# 4. Распространение пламени

## 4.1 Концентрационные пределы распространения пламени

Нижний (верхний) концентрационный предел распространения пламени минимальная (максимальная) концентрация горючего в окислителе, способная воспламениться от высокоэнергетического источника с последующим распространением горения на всю смесь.

Нижний концентрационный предел воспламенения *φн* (в об. %) определяют по предельной теплоте сгорания. Установлено, что 1 м3 различных газовоздушных смесей на НКПВ выделяет при горении постоянное среднее количество тепла 1830 кДж, называемое предельной теплотой горения. Следовательно,

.

Если принять *Qн*= 1830 кДж/м3то *φн* будет равно



Нижний и верхний КПВ могут быть определены по аппроксимационной формуле

,

где *a, b* – эмпирические коэффициенты, значения которых приведены в табл. 4-1, *β* – коэффициент при кислороде в уравнении реакции.

**Табл. 4-1. Коэффициенты аппросимационной формулы расчёта КПВ.**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Концентрационные пределы воспламенения** | **Значения коэффициенто**в | |
| *a* | *b* |
| Нижний | 8,684 | 4,679 |
| Верхний | | |
|  | 1,550 | 0,560 |
|  | 0,768 | 6,554 |

Концентрационные пределы воспламенения паров жидких и твердых веществ могут быть рассчитаны, если известны их температурные пределы воспламенения,

,

где *p0* – давление в окружающей среде (атмосферное давление), *pн* – давление насыщенных паров конденсированного вещества при температуре, соответствующей нижнему (верхнему) температурному пределу воспламенения.

Зависимость давления насыщенного пара вещества от температуры даётся эмпирическим уравнением Антуана

,

где *P* – давление насыщенного пара вещества (в мм.рт.ст.), *A,B,C* – константы Антуана для данного конкретного вещества (справочные величины), *t* – температура (в 0С).

Для смесей горючих газов концентрационные пределы воспламенения вычисляются по правилу Ле-Шателье

,

где *μi* - мольная доля *i* – того газа, *φн(в)I* – нижний (верхний) концентрационный предел воспламенения *i* – того газа. Следует иметь ввиду, что сумма всех мольных долей горючих компонентов должна быть равна 1, т.е. .

## 4.2 Расчет температурных пределов воспламенения.

Если известны концентрационные пределы воспламенения при температуре *T1*, то при температуре *T2*они вычисляются по формулам:



,

где *Tг* - температура горения, *φн(в)1, φн(в)2,* - нижний (верхний) концентрационные пределы воспламенения при температурах *T1* и *T2* соответственно. Приближенно при определении НКПВ *Тг* принимают 1550 К, при определении ВКПВ 1100.

## 4.3 Флегматизация газовых смесей.

При разбавлении газовоздушной смеси инертными газами (*N2, СО2, Н2О* пары и т.п.) область воспламенения сужается: верхний предел снижается, а нижний возрастает. Концентрация инертного газа (флегматизатора), при которой нижний и верхний пределы воспламенения смыкаются, называется минимальной флегматизирующей концентрацией *φф*. Содержание кислорода в такой системе называют минимальным взрывоопасным содержанием кислорода, МВСК . Некоторое содержание кислорода ниже МВСК называют безопасным . Расчет указанных параметров проводят по формулам

,



,

где  - стандартная теплота образования горючего,  - постоянная величина для широкого круга горючих,  - константы, зависящие от вида флегматизатора, и вида структурной группы атомов в составе горючего, *mi* - число атомов *i* – того вида в составе горючего.

Расчёт указанных параметров может происходить и по другой, по физическому смыслу, методике – через решение уравнения теплового баланса при следующих двух условиях:

* В точке флегматизации смесь имеет предельную температуру равную 1500 К
* Смесь является стехиометрической при сгорании углерода до *CO*.

Уравнение теплового баланса для горючей смеси, разбавленной газом

,

где *Tг* – предельная температура горения (1500 К),  и  - теплоёмкость и количество *i* – того продукта сгорания,  и  - теплоёмкость и количество флегматизатора в смеси. Из уравнения легко получить выражение для количества флегматизатора в составе смеси.

.

**Пример 1:** *Определить нижний концентрационный предел сгорания бутана в воздухе по предельной теплоте сгорания.*

Для расчёта воспользуемся формулой . По справочным данным или по расчёту (см. §3.1) определим низшую теплоту сгорания горючего – 2882,3 кДж/моль. Переведём мольное значение теплоты сгорания в удельную величину – кДж/м3 используя молярный объём идеального газа – 22,413 кмоль/м3  кДж/м3. По формуле получаем 

**Пример 2:***Определить концентрационные пределы воспламенения этилена на воздухе по аппроксимационной формуле.*

Воспользуемся формулой . Для определения коэффициента *β* составим уравнение реакции горения этилена на воздухе,

*C2H4 + 3(O2 + 3,76N2) = 2CO2 + 2H2O + 3·3,76N2*.

