

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Пермский государственный аграрно-технологический университет
имени академика Д.Н. Прянишникова»
(ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ)

С. Н. Костарев, Т.Г. Середа

ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

*Методические указания для выполнения
курсовых работ*

Пермь
ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ,
2024

УДК 621.7.148

ББК 24.54

К 71

Рецензенты:

Ю.А. Кочин, к.т.н., заведующий кафедрой техносферной безопасности, физики и математики (ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ).

П.П. Колтурин, инженер; И.Н. Тарасова, старший контролер отдела охраны окружающей среды (ООО ЛАБ Индастриз), филиал в г. Пермь)

К 71 Костарев, С. Н.

Теория горения и взрыва: методические указания для выполнения курсовых работ / С.Н. Костарев, Т.Г. Середа; Министерство науки и высшего образования РФ, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный аграрно-технологический университет им. акад. Д.Н. Прянишникова», Пермь: ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ, 2024. – 58 с.

Методические указания содержат необходимый теоретический материал, задачи и упражнения, а также перечень вопросов для подготовки курсовой работы при изучении дисциплины «Теория горения и взрыва».

Методические указания предназначены для обучающихся очной и заочной формы обучения по направлению подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность, направленность (профиль) «Безопасность технологических процессов и производств».

УДК 621.7.148

ББК 24.54

Рекомендованы к изданию методической комиссией института землеустройства, кадастра, инженерных и строительных технологий ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ, протокол № 3 от 23 ноября 2023 г.

© ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ, 2024

© Костарев С.Н., 2024

© Середа Т.Г., 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 РАСЧЕТ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА ПРОЦЕССА	6
ГОРЕНИЯ.....	6
1.1 Теоретическая часть.....	6
1.2 Методические указания по расчёту количества воздуха, необходимого для горения веществ.....	8
2 РАСЧЕТ ОБЪЕМА И СОСТАВА ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ.....	16
2.1 Теоретическая часть.....	16
2.2 Методические указания по расчёту объема и состава продуктов горения	16
3 ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ.....	19
3.1 Теоретическая часть.....	19
3.2 Методические указания по расчету теплоты сгорания веществ.....	22
4 РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПРЕДЕЛОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ	27
4.1 Теоретическая часть.....	27
4.2 Методические указания по расчету концентрационных пределов воспламенения.....	30
5 ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ВЕЩЕСТВ. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРЕДЕЛЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ (ТПРП)	38
5.1 Температурные пределы распространения пламени.....	38
5.2 Условия загорания жидкостей в открытом пространстве, температура вспышки.....	40
5.3 Методические указания по расчету температурных пределов воспламенения.....	43
6 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	45
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	48

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ	49
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ КУРСОВЫХ РАБОТ	49
Список используемой литературы	49
Информационно-справочные системы и ресурсы сети «Интернет» ...	50
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 – Величины параметров K и l для вычисления температурных пределов воспламенения некоторых жидкостей	52
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 – Давление насыщенных паров (ГПа) и нижние температурные пределы (К) вещества (НТПВ) некоторых веществ ...	53
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 – Показатели пожарной опасности некоторых веществ	54
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 – Теплота образования и сгорания некоторых веществ	55
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 – Показатели пожарной опасности некоторых газов	56
ПРИЛОЖЕНИЕ 6 – Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении.....	57
ПРИЛОЖЕНИЕ 7 – Образец титульного листа курсовой работы.....	58

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания для выполнения курсовых работ по дисциплине «Теория горения и взрыва» разработаны по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность» и предназначены для помощи обучающимся очной и заочной формы обучения при выполнении курсовой работы.

Целью выполнения курсовой работы является систематизация, закрепление и расширение теоретических знаний и практических навыков обучающихся по освоению дисциплины «Теория горения и взрыва».

При выполнении курсовой работы, обучающиеся изучают следующие темы:

1. Материальный баланс процесса горения;
2. Тепловой баланс процессов горения;
3. Концентрационные пределы воспламенения;
4. Температурные параметры пожарной опасности;
5. Потенциал горючести.

В методических указаниях приведены задания для курсовой работы, представлены методики расчета показателей, справочные данные, рекомендации по написанию работы, список литературных источников и электронные базы данных.

1 РАСЧЕТ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

1.1 Теоретическая часть

Горение – это важнейший из применяемых человеком физико-химических процессов. Роль огня в возникновении и развитии цивилизации необычайно велика. Своеобразное отражение этого факта – миф о Прометее или гениальные догадки философов древности о том, что «огонь» является одним из немногих основных «элементов природы», в настоящее время можно сказать состояний вещества. До сих пор, несмотря на интенсивное развитие атомной, гидро-, гелио- и геотермальной энергетики, за счёт сжигания топлива производится основная доля энергии, обеспечивающей потребности человеческого общества. Все остальные источники, включая продукты питания, дают человечеству менее десяти процентов необходимой ему энергии.

Что же такое горение, роль процесса которого в жизни человеческого общества так велика?

Горение – это режим протекания экзотермических химических реакций, характеризующийся значительной скоростью химического превращения, излучением тепла и света и способностью реакции к прохождению в самоподдерживающемся или самораспространяющемся режиме.

Материальный баланс процесса горения — соотношение (равенство) между количеством веществ, которые вступают в реакцию горения, и количеством веществ (продуктов горения), которые получаются вследствие этой реакции.

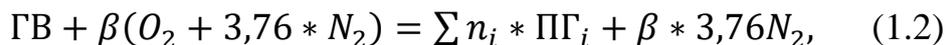
Расход воздуха на горение

При горении происходит взаимодействие между молекулами горючего вещества и окислителя, при этом получают продукты сгорания.



Как правило, окислителем при горении выступает кислород воздуха. Схематично химическую реакцию сгорания одного моля

вещества в воздухе можно представить уравнением:



где ГВ, O₂, N₂, ПГ_{*i*} – молекулы, соответственно горючего вещества, кислорода, азота и *i*-го продукта горения;

n_i — количество молекул *i*-го продукта горения, приходящееся на одну молекулу горючего;

β — стехиометрический коэффициент реакции горения.

Это лишь суммарная реакция, но она достаточна для проведения практических расчетов и является обобщенной записью материального баланса реакции горения.

Минимальный объем воздуха, который необходим для полного сгорания единицы количества горючего вещества, называется **удельным теоретическим объемом воздуха** и обозначается $V^0_{в}$. В зависимости от единиц измерения количества горючего вещества (1 моль, 1 м³, 1 кг) удельный объем измеряется в м³/моль, м³/м³, м³/кг.

Действительное количество воздуха, который поступает в зону горения, отличается от теоретического. Соответствующий объем называется удельным действительным объемом воздуха и обозначается $v_{в}$. Разность между количеством воздуха, который идет на горение и теоретически необходимым, называется избытком воздуха. Для характеристики процесса горения используют понятие коэффициент избытка воздуха - $\alpha_{в}$, который показывает, во сколько раз количество воздуха, который действительно поступает в зону горения, отличается от теоретически необходимого количества для полного сгорания единицы количества горючего вещества.

Таким образом, действительный удельный объем воздуха равняется:

$$V_{в} = V_{в}^0 * \alpha_{в}. \quad (1.3)$$

Часть воздуха, неизрасходованная на горение, переходит в продукты горения.

В случае кинетического горения, при $\alpha_{в} = 1$, смесь горючего с воздухом является стехиометрической. Величина тепловыделения на

единицу продуктов сгорания при этом максимальна, вследствие чего температура в зоне горения также максимальна.

При $\alpha_v < 1$ в смеси недостаток окислителя и избыток горючего вещества. Такая смесь называется **богатой**. Характерной особенностью процесса горения в этом случае является образование продуктов неполного сгорания.

При $\alpha_v > 1$ смесь называется **бедной**. В ней недостаток горючего вещества и избыток окислителя. При этом продукты горения включают в себя избыток воздуха.

Продукты горения - это газообразные, твердые и жидкие вещества, образующиеся в процессе горения.

Состав продуктов горения зависит от состава горючего вещества и условий протекания реакции горения. Продукты горения образуют дым.

Дым - дисперсная система, состоящая из твердых и жидких частиц (дисперсной фазы), находящихся в газовой дисперсионной среде.

Свойства дыма характеризуются следующими параметрами:

– **концентрация дыма** - это масса продуктов горения, находящихся в единице объема. В зоне задымления концентрация продуктов горения находится в интервале от $1 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ кг/м³.

– **содержание кислорода**. В обычных условиях содержание кислорода в воздухе составляет 21% (объемный). Снижение концентрации кислорода в воздухе приводит к кислородному голоданию людей. Так, при снижении концентрации ниже 16%, работа без индивидуальных средств защиты органов дыхания невозможна.

1.2 Методические указания по расчёту количества воздуха, необходимого для горения веществ

Цель работы: Ознакомиться с классификацией процессов горения, сформировать представления про основные параметры, характеризующие пожарную опасность веществ в разных агрегатных состояниях, освоить способы определения этих параметров. Освоить расчеты необходимого количества воздуха для горения.

Расчётные формулы для расчета количества воздуха, необходимого для горения.

Для практических расчётов принимают, что воздух состоит из 21% кислорода и 79% азота. Таким образом, объёмное соотношение азота и кислорода в воздухе составит:

$$\frac{\varphi N_2}{\varphi O_2} = \frac{79}{21} = 3,76. \quad (1.4)$$

где φN_2 , φO_2 – это объёмное (% об.) содержание азота и кислорода в окислительной среде.

Следовательно, на 1 м^3 (кмоль) кислорода в воздухе приходится $3,76\text{ м}^3$ (кмоль) азота.

Весовое соотношение азота и кислорода в воздухе можно определить, исходя из соотношения:

$$\frac{N_2 M N_2}{O_2 M O_2} = \frac{79 \cdot 28}{21 \cdot 32} = 3,29. \quad (1.5)$$

где $M N_2$, $M O_2$ – молекулярные массы соответственно азота и кислорода.

Для удобства расчётов горючие вещества разделяют на три типа (таблица 1.1): индивидуальные химические соединения (метан, уксусная кислота и т.п., вещества сложного состава (древесина, торф, сланцы, нефть и т. п.), смесь газов (генераторный газ и т.д.)

Таблица 1.1 – Расчет теоретического количества воздуха

Тип горючих веществ	Расчетные формулы	Размерность
Индивидуальное вещество	$V_B^0 = \frac{nO_2 + nN_2}{nr}$, (1.6a)	м^3
	$V_B^0 = \frac{(nO_2 + nN_2)V_0}{nr \cdot M}$, (1.6б)	$\text{м}^3/\text{кг}$
Вещества сложного состава	$V_B^0 = 0,269 \left(\frac{C}{3} + H + \frac{S-O}{8} \right)$, (1.7)	$\text{м}^3/\text{кг}$
Смесь газов	$V_B^0 = \frac{\sum \varphi r_i n O_{2i} - \varphi O_2}{21}$, (1.8)	$\text{м}^3/\text{кг}$

где V_B^0 – теоретическое количество воздуха;

nr, nO_2, nN_2 – количество горючего, кислорода и азота получаемые из уравнения химической реакции горения, моль;

M – молекулярная масса горючего;
 V_0 – объем 1 моля газа при нормальных условиях ($22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$)
 C, H, S, O - весовое содержание соответствующих элементов в составе горючего, % ;

φr_i – концентрация i -того горючего компонента, %;

φO_2 – концентрация кислорода в составе горючего газа, %;

O_{2i} - количество кислорода необходимое для окисления одного i -того моля горючего компонента, моль.

