8*10^{8} \le Ga \le 3*10^{12}$:

$M = 1{,}67*10^{-3}ABGa^{0{,}48}$ *(19)*

При $10^7 \leq Ga \leq 4{,}8*10^8$:

$M = ABGa^{0,16}$ *(20)*

При $Ga<10^7$:

$M = 10{,}87AB$ *(21)*

Пример: Вычислить скорость выгорания C_2H_5OH, если d=1 м.

$T_к = 352^0K$

$M_m = 46$

$Q = 27762$ кДж/кг

$\Delta H_и = 855$ кДж/кг

$C_{рж} = 2{,}8$ кДж/кг

$C_{рг} = 1$ кДж/кг^0K

Кинематическая вязкость:

$$\nu п = 0{,}335 \cdot 10^{-6} \frac{T_к^{3/2}}{M_т^{3/2}} = 0{,}335 \cdot 10^{-6} \left(\frac{352}{46}\right)^{3/2} = 7{,}1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

Динамическая вязкость:

$$\mu = \rho_n \nu_n = 1{,}12 \cdot \frac{46}{28{,}84} \cdot \nu_n = 12{,}7 \cdot 10^{-6} \frac{Hc}{\text{м}^2}$$

Реакция горения:

$C_2H_5OH+4O_2=2CO_2+3H_2O$

Массовая доля окислителя:

$$X_0 = \frac{0{,}21 \cdot 32}{0{,}21 \cdot 32 + 0{,}79 \cdot 28} = 0{,}233$$

Масса окислителя на 1 грамм горючего:

$$r^{\square} = \frac{n_0 M_0}{n_T M_T} = \frac{4 \cdot 32}{1 \cdot 46} = 2{,}78$$

Параметры B,A:

$$B = \frac{0{,}233}{2{,}78} \cdot \frac{27752 - 1(352 - 293)}{855 + 2{,}8(352 - 293)} = 2{,}28$$

$$A = 0{,}57+0{,}773 \frac{M_0}{M_T} r^{\square} = 0{,}57 + 0{,}773 \cdot \frac{32}{46} \cdot 2{,}78 = 2{,}06$$

Критерий Галилея:

$Ga = \frac{gR^3}{V_п^2} = \frac{9{,}81}{(7{,}1 \cdot 10^{-6})^2} = 1{,}94 \cdot 10^{11}$

Для переходного режима $4{,}8*10^8 \leq Ga \leq 3*10^{12}$:

$M = 1{,}67*10^{-3} ABGa^{0{,}48} = 2{,}06 \cdot 2{,}28 \cdot 1{,}67 \cdot 10^{-3} \cdot (1{,}94 \cdot 10^{11})^{0{,}48} = 2{,}05 \cdot 10^3$

Массовая скорость выгорания:

$$m = \frac{M\mu}{d} = \frac{2{,}05 \cdot 10^3 \cdot 12{,}7 \cdot 10^{-6}}{1} = 2{,}6 \cdot 10^{-3} \frac{кг}{м^2 с}$$

Если известны результаты испытаний в лабораторных условиях m, при $Ga<10^7$, то по (21) находятся AB:

$$AB = \left(\frac{md}{10{,}87\mu}\right) \qquad (22)$$

Затем определив Ga, определяем M, а значит и m.

Основные результаты лекции:

1.Горение неперемешанных заранее горючих компонентов, горючего газа и воздуха происходит благодаря их взаимной диффузии.

2.Высота факела диффузионного пламени при ламинарном режиме горения растёт пропорционально объёмному расходу подачи горючего в зону горения.

3.При турбулентном режиме диффузионного горения высота факела пропорциональна размеру очага горения и не зависит от скорости газа.

4.Горение пролитой жидкости является диффузионным горением, подача горючего в зону горения определяется скоростью испарения.

5.Скорость испарения жидкости является важной характеристикой горючих жидкостей, жидкости имеющие более высокие давления насыщенных паров более взрыво и пожароопасные.

6.Массовая скорость выгорания жидкости зависит как от свойств жидкости, так и от размеров зеркала жидкости.

Вопросы для домашней работы.

1. Какие процессы обеспечивают диффузионное горение, как формируется горючая смесь, где она формируется.
2. Как зависит от числа $R_e \approx \frac{d \cdot V}{V}$ высота ламинарного факела
3. Определить $T_{НПВ}$ для циклогексана, если $T_{КИП}$=80,7°С
   Указание $\Delta H_{ИСП}$ определить по $T_{КИП}$.
4. Определить, используя понятия критического теплового эффекта, $T_{НПВ}$ для толуола, если известно, что $T_{КИП}$=110,6°С, а при Т=40,3°С, $P_Н$ = 8кПа.
5. Определить $T_{ВПВ}$ для ацетона, если $C_{ВКПВ}$=13% (объемные) а температура кипения $T_{КИП}$=56,5°С, а при Т=22,7°С, $P_Н$ = 200ммHg.
6. Определить скорость выгорания толуола для d=0,01 м, d=0,1 м, 1м, и 10м.