Коэффициент *β* = 3. по формуле и данным табл. 4-1 получаем , .

**Пример 3:** *Определить концентрационные пределы воспламенения метанола на воздухе, если температурные пределы воспламенения равны 7 – 390C.*

Для расчёта воспользуемся формулой . давление насыщенных паров метанола найдём по уравнению Антуана , константы A, *B, C* – возьмём из справочника. , мм. рт. ст., , мм. рт. ст. По формуле получаем: , .

**Пример 4:** *Определить концентрационные пределы воспламенения горючеё смеси состоящей из 40% пропана, 50% бутана и 10% пропилена.*

Концентрационные пределы воспламеняемости смесей горючих газов рассчитываются по правилу Ле-Шателье . Концентрационные пределы воспламенения отдельных компонентов берутся из справочников или вычисляются по методам, изложенным выше. Концентрационные пределы воспламенения отдельных компонентов смеси: пропан – 2,1-9,5%, бутан – 1,9-9,1%, пропилен – 2,2-10,3%. По правилу Ле-Шателье получим: , .

**Пример 5:** *Какое количество диэтилового эфира должно испариться в помещении объёмом 350 м3, чтобы создалась взрывоопасная концентрация паров.*

Концентрация паров будет взрывоопасной, если , где  - концентрация паров горючего. Расчётом или по справочнику находим нижний концентрационный предел воспламенения для диэтилового эфира – 1,7%. Определим объём паров необходимый для создания такой концентрации.м3. Молярная масса диэтилового эфира (*C2H5OC2H5*) – 74 кг/кмоль. Принимая, что при н.у. 1 кмоль паров эфира занимает 22,413 м3 найдём массу эфира, которую должна испариться для создания взрывоопасной концентрации  кг.

**Пример 6:** *образуется ли взрывоопасная концентрация паров над поверхностью жидкости, состоящей из 60% диэтилового эфира и 40% этилового спирта при температуре 190С.*

Концентрация паров будет взрывоопасной, если . Состав газовой фазы будет отличаться от состава жидкой фазы в силу различной летучести компонентов смеси. Содержание компонентов в газовой фазе может быть вычислено по закону Рауля для идеальных растворов жидкостей.

1. Определим состав жидкой фазы в мольных долях.

,

где *qi* – массовая доля *i* – того компонента смеси, *Mi* – молярная масса *i* – того компонента. Молярные массы диэтилового эфира и этилового спирта составляют *MДЭ* = 74 и *MЭС* = 46 кг/кмоль соответственно. Состав жидкой смеси в мольных долях будет , .

1. Используя уравнение Антуана найдём давление насыщенных паров спирта и эфира над чистыми жидкостями при расчётной температуре (190С). Значения констант уравнения Антуана возьмём из справочника., мм. рт. ст., , мм. рт. ст.
2. Согласно закону Рауля парциальное давление насыщенных паров вещества пропорционально его мольной доле в растворе и давлению насыщенного пара над чистой жидкостью . Давления паров компонентов смеси будут мм. рт. ст., мм. рт. ст.
3. Определим концентрацию паров горючего и состав газовой фазы (в мольных долях). Общая концентрация горючих паров , мольная доля компонента в парах 

,  .

1. Определим расчётом или по справочным данным концентрационные пределы воспламенения компонентов смеси. Диэтиловый эфир – 1,7-59%, этиловый спирт – 3,6-19%. По правилу Ле-Шателье рассчитаем концентрационные пределы воспламенения паров смеси , .
2. Сравнивая концентрацию паров смеси  с концентрационными пределами воспламенения (1,7-26,1%) делаем вывод об образовании при 190С взрывоопасной смеси.

**Пример 7:** *Рассчитать безопасную концентрацию кислорода при разбавлении углекислым газом смеси паров ацетона в воздухе.*

Расчёт ведётся по формулам - . Теплоту образования ацетона определим расчётным путём или по справочным данным ·103 Дж/моль. Из формулы ацетона найдём количества атомов в составе молекул *mc* = 3, *mH* = 6, *mO* = 1. Коэффициенты формулы берём из справочных таблиц (флегматизатор – углекислый газ). минимальная флегматизирующая концентрация углекислого газа будет

.

Минимальное взрывоопасное содержание кислорода в смеси будет равно

.

Безопасное содержание кислорода в смеси составит

.