Для определенного объема воздуха при горении в условиях, отличных от нормальных, пользуются следствием из уравнения состояния идеальных газов:

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P_1 V_1}{T_1}, \quad (1.9)$$

где P_0 – давление при нормальных условиях, Па.

T_0 – температура при нормальных условиях, К.

V_0 – объем воздуха при нормальных условиях.

Практическое количество воздуха V_0 – объем воздуха, фактически поступивший в зону горения.

Отношение практического объема воздуха к теоретическому называется коэффициентом избытка воздуха :

$$\mathcal{L} = \frac{V_B}{V_B^0}. \quad (1.10)$$

Разность между практическим и теоретическим объемами воздуха называется избытком воздуха ΔV_B :

$$\Delta V_B = V_B - V_B^0. \quad (1.11)$$

Из (1.10) и (1.11) следует, что

$$\Delta V_B = V_B \cdot (\mathcal{L} - 1). \quad (1.12)$$

Если известно содержание кислорода в продуктах горения, то коэффициент избытка воздуха определяется по формуле:

$$\mathcal{L} = 1 + \frac{\varphi_{O_2} \cdot V^{0nr}}{V_0^0 \cdot (21 - \varphi_{O_2})}, \quad (1.13)$$

где φ_{O_2} – концентрация кислорода в составе горючего газа, % об.;
 V^{0nr} – теоретический объем продуктов горения.

Для веществ, у которых объем продуктов горения равен объему израсходованного воздуха (например, горение серы и углерода), формула (1.13) упрощается:

$$\mathcal{L} = \frac{21}{21 - \varphi_{O_2}} \quad (1.14)$$

Если содержание кислорода в окислительной среде отличается от содержания его в воздухе, то формулу (1.13) можно записать в виде:

$$\mathcal{L} = 1 + \frac{\varphi_{O_2} \cdot V^{0nr}}{V_0^0 \cdot (\varphi^0_{O_2} - \varphi_{O_2})} \quad (1.15)$$

и соответственно формулу (1.14) в виде:

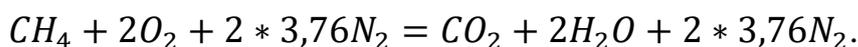
$$\mathcal{L} = \frac{\varphi_{O_2}}{\varphi^0_{O_2} - \varphi_{O_2}}, \quad (1.16)$$

где $\varphi^0_{O_2}$ – содержание кислорода в окислительной среде, % об.

Примеры решения задач

Пример № 1.1. Определить теоретическое количество воздуха, необходимого для горения 1 м^3 метана при нормальных условиях.

Решение: Горючее вещество является индивидуальным химическим соединением, поэтому для расчета его объема надо пользоваться формулой (1.6а). Запишем уравнение химической реакции горения CH_4 в воздухе:

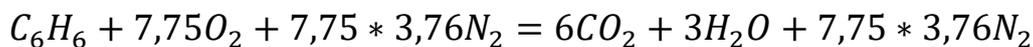


Из уравнения находим: $n_{O_2}=2$; $n_{N_2}=2 \cdot 3,76=7,52$; $n_{CH_4}=1$;

тогда $V_B^0 = \frac{2+7,52}{1} = 9,52 \text{ м}^3 / \text{м}^3$ или кмоль / кмоль.

Пример № 1.2. Определить объем теоретического количества воздуха, необходимого для горения 1кг бензола.

Решение: горючее – индивидуальное химическое соединение, поэтому для расчета по формуле (1.6б) запишем уравнение химической реакции горения:



и найдем:

$$nO_2 = 7,75; nN_2 = 7,5 * 3,76 = 28,2 * nr = 1,$$

Молекулярная масса бензола: $M = 6 \cdot 12 + 6 \cdot 1 = 78$ г.

Объем 1 кмольа газа при нормальных условиях составляет $22,4$ м³:

$$V_B^0 = \frac{(7,5+28,2)22,4}{1 \cdot 78} = 10,3 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Пример № 1.3. Определить объем воздуха, необходимого для горения 1кг органической массы состава: С-60%, О-25%, N-5%, если коэффициент избытка воздуха $\mathcal{L} = 2,5$; а температура воздуха 305К, давление 99,5кПа.

Решение: Так как горючее вещество сложного состава, то теоретическое количество воздуха при нормальных условиях определим по формуле (1.7):

$$V_B^0 = 0,269 \left(\frac{60}{3} + 5 - \frac{25}{8} \right) \cdot 5,9 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Из формулы (1.10) рассчитаем практическое количество воздуха при нормальных условиях:

$$V_B^0 = \mathcal{L} * V_B^0 = 2,5 * 5,9 = 14,75 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Находим количество воздуха, пошедшего на горение вещества при заданных условиях горения; используя формулу (1.9), получим:

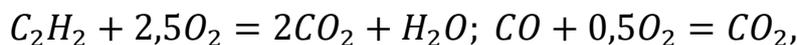
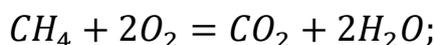
$$V_{B(p,r)} = \frac{14,75 \cdot 101325 \cdot 305}{99500 \cdot 273} = 16,78 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Пример № 1.4. Определить объем воздуха, необходимого для горения 5м³ смеси газов при нормальных условиях, состоящих из 20% СН₄, 10% СО, 5%N, 35%О₂, если коэффициент избытка воздуха равен 1,8.

Решение: Горючее – смесь газов. Поэтому для расчета объема воздуха, пошедшего на сгорание, воспользуемся формулой (1.8)

$$V_B^0 = \frac{\sum \varphi r_i n O_{2i} - \varphi O_2}{21}$$

Для определения стехиометрических коэффициентов при кислороде nO_2 запишем уравнение реакции горения горючих компонентов в кислороде:



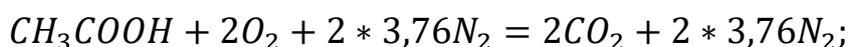
тогда
$$V_B^0 = \frac{2 \cdot 20 + 2,5 \cdot 40 + 0,5 \cdot 10 - 25}{21} = 5,7 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Для горения 5 м^3 газовой смеси необходимый теоретический объем воздуха составит: $V_B^0 = 5 \cdot 5,7 = 32,5 \text{ м}^3$.

Практическое количество воздуха: $V_B^0 = 1,8 \cdot 32,5 = 58,5 \text{ м}^3$.

Пример № 1.5. Определить коэффициент избытка воздуха при горении уксусной кислоты, если на горение 1 кг поступило 3 м^3 воздуха.

Решение: Для определения коэффициента избытка воздуха по формуле (1.10) необходимо рассчитать его теоретическое количество. Молекулярная масса уксусной кислоты – 60.



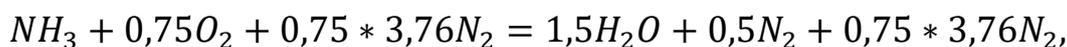
$$V_B^0 = \frac{(2 + 2 \cdot 3,76) \cdot 22,4}{1 \cdot 60} = 3,6 \text{ м}^3 / \text{кг},$$

тогда коэффициент избытка воздуха равен:

$$\mathcal{L} = \frac{3}{3,6} = 0,8.$$

Вывод: Горение протекало при недостатке воздуха.

Пример № 1.6. Определить объем воздуха, пошедшего на окисление 1 м^3 аммиака:



тогда
$$V_B^0 = \frac{0,75 + 0,75 \cdot 3,76}{1} = 3,6 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

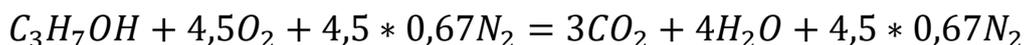
Для определения коэффициента избытка воздуха необходимо рассчитать теоретическое количество продуктов горения 1 м^3 аммиака:

$$V_{\text{пр}}^0 = \frac{1,5 + 0,5 + 0,75 \cdot 3,76}{1} = 4,8 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Пример № 1.7. Определить объем окислительной среды, состоящей из 60%O₂ и 40%N₂ необходимый для горения 1 кг изопропилового спирта, если ее температура равна 295К, давление 62 кПа.

Решение: так как окислительная среда отличается по составу от воздуха, определим по формуле (1.4) объемное соотношение кислорода и азота: 40:60 = 0,67.

Уравнение реакции горения изопропилового спирта:



Теоретический объем окислительной среды при нормальных условиях рассчитаем по формуле (1.6б). Молекулярная масса горючего – 60.

$$V_{oc}^0 = \frac{(4,5+4,5 \cdot 0,67) \cdot 22,4}{1 \cdot 60} = 2,8 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем окислительной среды при заданных условиях горения определим из формулы (1.9):

$$V_{oc(pr)}^0 = \frac{2,8 \cdot 295 \cdot 101325}{62000 \cdot 273} = 4,95 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Пример № 1.8. Определить сколько кг динитротолуола сгорело в герметичном объеме 100м³, если содержание кислорода в продуктах сгорания составило 12%.

Решение: Так как в продуктах горения содержится кислород, то горение протекало в избытке воздуха, коэффициент избытка которого определим по формуле (1.13). Для этого запишем уравнение горения:
 $C_7H_6(NO_2)_2 + 6,5O_2 + 6,5 * 3,76N_2 = 7CO_2 + 3H_2O + N_2 + 6,5 * 3,76N_2.$

Молекулярная масса горючего–182. Теоретический объем воздуха равен:

$$V_B^0 = \frac{(6,5+6,5 \cdot 3,76) \cdot 22,4}{1 \cdot 182} = 3,8 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретический объем продуктов горения (1.6 б):

$$V_{пр}^0 = \frac{(7 + 3 + 1 + 6,5 \cdot 3,76) 22,4}{1 \cdot 182} = 4,4 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

$$\mathcal{L} = 1 + \frac{12 \cdot 4,4}{3,8 \cdot (21 - 12)} = 2,55.$$

Практический объем воздуха, пошедший на горение:

$$V_B = 2,55 * 3,8 = 9,7 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Тогда массу сгоревшего динитротолуола P определим из соотношения:

$$P_r = \frac{V_0}{V_B}, P_r = \frac{100}{9,7} = 10,3 \text{ кг.}$$

2 РАСЧЕТ ОБЪЕМА И СОСТАВА ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ

2.1 Теоретическая часть

Температурные пределы воспламенения жидкостей рассчитывают по температуре кипения:

$$t_{Н(В)} = Kt_{кип} - \ell, \quad (2.1)$$

где $t_{Н(В)}$ – нижний (верхний) температурный предел воспламенения, °С;

$t_{кип}$ – температура кипения, °С;

K и ℓ – константы для определения групп (гомологических рядов) жидкостей. Их значения приведены в **приложении 1**.

Температурные пределы воспламенения могут быть определены по известным значениям концентрационных пределов:

$$P_{НВ} = \frac{\varphi_{НВ}P_0}{100}, \quad (2.2)$$

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

$\varphi_{Н(В)}$ – нижний (верхний) концентрационный предел воспламенения;

P_0 – атмосферное давление.

По **приложению 2** определяем температуру вещества, при которой достигается данное давление. Она будет являться соответственно нижним пределом воспламенения.

2.2 Методические указания по расчёту объема и состава продуктов горения

Цель работы: изучить состав продуктов горения, методы и приборы для их изучения; научиться делать расчеты температурных пределов воспламенения (ТПВ) для ряда химических веществ.

Пример № 2.1 Определить температурные пределы воспламенения (ТПВ) метилового спирта, если температура его кипения равна 65°.

Решение: Расчет производим по формуле (2.1), значение констант определяем по **приложению 1** для нормальных жирных спиртов:

$$t_H = 0,5746 \cdot 65 - 33,7 = 3,6^\circ\text{C} = 276,6 \text{ K};$$

$$t_B = 0,6928 \cdot 15,0 = 30^\circ\text{C} = 303 \text{ K}.$$

Определим относительную ошибку расчета. По **приложению 3** находим, что ТПВ метилового спирта равны: 280 К – нижний предел воспламенения и 312 К – верхний предел воспламенения:

$$\Delta H = \frac{276,6 - 280}{280} 100 = -1,2\%$$

$$\Delta B = \frac{303 - 312}{312} 100 = -2,9\%$$

Следовательно, результаты расчета занижены менее чем на 3%.

Пример № 2.2. Определить температурные пределы воспламенения (ТПВ) ацетона, если его концентрационные пределы в воздухе равны 2,2 +13%. Атмосферное давление – нормальное.

Решение: По формуле (2.2) и **приложению 2** определим давление насыщенного пара ацетона, соответствующее нижнему и верхнему пределам воспламенения:

$$P_H = \frac{2,2 \cdot 101325}{100} = 2,23 \text{ кПа};$$

$$P_B = \frac{13,0 \cdot 101325}{100} = 13,04 \text{ кПа}.$$

Из приложения 2 следует, что нижние температурные пределы вещества (НТПВ) находятся между температурами 241,9 и 252,2К, а верхние температурные пределы вещества (ВТПВ) – между 271,0 и 280,7К.

Линейной интерполяцией определим ТПВ:

$$T_H = 241,9 + \frac{(22,3 - 13,33) \cdot (252,2 - 241,9)}{26,66 - 13,33} = 248,8 \text{ K}$$

$$T_B = 271 + \frac{(131,7 - 79,99) \cdot (280,7 - 271)}{133,32 - 79,99} = 280,4 \text{ K}$$

Зная справочные значения ТПВ ацетона (253+279К, см. **приложение 3**), можно определить относительную ошибку расчета:

$$\Delta H = \frac{248.8 - 253}{253} 100 = -1.7\%;$$

$$\Delta B = \frac{280.4 - 279}{279} 100 = 0.5\%$$

3 ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

3.1 Теоретическая часть

Под **тепловым эффектом** реакции понимают количество теплоты, которое выделяется или поглощается системой в ходе реакции.

В тех случаях, когда теплосодержание системы после реакции уменьшается (реакция идет с выделением энергии), реакция является **экзотермической**. Если теплосодержание конечных продуктов выше исходных (реакция идет с поглощением энергии), реакция является **эндотермической**.

Теплосодержание системы определяется теплотой образования компонентов системы (продуктов горения и исходного вещества). Таким образом тепловой эффект реакции можно записать:

$$\Delta H_{\Gamma} = \sum \Delta H^{\circ} f_{\text{пр}} - \sum \Delta H^{\circ} f_{\text{гв}}, \quad (3.1)$$

где $\Delta H^{\circ} f_{\text{пр}}$ и $\Delta H^{\circ} f_{\text{гв}}$ – теплота образования продуктов горения и исходных горючих веществ соответственно.

Теплота образования веществ определяется по справочникам или рассчитывается исходя из структуры вещества.

Теплотой сгорания называется количество тепла, выделяющееся при полном сгорании единицы количества вещества при условии, что начальные и конечные продукты находятся в стандартных условиях.

Различают:

молярную Q – для одного моля (кДж/моль),

массовую Q' – для одного килограмма (кДж/кг),

объемную Q'' – для одного кубического метра вещества (кДж/м³)

теплоту сгорания.

В зависимости от агрегатного состояния воды, образовавшейся в процессе горения, различают высшую $Q_{\text{в}}$ и низшую $Q_{\text{н}}$ теплоту сгорания.

Высшей теплотой сгорания называется количество тепла, которое выделяется при полном сгорании единицы количества горючего вещества, включая тепло конденсации водяных паров.

Низшей теплотой сгорания называется количество тепла, которое выделяется при полном сгорании единицы количества горючего вещества при условии, что вода в продуктах горения находится в газообразном состоянии.

Молярную теплоту сгорания рассчитывают в соответствии с законом Гесса:

$$Q_{\text{гор}} = \sum_i^n n_i \Delta H^0 f_{\text{ГВ}}, \text{ кДж/моль.} \quad (3.2)$$

Для расчета молярной теплоты сгорания Q в массовую Q' можно использовать формулу:

$$Q_{\text{гор}}^1 = Q_{\text{гор}} * 1000 / \mu, \text{ кДж/моль,} \quad (3.3)$$

где μ – молярная масса горючего вещества, кг/кмоль.

Для веществ в газообразном состоянии при пересчете из стандартной теплоты сгорания Q в объемную Q'' используют формулу:

$$Q_{\text{гор}}^2 = Q_{\text{гор}} * 1000 / V_{\mu}, \quad (3.4)$$

где V_{μ} – объем моля газа, который при стандартных условиях составляет $22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$.

Для сложных горючих веществ или смесей можно вывести формулу определения теплоты сгорания исходя из состава и процентного содержания компонентов.

Достаточно точные результаты дает формула Менделеева для высшей теплоты сгорания:

$$Q_{\text{В}}' = 339,4 \cdot \varphi \text{C} + 1256,8 \cdot \varphi \text{H} + 108,9(\varphi \text{S} - \varphi \text{O} - \varphi \text{N}), \quad (3.5)$$

где φO , φN , φS , φC , φH – процентное содержание кислорода, азота, серы, углерода, водорода в горючем веществе.

Для низшей теплоты сгорания:

$$Q_{H'} = Q_{V'} - 25,1(9 \cdot \varphi H + W\%), \text{ кДж/кг}, \quad (3.6)$$

где $W\%$ – содержащее влаги в горючем веществе.

Теплота сгорания имеет большое практическое значение при расчете пожарной нагрузки и параметров пожара.

Под **пожарной нагрузкой** ($P_{\text{пож}}$) понимают количество тепла, которое может выделиться при сгорании веществ и материалов, приходящихся на один квадратный метр поверхности пола помещения, МДж/м².

Пожарная нагрузка является количественной характеристикой, определяющей тепловое влияние пожара на строительные конструкции. Пожарную нагрузку рассчитывают, как сумму произведений масс всех горючих материалов на их низшую теплоту сгорания, отнесенную к единице поверхности пола по формуле:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot Q_{1H_i}}{S_{\text{пола}}} * 10^{-3}, \text{ МДж/м}^2. \quad (3.7)$$

Низшая теплота сгорания также используется для определения пожарной опасности горючих веществ. Экспериментально доказано, что вещества являются негорючими, если они не относятся к взрывоопасным и их низшая теплота сгорания меньше, чем 2100 кДж/кг или 1830 кДж/м³.

Тепло, выделяющееся в зоне горения, расходуется на нагревание продуктов горения и теплопотери (к последним относятся предварительный нагрев горючего вещества и излучение из зоны горения в окружающую среду).

Максимальная температура в зоне горения, до которой нагреваются продукты горения, называется **температурой горения**.

В зависимости от условий, в которых протекает процесс горения различают калориметрическую, теоретическую, адиабатическую и действительную температуры горения.

Под **калориметрической температурой** горения понимают температуру, до которой нагреваются продукты горения при соблюдении следующих условий:

- 1) все тепло, выделившееся в процессе реакции, идет на нагревание продуктов горения;
- 2) происходит полное сгорание стехиометрической горючей смеси, коэффициент избытка воздуха ($\alpha_{\text{в}} = 1$);
- 3) в процессе образования продуктов горения не происходит их диссоциация;
- 4) горючая смесь находится при начальной температуре 273К и давлении 101,3 кПа.

Теоретическая температура горения отличается от калориметрической тем, что в расчетах учитываются тепло потери на диссоциацию продуктов горения.

Диссоциацию продуктов горения нужно учитывать при температурах выше 1700°C.

Адиабатическая температура горения определяется для не стехиометрической горючей смеси ($\alpha_{\text{в}} \neq 1$).

Действительная температура горения - это температура, до которой нагреваются продукты горения в реальных условиях.

Температуру горения используют при расчетах давления взрыва, для определения площади легко сбрасываемых конструкций, температуры пожара и других параметров.

3.2 Методические указания по расчету теплоты сгорания веществ

Цель работы: Усвоить основные понятия энергетического баланса процессов горения. Научиться делать расчет теплоты сгорания для разного типа горючего вещества (индивидуальные вещества, сложные вещества, газы)

Расчетные формулы

При расчетах теплового баланса на пожаре определяют, как правило, низшую теплоту сгорания (таблица 3.1):

$$Q_{\text{в}} - Q_{\text{н}} = Q_{\text{ис}}, \quad (3.8)$$

где $Q_{\text{в}}$ - высшая теплота сгорания;
 $Q_{\text{н}}$ - низшая теплота сгорания;

$Q_{ис}$ - теплота испарения воды, выделяющейся при сгорании вещества.

Таблица 3.1 – Расчет теплоты сгорания

Тип горючего вещества	Расчет теплоты сгорания	Размерность
Индивидуальное вещество	$Q_H = \sum(\eta_i \Delta H_i - \eta_j \Delta H_j)$ (3.9)	кДж/моль;
Вещества сложного состава (формула Д.И.Менделеева)	$Q_H = 339,4C + 1257H - 108,9(O-S) - 25,1(9H+W)$ (3.10)	кДж/кг
Смесь газов	$Q_H = \frac{1}{100} \sum Q_{Hi} * \varphi_{ri}$ (3.11)	кДж/моль; кДж/м ³

где ΔH_i и ΔH_j – соответственно теплоты образования одного кмоль i -го конечного продукта горения и j – го исходного вещества;

η_i , η_j – соответственно количество кмоль i -го продукта реакции и j – го исходного вещества в уравнении реакции горения;

C, H, S, W – соответственно содержание, % вес, углерода, серы, водорода, влаги в составе вещества;

O – сумма кислорода и азота, % вес;

Q_{Hi} – низшая теплота сгорания i -го горючего компонента газовой смеси, кДж/моль; кДж/м³;

φ_{ri} – содержание i -го горючего компонента в газовой смеси, % об.

Расчет теплоты сгорания газоздушных смесей проводят по формуле:

$$Q_H^{см} = \frac{1}{100} Q_H \varphi_r, \quad (3.12)$$

где $Q_H^{см}$ – теплота сгорания газоздушной смеси, кДж/м³, кДж/м³;

Q_H – низшая теплота сгорания горючего вещества, кДж/м³, кДж/м³;

φ_r – концентрация горючего в смеси, % об.

Удельная скорость (интенсивность) тепловыделения при горении:

$$q=Q_H \cdot m, \quad (3.13)$$

где q - удельная интенсивность тепловыделения, кВт/м³;
 m - массовая скорость выгорания, кг/(м²·с).

Интенсивность тепловыделения при горении:

$$Q = Q_H \cdot m \cdot F, \quad (3.14)$$

где Q - интенсивность тепловыделения, кВт;
 F - площадь горения, м².