Следовательно, при снижении концентрации кислорода в четырехкомпонентной системе, состоящей из паров ацетона, двуокиси углерода, азота и кислорода, до 8,6 % смесь становится взрывобезопасной. При содержании же кислорода, равном 10,7 % эта смесь будет предельной по взрываемости.

**Пример 8:** *Рассчитать параметры точки флегматизации (минимальную флегматизирующую концентрацию, минимальное взрывоопасное содержание кислорода, концентрацию горючего) при разбавлении бутановоздушной смеси диоксидом углерода. Начальная температура – 295 К*

Расчёт будет вести по формуле . Запишем уравнение неполного сгорания бутана до *CO* и *H2O*.

*C4H10 + 4,5(O2 + 3,76N2) = 4CO + 5H2O + 4,5·3,76N2*

Рассчитаем низшую теплоту сгорания по следствию из закона Гесса, взяв справочные данные по теплотам образования продуктов реакции из справочных таблиц.

 кДж/моль.

По табличным данным о теплоёмкостях газов при температуре 1500 К, используя формулу рассчитаем количество молей флегматизатора

 моль/моль.

Найдём концентрацию углекислого газа в смеси – это и будет минимальная флегматизирующая концентрация.

.

Минимальное взрывоопасное содержание кислорода и концентрация горючего рассчитывается аналогичным путём

,

.

**Пример 9:** *Определить, как изменятся концентрационные пределы воспламеняемости пропана при повышении температуры на 500 К. Начальная температура – 298 К.*

Температурная зависимость концентрационных пределов воспламенения описывается уравнениями и . Концентрационные пределы для стандартной температуры определяем расчётом или по справочным данным (для пропана – 2,1-9,5%). для температуры  К получаем значения концентрационных пределов воспламенения

,

.

## 4.4 Задачи для самостоятельного решения

1. Определить концентрационные пределы воспламенения сероуглерода при атмосферном давлении, равном 99000 Па, если его температурные пределы составляют 223-299 К.
2. Рассчитать концентрационные пределы воспламенения бензола, если его температурные пределы составляют 259–283 К. Определить ошибку расчета.
3. Определить концентрационные пределы воспламенения парогазовой смеси, состоящей из 20 % этана, 60 % этилена 20 % паров этилового спирта.
4. Определить концентрационные пределы воспламенения в воздухе смеси паров, состоящей из 50% бензола, 35% толуола и 15% фенола при увеличении температуры с 298 до 373 К.
5. Определить, образуется ли взрывоопасная концентрация при испарении в помещении объемом 220 м3 15 кг деканола, если температура 310К, давление 110500 Па.
6. Определить, возможно ли образование взрывоопасной концентрации при температуре 298 К над поверхностью жидкой фазы, состоящей из 25% уксуснометилового эфира, 40% уксусного альдегида и 35% амилового спирта.
7. Определить состав двухкомпонентной газовой смеси, состоящей из паров аммиака и сероводорода, если известно, что ее нижний концентрационный предел воспламенения в воздухе составляет 5,8%.
8. Определить безопасную концентрацию кислорода при разбавлении паров уксуснопропилового эфира ( кДж/моль) в воздухе двуокисью углерода, водяным паром и азотом.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | вещество | формула |
| 1 | гептан | *C7H16* |
| 2 | смесь газов | *C8H18 – 40%*  *C6H14 – 60%* |
| 3 | ацетилен | *C2H2* |
| 4 | уксусный альдегид | *C2H4O* |
| 5 | бензол | *C6H6* |
| 6 | ацетон | *C3H6O* |
| 7 | смесь газов | *CH4 – 40%*  *CO -50%*  *C3H8 – 10%* |
| 8 | амиловый спирт | *C5H12O* |
| 9 | этан | *C2H6* |
| 10 | толуол | *C7H8* |
| 11 | смесь газов | *CO – 70%*  *CH4 – 25%*  *C2H6 – 5%* |
| 12 | уксусная кислота | *C2H4O2* |
| 13 | уксусноэтиловый эфир | *C4H6O2* |
| 14 | глицерин | *C3H8O3* |
| 15 | ацетон | *C3H6O* |
| 16 | смесь газов | *C3H8 – 70%*  *CH4 – 30%* |
| 17 | метиловый спирт | *CH4O* |
| 18 | стирол | *C8H8* |
| 19 | фенол | *C6H6O* |
| 20 | гексиловый спирт | *C6H14O* |
| 21 | смесь газов | *CO – 12%*  *C2H2 – 78%*  *CH4 – 10%* |
| 22 | диэтиловый эфир | *C4H10O* |
| 23 | сероуглерод | *CS2* |
| 24 | масляная кислота | *C4H8O2* |
| 25 | бензиловый спирт | *C7H8O* |
| 26 | метилэтилкетон | *C4H8O* |
| 27 | анилин | *C6H7N* |