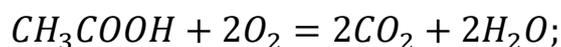
Определение теплоты сгорания Q_H 1м³ газовой смеси рассчитывается по отношению теплоты сгорания вещества Q на объем, занимаемый 1 молем газа при стандартных условиях (24,4 м³):

$$Q_H = Q / 24,4 \cdot 10^3 \text{ (кДж/м}^3\text{)}. \quad (3.15)$$

Примеры решения задач

Пример № 3.1. Определить низшую теплоту сгорания уксусной кислоты, если теплота ее образования 485,6 кДж/моль;

Решение: Для расчета по формуле (3.9) запишем уравнение горения уксусной кислоты в кислороде:



$$Q_H = (2 \cdot 396,9 + 2 \cdot 242,2 - 1 \cdot 485,6) = 792,6 \text{ кДж/моль} = 792,6 \cdot 10^3 \text{ кДж/моль};$$

Для расчета количества тепла, выделяющегося при горении 1кг горючего, необходимо полученную величину разделить на её молекулярную массу (64):

$$Q_H = 792,6 \cdot 10^3 / 64 = 12384 \text{ кДж/кг.}$$

Пример № 3.2. Рассчитать низшую теплоту сгорания органической массы состава:

$$C-62\%, H-8\%, O-28\%, S-2\%.$$

Решение: По формуле Д.И. Менделеева (3.10)

$$Q_H = 339,4 \cdot 62 + 1257 \cdot 8 - 108,9 (28 - 2) - 25,1 \cdot 9 \cdot 8 = 26460 \text{ кДж/кг.}$$

Пример № 3.3. Определить низшую теплоту сгорания газовой смеси, состоящей из CH_4 – 40%, C_4H_{10} – 20%, O_2 – 15%, H_2S – 5%, NH_3 – 10%, CO_2 – 10%.

Решение: Для каждого горючего компонента смеси по формуле (3.2) находим теплоты сгорания (таблица 3.2)

Таблица 3.2 – Теплота сгорания

Уравнение реакции	Теплота образования горючего, 10^3 Дж/моль	Теплота сгорания, 10^3 кДж/моль;
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	333,5	$Q_{\text{H}} = 1 \cdot 396,9 + 2 \cdot 242,2 - 333,5 = 547,8$
$\text{C}_4\text{H}_{10} + 5,6\text{O}_2 = 4\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O}$	132,4	$Q_{\text{H}} = 4 \cdot 396,9 + 5 \cdot 242,2 - 132,5 = 2666,1$
$\text{H}_2\text{S} + 1,5\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2$	201,1	$Q_{\text{H}} = 242,2 + 297,5 - 201,1 = 338,6$
$\text{NH}_3 + 0,75\text{O}_2 = 1,4\text{H}_2\text{O} + 0,5\text{N}_2$	46,1	$Q_{\text{H}} = 1,5 \cdot 242,2 - 46,1 = 317,2$

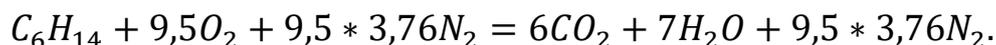
По формуле (3.11) определим теплоту сгорания газовой смеси:
 $Q_{\text{H}} = 1/100 \cdot (547,8 \cdot 40 + 2666,1 \cdot 20 + 338,6 \cdot 5 + 317,2 \cdot 10) \cdot 10^3 = 1020 \cdot 10^3$
 кДж/кг.

Для определения теплоты сгорания 1 м^3 газовой смеси необходимо полученное значение разделить на объем, занимаемый 1 молем газа при стандартных условиях ($24,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$):

$$Q_{\text{H}} = 1020 \cdot 10^3 / 24,4 = 41803 \text{ кДж/кг.}$$

Пример № 3.4. Рассчитать теплоту сгорания 1 м^3 стехиометрической гексано-воздушной смеси.

Решение: Находим стехиометрический состав горючей смеси по уравнению реакции горения:



Весь объем вступивших в реакцию компонентов ($1 + 9,5 + 9,5 \cdot 3,76$) принимаем за 100%, а количество горючего будет соответствовать стехиометрической концентрации:

$$\Phi_{\text{ст}} = \frac{1 \cdot 100}{1 + 9,5 + 9,5 \cdot 3,76} = 2,2\%.$$

Теплоту сгорания 1 м^3 гексана определим по формуле (3.15)

$$Q_H = \frac{4150,6}{24,4} 10^3 = 170,1 * 10^3 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

Теплоту сгорания 1 м^3 стехиометрической гексано-воздушной смеси определим по формуле (3.12):

$$Q_H^{\text{см}} = 170,1 * 10^3 * \frac{2,2}{100} = 3742 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

Пример № 3.5. Определить интенсивность тепловыделения на пожаре органической массы (состав в примере 2), если скорость выгорания $0,015 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, а площадь пожара 150 м^2 .

Решение:

Согласно формулы (3.14):

$$Q_H = 26460,0 \cdot 0,015 \cdot 150 = 59,5 \cdot 10^3 \text{ кВт}.$$

4 РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПРЕДЕЛОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

4.1 Теоретическая часть

Теория дефлаграционного горения не накладывает ограничений на возможность уменьшения скорости распространения горения. Однако опыт показывает, что величина скорости распространения горения не может быть меньше определенного критического значения. Распространение пламени в смесях горючего и окислителя возможно только в определенном диапазоне их концентраций. При зажигании смеси, состав которой выходит за эти пределы, стойкое горение не возникает.

Для горючих смесей различают нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени.

Нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПРП) - наименьшая концентрация горючего вещества в смеси с воздухом, при которой уже возможное стойкое, незатухающее распространение горения.

Верхний концентрационный предел распространения пламени (ВКПРП) – наибольшая концентрация горючего вещества в смеси с воздухом, при которой еще возможное стойкое, незатухающее распространение горения.

Концентрационные пределы распространения пламени (КПРП) - одна из важнейших характеристик взрывоопасности горючих газов и паров. Область концентрации горючего вещества, которая лежит между нижним и верхним КПРП, характеризуется возможностью загорания и устойчивого горения смеси и называется областью взрывоопасных концентраций. Если концентрация горючего вещества выходит за концентрационные пределы, горючая смесь становится взрывобезопасной. Так, если концентрация горючего вещества меньше нижнего КПРП, то горение вообще невозможно. Если концентрация горючего вещества больше ВКПРП, то возможно диффузионное горение такой газовой смеси при выходе ее в окружающее пространство и наличии источника зажигания.

Максимальная скорость реакции и распространения фронта пламени наблюдается при стехиометрическом соотношении компонентов (концентрации горючего равной стехиометрической $\phi_{ГВ} = \phi_{СМК}$). При отклонении от стехиометрического соотношения скорость горения, а, следовательно и скорость тепловыделения будут снижаться. Так, при $\phi_{ГВ} < \phi_{СТМ}$ скорость тепловыделения уменьшается в результате нехватки горючего, и нагревании излишка окислителя, что приводит к дополнительным тепловым потерям. При $\phi_{ГВ} > \phi_{СМК}$ снижение тепловыделения происходит в результате нехватки окислителя, и затратам на нагревание избытка топлива, не принимающего участия в химической реакции. Таким образом, для парогазовых смесей можно выделить как минимальную (нижнюю) ϕ_n , так и максимальную (верхнюю) ϕ_v концентрацию горючего, при которой наступают критические условия распространения фронта пламени.

Учитывая, что концентрационные пределы распространения пламени могут изменяться при изменении внешних условий, для обеспечения пожарной безопасности при работе с горючими веществами определяют не только концентрационные пределы, но и безопасные концентрации $\phi_{нб}$ и $\phi_{вб}$, ниже или выше которых смесь гарантировано не будет зажигаться. Безопасные концентрации можно рассчитать по формулам:

$$\phi_{нб} < 0,9(\phi_n - 0,21), \% \quad (4.1)$$

$$\phi_{вб} \geq 1,1(\phi_v + 0,42), \% \quad (4.2)$$

где ϕ_n, ϕ_v — НКПРП и ВКПРП, %;

Расположение областей возможных концентраций горючего отображено на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Расположение областей

Концентрационные пределы распространения пламени могут сильно изменяться при изменении внешних условий. Изменения КППП объясняются с точки зрения баланса тепловыделения и теплоотдачи в системе. Все факторы, изменение которых приведет к увеличению тепловыделения, будут расширять КППП (снижать нижний КППП и повышать верхний КППП). Факторы, увеличивающие теплоотдачу, будут суживать КППП (увеличивать нижний КППП и уменьшать верхний КППП). Наибольшее влияние на КППП оказывают:

- концентрация окислителя в окислительной среде (содержание кислорода в воздухе);
- концентрация инертных газов (флегматизаторов);
- температура и давление смеси;
- мощность источника зажигания;

Практическое значение КППП

КППП применяют в следующих случаях:

1. Для сравнительной оценки пожарной опасности веществ. Например, концентрационные пределы:
 - бутана C_4H_{10} 1,8–9%;
 - бутена C_4H_8 1,6–10%;
 - винилацетилена C_4H_4 1,8–53,2%.

Наиболее пожароопасным из них является винилацетилен, поскольку в более широком диапазоне концентраций образует взрывоопасные смеси.

2. Для оценки пожарной опасности фактической концентрации парогазовых систем. Например, для того чтобы определить степень пожарной опасности паровоздушной смеси бензола с концентрацией 4%, необходимо сравнить данную фактическую концентрацию с КППП бензола. У бензола КППП составляют 1,4–7,1%, следовательно фактическая концентрация является взрывоопасной.

3. Для определения взрывобезопасной концентрации паров и газов внутри технологического оборудования (ниже $\varphi_{нб}$ и выше $\varphi_{вб}$).

4. Для расчета предельно допустимых концентраций газов при разработке мероприятий по обеспечению пожарной безопасности вентиляционных систем.

Для практического определения концентрации паров и газов в воздухе служат различные газоанализаторы и сигнализаторы предельно допустимых концентраций периодического и постоянного действия типа СТХ-5, СТХ-6, ЭТХ-1 и др.

4.2 Методические указания по расчету концентрационных пределов воспламенения

Цель работы: Изучить теорию дефлаграционного горения. Освоить и научиться применять расчетные формулы для определения верхнего (нижнего) концентрационного предела воспламенения.

Расчетные формулы для решения задач

Нижний концентрационный предел воспламенения φ_n определяют по предельной теплоте сгорания. Установлено, что 1 м^3 газо-воздушной смеси на НКПВ выделяет при горении приблизительно постоянно количество тепла – 1830 кДж, называемое предельной теплотой горения. Следовательно,

$$\varphi_n = \frac{Q_{пр} * 100}{Q_n}, \quad (4.3)$$

где $Q_{пр}$ – предельная теплота сгорания 1830 кДж/м³;

Q_n – низшая теплота сгорания горючего вещества, кДж/м³.

Нижний и верхний КПВ могут быть определены по аппроксимационной формуле:

$$\varphi_{H(B)} = \frac{100}{an+b} \quad (4.4)$$

где n – стехиометрический коэффициент при кислороде в уравнении химической реакции;

a, b - эмпирические константы, значение которых приведены в таблице 4.1.

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

$$\varphi_{H(B)} = \frac{P_{H(B)} * 100}{P_o}, \quad (4.5)$$

где $P_H(B)$ – давление насыщенного пара вещества при температуре, соответствующей нижнему пределу воспламенения, Па (**Приложение 2**);

P_0 – давление окружающей среды, Па.

Таблица 4.1 – Концентрационные пределы воспламенения

Концентрационные пределы воспламенения	Значение коэффициентов	
	а	в
Нижний предел	8,684	4,679
Верхний предел		
$n \leq 7,5$	1,550	0,560
$n > 7,5$	0,765	6,554

Для расчета концентрационных пределов воспламенения смесей горючих газов используют правило Ле-Шателье:

$$\varphi_{H(B)}^{CM} = 1 / \sum \frac{\varphi_{H(B)}^i}{M_i}, \quad (4.6)$$

где $\varphi_{H(B)}^{CM}$ – нижний (верхний) КПВ смеси газов, % об;

$\varphi_{H(B)}^{CM}$ – нижний (верхний) предел воспламенения i -го горючего газа;

M_i – мольная доля i -го горючего газа в смеси.

Следует иметь при этом в виду, что $\sum M_i = 1$, т.е. концентрация горючих компонентов газовой смеси принимается за 100%.

Если известны концентрационные пределы воспламенения при температуре T_1 , то при температуре T_2 они вычисляются по формуле:

$$\varphi_{HT2} = \varphi_{HT1} \left(1 - \frac{T_2 - T_1}{T_r - T_1} \right); \quad (4.7)$$

$$\varphi_{BT2} = \varphi_{BT1} \left(1 - \frac{T_2 - T_1}{T_r - T_1} \right); \quad (4.8)$$

где φ_{HT2} ; φ_{HT1} – нижний концентрационный предел воспламенения соответственно при температурах T_1 и T_2 ;

φ_{BT2} , φ_{BT1} – верхний концентрационный предел воспламенения соответственно при температурах T_1 и T_2 ;

T_r – температура горения смеси.

Приближенно при определении НКПВ T_r принимают 1550К, при определении НКПВ – 1100К.

При разбавлении газо-воздушной смеси инертными газами (N_2 , CO_2 , H_2O) область воспламенения сужается: верхний предел уменьшается, а нижний – возрастает. Концентрация инертного газа (флегматизатора), при которой нижний и верхний пределы воспламенения смыкаются, называется минимальной флегматизирующей концентрацией φ_ϕ . Содержание кислорода в такой системе называют минимальным взрывоопасным содержанием кислорода φ_{O_2} (МВСК). Некоторое содержание кислорода ниже МВСК называют безопасным $\varphi_{O_2\text{без}}$. Расчет указанных параметров проводят по формулам:

$$\varphi_\phi = \frac{h_{f\Delta}^1 * H_f^0 + h_\phi + \sum h_i^1 * m_i}{h_\phi^2 - 1 + \sum h_i^2 * m_i}, \quad (4.9)$$

$$\varphi_{O_2} = \frac{100 - \varphi_\phi}{4,844}, \quad (4.10)$$

$$\varphi_{O_2\text{без}} = 1,2 * \varphi_{O_2} - 4,2, \quad (4.11)$$

где ΔH_f^0 – стандартная теплота образования горючего, кДж/моль;

h_f^1 , h_ϕ^1 , h_ϕ^2 – константы, зависящие от элемента в молекуле горючего и вида флегматизатора;

m_i – количество i -го элемента (структурной группы) в молекуле горючего.

Примеры решения задач

Пример № 4.1. По предельной теплоте сгорания определить нижний концентрационный предел воспламенения бутана в воздухе.

Решение: Для расчета по формуле (4.3) по **Приложению 4** находим низшую теплоту сгорания вещества – 2882,3 кДж/моль. Эту величину надо перевести в другую размерность – кДж/м³:

$$\frac{2882,3 \cdot 1000}{22,4} = 128,7 * 10^3 \text{ кДж/м}^3.$$

По формуле (4.1) определим НКПВ:

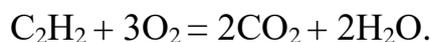
$$\varphi_H = \frac{1830 \cdot 100}{128,7 \cdot 10^3} = 1,42\%.$$

По **приложению 5** находим, что экспериментальное значение предела воспламенения $\varphi_H=1,9\%$. Относительная ошибка расчета, следовательно, составила:

$$\Delta_H = \frac{1,9 - 1,42}{1,9} \cdot 100 \approx 25\%.$$

Пример № 4.2. Определить концентрационные пределы воспламенения этилена в воздухе.

Решение: Расчет КПВ проводим по аппроксимационной формуле. Определяем значение стехиометрического коэффициента при кислороде:



Таким образом, $n = 3$, тогда:

$$\varphi_H = 100/8,684 \cdot 3 + 4,679 = 3,25\%;$$

$$\varphi_B = 100/1,55 \cdot 3 + 0,56 = 19,23\%.$$

Определим относительную ошибку расчета. По **приложению 5** экспериментальные значения пределов равны 3,0 + 32,0:

$$\Delta_H = 3,25 - 3,0/3,0 \approx 8\%,$$

$$\Delta_B = 19,23 - 32,0/32 \approx -40\%.$$

Следовательно, при расчете НКПВ этилена результат завышен на 8%, а при расчете ВКПВ – занижен на 40%.

Пример № 4.3. Определить концентрационные пределы воспламенения насыщенных паров метанола в воздухе, если известно, что его температурные пределы равны 280+312К. Атмосферное давление – нормальное.

Решение: Для расчета по формуле (4.5) необходимо определить давление насыщенных паров, соответствующих нижнему (280К) и верхнему (312К) пределам воспламенения.

По **приложению 2** находим, что давление насыщенного пара на нижнем температурном пределе воспламенения находится между 53,3 и 79,99 ГПа. Так как ближайшие НТПВ по **приложению 2** равны 273 и 285,1 К, линейной интерполяцией находим давление, соответствующее нижнему температурному пределу (280К):

$$P_H = 53,33 + \frac{(79,99 - 53,33) \cdot (280 - 278)}{285,1 - 278} = 60,84 \text{ ГПа.}$$

Давление насыщенного пара метанола, соответствующее верхнему пределу, находится между 266,64 и 533,29 ГПа:

$$P_B = 266,64 + \frac{(533,29 - 266,64) \cdot (312 - 307,8)}{322,9 - 307,8} = 340,81 \text{ ГПа}$$

По формуле (4.5) определим НКПВ:

$$\varphi_H = \frac{60,84 \cdot 100}{1013,25} = 6\%,$$

$$\varphi_B = \frac{340,81 \cdot 100}{1013,25} = 33.$$

Экспериментальное значение КПВ метанола (**приложение 3**) – 6,0% (н), 34,7% (в). Относительная ошибка расчета:

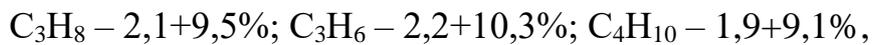
$$\Delta_H = \frac{6,00 - 6,0}{6,0} 100 = 0\%,$$

$$\Delta_B = \frac{33,6 - 34,7}{34,7} 100 = -3,1.$$

Следовательно, результаты расчета ВКПВ по известным значениям ТПВ занижены на 3 %. Это связано с ошибкой в определении давления насыщенного пара линейной интерполяцией.

Пример № 4.4. Определить концентрационные пределы воспламенения газовой смеси, состоящей из 40% пропана, 50% бутана, 10% пропилена.

Решение: Для расчета КПВ смеси газов по правилу Ле-Шателье (4.6) необходимо определить КПВ индивидуальных горючих веществ, методы расчета которых рассмотрены выше:



$$\varphi_{СМН} = \frac{1}{\frac{0,4}{2,1} + \frac{0,5}{1,9} + \frac{0,2}{2,2}} = 2\%;$$

$$\varphi_{СМВ} = \frac{1}{\frac{0,4}{2,1} + \frac{0,5}{9,1} + \frac{0,1}{10,1}} = 9,38\%.$$

Пример № 4.5. Каково минимальное количество диэтилового эфира, кг, способное при испарении в емкости объемом 350 м² создать взрывоопасную концентрацию.

Решение: Концентрация будет взрывоопасной, если концентрация паров горючего вещества $\varphi_{пр} = \varphi_n$.

Расчетом (см. примеры 1–3) или по **приложению 3** находим НКПВ диэтилового эфира, необходимой для создания в объеме 350 м³ этой концентрации:

$$V_{пр} = \frac{1,7 \cdot 350}{100} = 5,95 \text{ м}^3$$

Таким образом, для создания НКПВ диэтилового эфира в объеме 350 м³ необходимо ввести 5,95 м³ его паров. Принимая во внимание, что

1 моль (74 г) газа, пара, приведенный к нормальным условиям, занимает объем, равный $22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, находим количество диэтилового эфира:

$$P_r = \frac{74 \cdot 5,95 \cdot 10^3}{22,4} = 19,7 \text{ кг.}$$

Пример № 4.6. Определить, образуется ли взрывоопасная концентрация насыщенных паров над поверхностью резервуара, содержащего 60% диэтилового эфира и 40% этилового спирта, при температуре 245К?

Решение: концентрация паров будет взрывоопасной, если

$$\varphi_{\text{н}}^{\text{см}} \leq \varphi_{\text{нп}}^{\text{см}} \leq \varphi_{\text{в}}^{\text{см}}.$$

($\varphi_{\text{в}}^{\text{см}}$ - концентрация насыщенных паров смеси жидкостей).

Очевидно, что в результате различной летучести веществ состав газовой фазы будет отличаться от конденсированной. Содержание компонентов в газовой фазе по известному составу жидкой определим по закону Рауля для идеальных растворов жидкостей.

1. Определим мольный состав жидкой фазы:

$$\mu_i = \frac{q_i/M_i}{\sum q_i/M_i},$$

где μ_i - мольная доля i -того вещества, q_i - весовая доля i -того вещества, M_i - молекулярная масса i -того вещества ($M_{\text{дэ}}=70$, $M_{\text{эс}}=46$)

$$\mu_{\text{д.з.}(ж)} = \frac{0,6/70}{\frac{0,6}{70} + \frac{0,4}{46}} = 0,496,$$

$$\mu_{\text{э.с.}(ж)} = 1 - 0,496 = 0,504.$$

2. По **приложению 2** определим давление насыщенного пара при 245К над индивидуальными жидкостями:

$$P_{\text{нп}(дэ)} = 1,33 + \frac{(13,33 - 1,33) \cdot (245 - 241,7)}{270,7 - 241,7} = 15,00 \text{ ГПа.}$$

По закону Рауля, парциальное давление насыщенных паров индивидуальной жидкости над смесью равно произведению насыщенного пара над чистой жидкостью на ее мольную долю в жидкой фазе, т.е.

$$P_{\text{пар}(дэ)} = 53,34 \cdot 0,496 = 26,46 \text{ ГПа;}$$

$$P_{\text{пар}(эс)} = 15,00 \cdot 0,504 = 7,56 \text{ ГПа.}$$

3. Приняв сумму давлений насыщенных паров диэтилового эфира и этилового спирта (26,46+7,56), равной 100%, определим:

- концентрацию паров в воздухе:

$$\varphi_{\text{НП}}^{\text{см}} = \frac{26,46 + 7,56}{1013,25} 100 = 3,36\%;$$

- мольный состав газовой фазы(закон Рауля- Дуэртье)

$$\mu_{\text{д.э}(r)} = \frac{26,46 + 7,56}{1013,25} 100 = 3,36\%;$$

$$\mu_{\text{э.с}(п)} = 1,00 - 0,781 = 0,222.$$

4. Определив расчетом или по справочным данным (**приложение 3**) КПВ индивидуальных веществ (диэтиловый эфир 1,7%, 49% этиловый спирт 3,6%, 19%), по правилу Ле-Шателье рассчитаем КПВ паровой фазы:

$$\varphi_{\text{Н}}^{\text{сн}} = \frac{1}{\frac{0,788}{1,7} + \frac{0,222}{3,6}} = 1,93\%,$$

$$\varphi_{\text{В}}^{\text{см}} = \frac{1}{\frac{0,788}{49} + \frac{0,222}{19}} = 36,28\%$$

Сравнивая полученные в п.4а концентрацию паровоздушной смеси с КПВ, делаем заключение, что при 245К над данной жидкой фазой образуется взрывоопасная концентрация насыщенных паров в воздухе.

Пример № 4.7. Рассчитать безопасную концентрацию кислорода при разбавлении углекислым газом смеси паров ацетона в воздухе.

Решение: По **приложению 4** находим теплоту образования ацетона $248,1 \cdot 10^3$ Дж/моль. Из химической формулы ацетона ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) следует, что $m_c=3$, $m_n=6$, $m_o=1$. Значение остальных параметров выбираем из приложения 2 для двуокиси углерода:

$$\varphi_{\text{ф}} = \frac{100 * 0,735 * 10^5 * 248,1 * 10^3 + 0,584 + 1,292 * 3 + 0,427 * 6 + 0,570 * 1}{2,020 - 1 + 4,462 * 3 + 1,160 * 6 - 2,321 * 1} = 48,1\%$$

$$\varphi_{\text{O}_2} = \frac{100 - 48,1}{4,844} = 0,7\%,$$

$$\varphi_{\text{O}_2 \text{ без}} = 1,2 * 10,7 - 4,2 = 8,6\%.$$

Следовательно, при снижении концентрации кислорода в четырехкомпонентной системе, состоящей из паров ацетона, двуокиси

углерода, азота и кислорода, до 8,6% смесь является взрывобезопасной. При содержании же кислорода, равном 10,7% эта смесь будет предельной по взрываемости. Согласно справочным данным (справочник «Пожарная опасность веществ и материалов, применяемых в химической промышленности». – М. : Химия), МВСК ацетоно-воздушной смеси при разбавлении ее двуокисью углерода составляет 14,9%. Определим относительную ошибку расчета:

$$\Delta = \frac{10,7 - 14,9}{14,9} = -28\%$$

Таким образом, результаты расчета МВСК занижены на 28%.

5 ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ВЕЩЕСТВ. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРЕДЕЛЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ (ТПРП)

5.1 Температурные пределы распространения пламени

Давление насыщенного пара определяется его концентрацией и зависит от температуры жидкости. При определенных температурах концентрация насыщенного пара жидкости становится равной нижнему или верхнему концентрационному пределу распространения пламени. Таким образом, пожарную опасность горючих жидкостей можно оценивать не по концентрации ее пара, а по температуре самой жидкости. Таким образом, вместо концентрационного предела можно указать температуру жидкости, при которой эта концентрация образуется.

Такие температуры называются температурными пределами распространения пламени. Как и для концентрационных пределов можно определить нижний и верхний температурный предел распространения пламени.

Температурными пределами распространения пламени (нижним -НТПРП или верхним - ВТПРП) называют такие температуры жидкости, при которых над ее поверхностью образуется насыщенный пар в концентрации, равной (соответственно нижнему или верхнему) концентрационному пределу распространения пламени.

При температурах ниже нижнего температурного предела концентрация насыщенного пара имеет величину ниже нижнего концентрационного предела распространения пламени, то есть является безопасной.

При температуре выше верхнего температурного предела жидкость образует насыщенный пар, концентрация которого выше верхнего концентрационного предела, и горения такого пара не будет. Однако, такая смесь насыщенных паров является пожароопасной, так как при выходе из емкости в воздух она может гореть в диффузионном режиме.

Для обеспечения пожаровзрывобезопасности процессов производства, переработки, хранения и транспортировки жидкостей

определяют безопасную нижнюю $t_{нб}$ и безопасную верхнюю $t_{вб}$ рабочую температуру.

Для упрощенных расчетов безопасные температуры можно определить по формулам:

$$t_{нб} < 0,9 (t_{н} - K_{без}), \quad (5.1)$$

$$t_{вб} \geq 1,1(t_{в} - K_{без}), \quad (5.2)$$

где $K_{без}$ — коэффициент безопасности, равный:

- для индивидуальных веществ и нефтепродуктов $10,5^{\circ}\text{C}$,
- для технических и реакционных смесей 14°C .

Температурные пределы, равно как и концентрационные, не являются постоянными величинами и зависят от ряда факторов внешней среды. Характерные области температур жидкости и концентраций ее паров схематически изображены на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1 – Области температур жидкости и концентраций ее паров

Использование ТПРП, как показателя пожарной опасности жидкостей, значительно упрощает работу по определению степени пожарной опасности горючих жидкостей, поскольку в отличие от концентрационных пределов не требует применения сложных приборов.

С помощью ТПРП можно:

1) провести сравнительную оценку степени пожарной опасности двух жидкостей.

Например, из трех жидкостей: гексанол (ТПРП составляет $57 \div 92^{\circ}\text{C}$), метанол ($5 \div 39^{\circ}\text{C}$), ацетон ($-20 \div 6^{\circ}\text{C}$) наиболее безопасным является гексанол, так как он образует опасные концентрации насыщенного пара лишь при повышенных температурах.

2) определить область взрывобезопасных температур работы технологического оборудования. Для обеспечения пожарной безопасности технологических процессов нужно выбирать температурный режим работы аппаратов с таким учетом, чтобы рабочие концентрации находились вне зоны опасных концентраций. Таким образом, рабочие температуры должны быть ниже нижнего безопасного или выше верхнего безопасного температурного предела распространения пламени $t_{\text{раб}} < t_{\text{нб}}$ и $t_{\text{раб}} > t_{\text{вб}}$.

3) определить степень пожарной опасности паров в емкостях и закрытых технологических аппаратах при фактической температуре.

Например, при фактической температуре 20°C гексанол является безопасным, метанол — взрывоопасным, а ацетон — взрывобезопасным, но пожароопасным.

5.2 Условия загорания жидкостей в открытом пространстве, температура вспышки

Если жидкость испаряется в открытое пространство, то часть пара все время диффундирует в окружающее пространство. При этом концентрация пара постепенно изменяется по высоте. Непосредственно над поверхностью жидкости она равняется концентрации насыщенного пара, а на большом расстоянии — снижается практически до нуля (рисунок 5.2, кривая 1). Для жидкостей в закрытом пространстве концентрация пара не зависит от расстояния (рисунок 5.2, прямая 2).

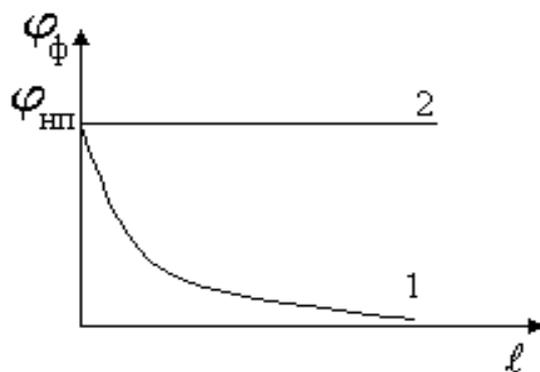


Рисунок 5.2 – Распределение концентрации пара по высоте:

φ_{ϕ} — концентрация пара в заданной точке;

ℓ — расстояние от поверхности жидкости

Часто бывает необходимо оценить степень пожарной опасности фактической концентрации φ'_{ϕ} , образовавшейся в производственном помещении при испарении горючей жидкости в открытое пространство. Для этого достаточно разделить массу испарившейся жидкости $m_{\text{исп}}$ на объем помещения $V_{\text{пом}}$:

$$\varphi'_{\phi} = m_{\text{исп}} / V_{\text{пом}}. \quad (5.3)$$

Для того, чтобы рассчитать площадь разлива, с которой происходит испарение, можно применить соотношение:

$$S_{\text{исп}} = \frac{m_{\text{жидк}}}{\rho_{\text{жидк}} * h_{\text{жидк}}}, \quad (5.4)$$

где $m_{\text{жидк}}$ - масса разлившейся при аварии жидкости;

$\rho_{\text{жидк}}$ - плотность жидкости при заданных условиях;

$h_{\text{жидк}}$ - толщина слоя жидкости, разлившейся при аварии.

В практических расчетах, для определения интенсивности испарения жидкости, пользуются эмпирической формулой:

$$I_{\text{исп}} = P_{\text{нп}} \mu (0,734 + 1,637 v_{\text{в}}) \cdot 10^{-6}, \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с}), \quad (5.5)$$

где $P_{\text{нп}}$ - давление насыщенного пара при данной температуре, кПа;

μ - молярная масса вещества кг/кмоль;

$P_{\text{нп}}$ - давление насыщенного пара при данной температуре, кПа;

$v_{\text{в}}$ - скорость воздуха над поверхностью испарения, м/с.

В открытой системе, для того, чтобы достичь нижнего концентрационного предела распространения пламени для ненасыщенного пара, жидкость необходимо нагреть до температуры немного выше нижнего температурного предела распространения пламени, что позволит увеличить интенсивность испарения и компенсировать потери пара за счет диффузии. Если при этом к поверхности жидкости поднести источник зажигания, то образовавшийся пар вспыхнет.

Вспышка - быстрое сгорание паровоздушной смеси над поверхностью горючего вещества, которое сопровождается кратковременным видимым свечением. При вспышке стойкое горение не наступает, так

как скорость испарения жидкости при данной температуре будет меньше скорости выгорания пара.

Температура вспышки - это наименьшая температура жидкости, при которой в условиях специальных испытаний над ее поверхностью образуется пар, способный вспыхивать в воздухе от источника зажигания, однако стойкое горение при этом не возникает.

Связь температуры вспышки $t_{всп.}$ с зависимостью концентрации пара $\varphi_{пар}$ от температуры жидкости $t_{жидк.}$ схематически отображена на рисунке 5.3.

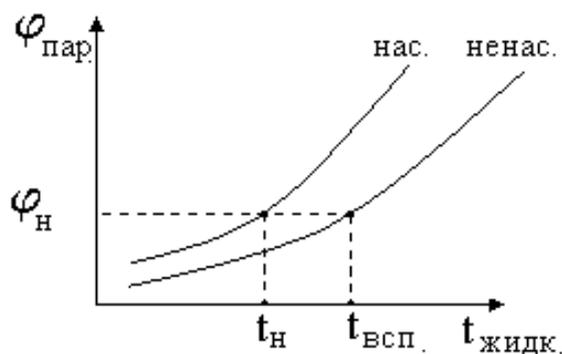


Рисунок 5.3 – Связь температуры вспышки $t_{всп}$ с зависимостью концентрации пара $\varphi_{пар}$ от температуры жидкости $t_{жидк.}$

Жидкость, у которой фактическая температура ниже, чем температура вспышки не представляет пожарной опасности в случае кратковременного воздействия источника зажигания.

Температура вспышки принята за основу классификации жидкостей по степени их пожарной опасности. Различают горючие и легко воспламеняющиеся жидкости. К горючим (ГЖ) относят жидкости с температурой вспышки больше 61°C . Жидкости с температурой вспышки 61°C и ниже относят к классу легко воспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ).

Легковоспламеняющиеся жидкости с температурой вспышки 28°C и ниже относят к **особо опасным жидкостям**.

Кроме температуры вспышки различают еще **температуру зажигания** - наименьшую температуру жидкости, при которой после воспламенения пара от источника зажигания устанавливается стационарное горение.

На практике очень часто приходится иметь дело со смесями жидкостей. При оценке степени пожарной опасности смеси, следует иметь

в виду, что даже маленькие добавки ЛВЖ к ГЖ могут сильно снизить $t_{всп}$ смеси.

5.3 Методические указания по расчету температурных пределов воспламенения

Цель работы: Изучить температурные пределы распространения пламени (нижний - НТПРП или верхний - ВТПРП); методы расчета ТПВ; условия загорания жидкостей в открытом пространстве.

Существует несколько полуэмпирических методов расчета ТПВ, однако они мало отличаются друг от друга по точности. Температурные пределы воспламенения жидкостей рассчитывают по температуре кипения:

$$t_{н(в)} = K t_{кип} - \ell, \quad (5.6)$$

где $t_{н(в)}$ - нижний(верхний) температурный предел воспламенения, $^{\circ}\text{C}$.
 $t_{кип}$ - температура кипения, $^{\circ}\text{C}$.

K, ℓ - константы для определенных групп (гомологических рядов) жидкостей.

Их значения приведены в **приложении 1**.

Температурные пределы воспламенения могут быть определены по известным значениям концентрационных пределов:

$$P_{н(в)} = \frac{\varphi_{н(в)} P_0}{100}, \quad (5.7)$$

где $P_{н(в)}$ - давление насыщенного пара, соответствующее нижнему (верхнему) концентрационному пределу воспламенения;

$\varphi_{н(в)}$ - нижний(верхний) концентрационный предел воспламенения;

P_0 - атмосферное давление достигается данное давление. Она будет являться соответственно нижним (верхним) пределом воспламенения.

По приложению 2 определяем температуру вещества, при которой достигается данное давление. Она будет являться соответственно нижним (верхним) пределом воспламенения.

Примеры решения задач

Пример № 5.1. Определить ТПВ метилового спирта, если температура его кипения равна 65⁰С.

Решение. Расчет проводим по формуле (5.6) значение констант определяем по приложению 1 для нормальных жирных спиртов

$$t_H = 0,5746 * 65 - 33,7 = 3,6^{\circ}\text{C} = 276,6\text{K}$$

$$t_B = 0,6928 * 65 - 15,0 = 30^{\circ}\text{C} = 303\text{K}$$

Определим относительную ошибку расчета. По приложению 3 находим, что ТПВ метилового спирта равны 280 К, 312К:

$$\Delta_H = (276,6 - 280) : 280 * 100 = -1,2\%$$

$$\Delta_B = (303 - 312) : 312 * 100 = -2,9\%$$

Следовательно, результаты расчета занижены менее чем на 3 %.

Пример № 5.2. Определить ТПВ ацетона, если его концентрационные пределы в воздухе равны 2,2%, 13,0 %. Атмосферное давление – нормальное.

Решение: По формуле (5.7) определим давление насыщенного пара ацетона, соответствующее нижнему и верхнему температурным пределам воспламенения:

$$P_H = 2,2 * 1013,25 * 100 = 22,3 \text{ ГПа};$$

$$P_B = 13,0 * 1013,2 * 100 = 131,1 \text{ ГПа}$$

Из приложения 2 следует, что НТПВ находится между температурами 241,9 и 252,2К, а ВТПВ – между 271,0 и 280,7К.

Линейной интерполяцией определим ТПВ:

$$t_H = 241,9 + \frac{(22,3 - 13,33) * (252,2 - 241,9)}{26,66 - 13,33} = 248,8\text{K},$$

$$t_B = 271 + \frac{(131,7 - 79,99) * (280,7 - 271)}{133,32 - 79,99} = 280,4\text{K}.$$

Зная справочные значения ТПВ ацетона (253 К, 279К, см. приложение 3), можно определить относительную ошибку расчета:

$$\Delta_H = (248,8 - 253) / 253 * 100\% = -1,7\%;$$

$$\Delta_B = (280,4 - 279) / 279 * 100\% = 0,5\%.$$

6 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа состоит в расчете параметров горения и взрыва определенного вещества в зависимости от состава окислительной среды и условий горения.

Необходимо рассчитать:

1. Материальный баланс процесса горения.
2. Тепловой баланс процесса горения.
3. Концентрационные пределы воспламенения.
4. Найти абсолютную и относительную погрешность расчетных значений концентрационных пределов воспламенения по сравнению со справочными показателями.
5. Температурные пределы распространения пламени.
6. Найти абсолютную и относительную погрешность расчетных значений температурных пределов распространения пламени по сравнению со справочными показателями.

Выбор варианта осуществляется по номеру обучаемого в списке группы (таблица 6.1).

Таблица 6.1 – Выбор варианта

№	Горючее вещество	Химическая формула	Количество горючего вещества	Состав окислительной среды	Условия горения
1	Метиловый спирт	CH_4O	2 кг	Воздух	$T=300\text{K}$ $P=1 \text{ ГПа}$ $L=3$
2	Анилин	$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	1 кг	Кислород 70% Азот 30%	$T=290\text{K}$ $P=900 \text{ кПа}$ $L=2,5$
3	Смесь газов	$\text{CO} - 45\%$ $\text{N}_2 - 15\%$ $\text{C}_4\text{H}_8 - 10\%$ $\text{O}_2 - 30\%$	1 м^3	Воздух	Нормальные $L=2,5$
4	Нитробензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	30 кг	Воздух	$T=280 \text{ K}$ $P=950 \text{ кПа}$ $L=2,5$
5	Сложное вещество	$\text{C} - 65\%$ $\text{O} - 20\%$ $\text{H} - 5\%$ $\text{S} - 10\%$	1 кг	Воздух	Нормальные $L=1,4$
6	Этилен	C_2H_4	5 м^3	Воздух	Нормальные $L=2,5$

7	Сера	S	2 кг	Воздух	T=300 К P=120 кПа L=1,8
8	Сложное вещество	C – 90% H – 3% N – 5% O – 2%	1 кг	Воздух	T=300 К P=350 кПа L=1,5
9	Смесь газов	CH ₄ –15% C ₃ H ₈ – 70% O ₂ – 10% H ₂ – 5%	5 м ³	Воздух	Нормальные L=1,9
10	Алюминий	Al	15 кг	Кислород 42 % Азот 58%	Нормальные L=2,8
11	Сплав	Mg – 20% Al – 80%	1 кг	Воздух	T=265 К P=920 кПа L =1,5
12	Муравьиная кислота	CH ₂ O ₂	1 кг	Воздух	Нормальные L=1,2
13	Диметиловый эфир	(CH ₃) ₂ O	10 кг	Воздух	T=283 К P=101кПа
14	Глицерин	C ₃ H ₈ O ₃	1 кг	Воздух	T=305 К P= 1 атм. L=1,9
15	Ацетилен	C ₂ H ₂	1 м ³	Хлор 18 % Азот82%	Нормальные L=1,9
16	Смесь газов	CH ₄ .30% O ₂ .8% N ₂ -15% H ₂ .47%	1 м ³	Воздух	Нормальные L=3,2
17	Этиловый эфир уксусной кислоты	C ₄ H ₈ O ₂	1 кг	Воздух	T=270 К P=85000 Па L=1,5
18	Метилэтилкетон	C ₄ H ₈ O	5 кг	Воздух	Нормальные L=2,5
19	Хлорбензол	C ₆ H ₅ Cl	1 кг	Воздух	T=305 К P= 2 атм. L=2,8
20	Нитротолуол	C ₇ H ₇ NO ₂	1 кг	Кислород 25 % Азот75%	T=280 К P=98000 Па L=1,4
21	Глицерин	C ₃ H ₈ O ₃	2 кг	Воздух	Нормальные L=1,5
22	Ацетилен	C ₂ H ₂	2 м ³	Воздух	Нормальные L=1,5
23	Смесь газов	CH ₄ .30% O ₂ .8% N ₂ -15% H ₂ .47%	2 м ³	Воздух	Нормальные L=3,2

24	Амилбензол	$C_{11}H_{16}$	1 кг	Кислород 50 % Азот 50%	$T=280\text{ К}$ $P=98000\text{ Па}$ $L=1,2$
25	1,4 Диэтил-бензол	$C_{10}H_{14}$	1 м ³	Воздух	Нормальные

СТРУКТУРА, ОФОРМЛЕНИЕ И ОЦЕНКА КУРСОВЫХ РАБОТ

Отчет по курсовой работе должен состоять из обязательных элементов: Титульный лист (Приложение 7), Содержание, Введение, Решение задач, Заключение и Список литературы.

Ответы на вопросы должны сопровождаться ссылками на литературные источники, а также, при необходимости, рисунками. Тексты ответов на вопросы и решения задач должны быть согласованы с рисунками путем цифровых обозначений. На каждой странице оставляются поля для замечаний рецензента. Критерии для оценки курсовых работ приведены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Критерии оценки курсовых работ

№	Критерий оценки	Оценка
1	Все задачи решены, замечаний нет	Отлично
2	Небольшие ошибки в расчетах, небольшие замечания к оформлению работы	Хорошо
3	Ошибки в построении стехиометрических уравнений химических реакций, ошибки в расчетах	Удовлетворительно
4	Непонимание основных законов молекулярной физики, систематические ошибки	Неудовлетворительно
5	Непонимание основ химии, неумение составления стехиометрических уравнений химических реакций, систематические ошибки	Неудовлетворительно
6	Незнание основных законов термодинамики, систематические ошибки	Неудовлетворительно

Оформление текста курсовой работы должно соответствовать общим требованиям к текстовым документам, установленным ГОСТ 7.32-2017. Межгосударственный стандарт. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методические указания для выполнения курсовых работ по дисциплине «Теория горения и взрыва» формируют у обучаемых навыки по расчету массовых и объемных показателей расхода окислителя (воздуха) при процессах горения. Также обучаемые получают навыки по расчету тепло-, массопереноса.

При выполнении заданий формируются междисциплинарные компетенции, включая разделы молекулярной физики и термодинамики. Связь с химией связана с пониманием валентности веществ и составлением стехиометрических уравнений химических реакций горения и взрыва.

При выполнении курсовой работы обучаемые получают целостные знания, охватывающие физико-химические процессы горения и взрыва. При расчете материального баланса процесса горения, обучаемые получают знания в области составления стехиометрических уравнений химических реакций в окислительной среде и определения объема (массы) окислителя. Получение навыков при расчете теплового баланса процессов горения поможет обучаемым определять величину выделяемого тепла при горении. Изучение концентрационных пределов воспламенения веществ поможет избежать создание взрывоопасных ситуаций на производстве. В целом, при выполнении курсовой работы обучаемые закрепляют знания, получают навыки, необходимые для расчета физико-химических процессов горения и взрыва.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ КУРСОВЫХ РАБОТ

Список используемой литературы

1. Баратов А.Н. Горение-пожар-взрыв-безопасность. М.: ФГУВНИ-ИПО МЧС России, 2003. 364 с.
2. Бегишев И.Р. Курсовая работа по дисциплине «Теория горения и взрыва» (методические указания по выполнению курсовой работы для слушателей ИЗИ-ДО)/ учебно-методическое пособие. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2010. – 60 с.
3. Горев В. А. Теория горения и взрыва / учеб. пособие. М.: МГСУ, 2010.
4. Дегтярева С. В. Теория горения и взрыва / учеб. пособие. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре гос. технический ун-т, 2006. 128 с.
5. Денисов Е.Т., Саркисов О.М., Лихтенштейн Г.И. Химическая кинетика. М.: Химия, 2000.
6. Комплекс виртуальных лабораторных работ по дисциплине "Теория горения и взрыва" / Кузнецов А.В., Николаева Л.П., Перминов В.А., Сечин А.И. /Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2015616765, 22.06.2015. Заявка № 2015613697 от 05.05.2015.
7. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения / Справочник. Под редакцией Баратова А.Н., ч. I и II. М.: Химия, 2004.
8. Костарев С.Н. Физико-химические процессы в техносфере: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 142 с.
9. Сазонов В.Г. Теория горения и взрыва. Практикум. Москва, 2012.
10. Теория горения и взрыва / Тотай А.В., Казаков О.Г., Радькова Н.О., Попков В.И., Корсаков А.В., Удовенко Е.В. Учебник и практикум / Сер. 60 Бакалавр. Прикладной курс. (2-е изд., пер. и доп). Москва, 2015.
11. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : методические указания по выполнению курсовой работы / М-во образования и науки

Рос. Федерации, Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т ; сост. Н. Ю. Клименти. — Электронные текстовые и графические данные (0,5 Мбайт). — Волгоград : ВолгГАСУ, 2016. — Учебное электронное издание сетевого распространения. — Официальный сайт Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Режим доступа: <http://www.vgasu.ru/publishing/on-line/> — Загл. с титул. экрана.

12. Шапров М.Н., Мартынов И.С., Мисюряев В.Ю. Теория горения и взрыва / учеб. пособие (Издание второе, переработанное). Волгоград, 2022.

Информационно-справочные системы и ресурсы сети «Интернет»

1. Электронный каталог библиотеки Пермского ГАТУ : базы данных, содержащие сведения обо всех видах литературы, поступающей в фонд Научной библиотеки Пермского ГАТУ. — URL: <https://pgsha.ru/generalinfo/library/webirbis/>.

2. Электронная библиотека / Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова. — URL: <https://pgsha.ru/generalinfo/library/elib/>.

3. ConsultantPlus (КонсультантПлюс) : компьютерная справочно-правовая система. — URL: <https://www.consultant.ru/>. — Режим доступа: для авторизованных пользователей. — Доступ из корпусов ПГАТУ.

4. eLIBRARY.RU : научная электронная библиотека. — URL: <https://elibrary.ru/defaultx.asp>. — Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

5. Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/>. — Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

6. Юрайт : электронно-библиотечная система. — URL: <https://urait.ru/>. — Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

7. Сетевая электронная библиотека (СЭБ). — URL: <https://e.lanbook.com/>. — Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

8. Polpred.com (Полпред.ком) : электронно-библиотечная система. — URL: <https://polpred.com/news>.

9. Национальная электронная библиотека (НЭБ): <https://rusneb.ru/> – Доступ из читальных залов НБ ПГАТУ.
10. Электронные информационные ресурсы ФГБНУ ЦНСХБ: <https://cnshb.ru/>. – Режим доступа: для авторизованных пользователей. – Доступ из читальных залов НБ ПГАТУ.
11. Информационные услуги (периодика) ООО «ИВИС»: [:https://eivis.ru](https://eivis.ru). – Режим доступа: для авторизованных пользователей.
12. Интернет ресурсы для получения справочных данных по физико-химическим свойствам веществ и параметрам пожарной опасности: <http://irodov.nm.ru>, <http://www.xumuk.ru>.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 – Величины параметров K и l для вычисления температурных пределов воспламенения некоторых жидкостей

Гомологический ряд	Формула $n=0.1.2.3.4\dots$	Параметры для $\frac{НКПВ}{ВКПВ}$	
		K	l
Нормальные алканы	$CH_3-(CH_2)_n-CH_3$	<u>0.6957</u>	<u>73.8</u>
		<u>0.7874</u>	<u>50.3</u>
2-метилалканы	$(CH_3)_2-CH(CH_2)_N-CH_3$	<u>0.6885</u>	<u>74.9</u>
		<u>0.7900</u>	<u>52.2</u>
Нормальные 1-алкены	$CH_2=CH-(CH_2)_N-CH_3$	<u>0.6887</u>	<u>74.5</u>
		<u>0.7976</u>	<u>49.5</u>
Норм. жирные спирты	$CH_3-(CH_2)_N-OH$	<u>0.5746</u>	<u>33.7</u>
		<u>0.6928</u>	<u>15.0</u>
2-метил-карбинолы	$(CH_3)_2CH-(CH_2)_N-OH$	<u>0.6582</u>	<u>44.1</u>
		<u>0.7278</u>	<u>21.5</u>
Н-Алкил-форматы	$HCOO-(CH_2)_N-CH_3$	<u>0.5359</u>	<u>47.6</u>
		<u>0.6050</u>	<u>25.0</u>
Н-Алкилацетаты	$CH_3COO-(CH_2)_N-CH_3$	<u>0.5940</u>	<u>50.9</u>
		<u>0.7761</u>	<u>40.8</u>

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 – Давление насыщенных паров (ГПа) и нижние температурные пределы (К) вещества (НТПВ) некоторых веществ

Вещество	Давление насыщенных паров, ГПа								
	1,3	13,3	26,7	53,3	80,0	133,3	266,6	533,3	1013,25
	НТПВ, К								
Акриловая кислота	276,5	312,0	325	339,2	348	359,2	376,3	395,0	414
Альдегид уксусной кислоты	191,5	216,2	225,2	235,3	241,6	250,4	263,0	277,9	293,3
Ангидрид уксусной кислоты	274,7	309	321,8	335,1	343,8	355,2	373,0	392,8	412,6
Ацетон	312,6	241,9	252,2	263,6	271	280,7	295,7	312,5	329,5
Бензол	236,3	261,5	270,4	280,6	288,4	299,1	315,6	333,6	353,1
Бромистый этил	198,7	225,5	235,2	246,3	253,5	263	287,5	294	311,4
Бутилбензол	295,7	335	249,4	375,6	389,2	409,9	432,2	456,1	467,1
Бутилформиат	246,6	279,1	291	304,6	312,8	340	340,9	359,2	379,0
Метилэтилкетон	224,2	255,3	266,5	276	287	298	314,6	333	352,6
метилциклогексан	237,1	269,8	281,7	295	303,5	315,1	332,6	352,6	373,9
3-метил-2-бутанол	253	281,3	291,3	302,6	309,2	318,5	332	346,8	361,9
2-метилбутан	190,1	216	225,7	236,5	243,4		267,1	283,5	300,8

ПРИЛОЖЕНИЕ 3 – Показатели пожарной опасности некоторых веществ

Жидкость	Плотность кг/м ³	Температура самовоспламенения (К)	Температурные пределы воспламенения, К		Концентрационные пределы воспламенения, %	
			Нижний предел	Верхний предел	Нижний предел	Верхний предел
Анилин	1022	835	343	363	1,3	4,2
Альдегид уксусный	780	458	235	–	4,0	55,0
Ацетон	790	738	253	279	2,2	13,0
Бензол	879	813	259	283	1,4	7,1
Глицерин	1260	673	431	513	–	–
Уксусная кислота (ледяная)	1049	727	308	349	3,3	22
Сероуглерод	1263	363	223	299	1,0	50,0
Спирты						
Изоамиловый	816	628	310	335	1,07	5
Бензиловый	1050	673	360	418	1,0	15,5
Н-бутиловый	814	683	304	333	1,52	7,9
Изобутиловый	820	828	299	323	1,89	7,3
Метиловый	795	737	280	312	6,0	34,7
Н-пропиловый	803	643	293	326	2,02	13,55
Изопропиловый	785	693	281	310	2,25	11,65
Этиловый	789	677	284	314	3,6	19,0
Стирол	902	803	299	332	1,08	5,2
Толуол	866	809	273	303	1,3	6,7
Этиленгликоль	1114	653	385	397	3,8	6,35
Эфир диэтиловый	713	473	228	386	1,7	49
Эфир уксусно-изоамиловый	870	703	276	330	0,2	4,35
Эфир уксусно-этиловый	881	673	-----	-----	-----	-----

ПРИЛОЖЕНИЕ 4 – Теплота образования и сгорания некоторых веществ

Вещество	Теплота образования, кДж/моль	Теплота сгорания, кДж/моль
Муравьиный (ж)	121,1	561,5
Уксусный (ж)	166,3	1173,2
Аммиак (газ)	46,1	384,2
Анилин (ж)	29,7	3484,0
Антрацен (тв)	-101,4	7102,0
Ацетилен (газ)	-224,6	1307,3
Ацетон (ж)	248,1	1789,1
Бензол (ж)	-34,8	3282,4
Бутадиен-1,3 (ж)	-104,3	2547,9
Н-Бутан (газ)	132,4	2882,3
Н-Бутан (ж)	153,8	2863,0
Бутен-1 (газ)	6,3	2723,9
Винилхлорид (газ)	-37,7	1259,9
Винилхлорид (ж)	-17,2	123,4
Вода (ж)	286,6	-
Вода (газ)	242,2	-
Н-Гексан (ж)	211,2	4150,6
Н-Гептан (ж)	239,7	4814,3
Глицерин (ж)	675,4	1658,8
Двуокись серы	297,5	-
Двуокись Углерода	396,6	-
Диоксон (ж)	375,4	2354,8
Дифенил (тв)	-80,4	6258,2
Изобутан (ж)	159,2	2857,6

ПРИЛОЖЕНИЕ 5 – Показатели пожарной опасности некоторых газов

Газы	Плотность по воздуху	Температура самовоспламенения, К	Пределы воспламенения, %	
			нижний	верхний
Аммиак	0,59	903	15,0	28
Ацетилен	0,9	608	2,0	81,0
Бутан	2,0	678	1,9	9,1
Бутилен	1,93	657	1,6	9,4
Водород	0,069	783	4,0	75,0
Метан	0,55	810	5,0	15,0
Окись углерода	0,967	883	12,5	74,0
Окись этилена	1,5	702	3,0	80,0
Окись пропилена	2,0	673	2,0	22,0
Пропан	1,56	739	2,1	95,0
Пропилен	1,45	683	2,2	10,3
Сероводород	1,19	519	4,3	46,0
Этан	1,04	745	2,9	15,0
Этилен	0,97	813	3,0	32,0

ПРИЛОЖЕНИЕ 6 – Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении

Темпе-ра-тура, °С	Теплосодержание, кДж/м ³ *10 ⁻²					
	O ₂	N ₂	Воздух	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
0	0	0	0	0	0	0
100	1,3	1,3	1,3	1,7	1,5	1,8
200	2,7	2,6	2,6	3,6	3,0	3,8
300	4,1	3,9	3,9	5,6	4,7	5,9
400	5,5	5,3	5,3	7,7	5,9	8,2
500	6,7	6,7	6,7	9,3	6,3	10,3
600	8,5	8,1	8,1	12,3	9,7	12,7
700	10,0	9,5	9,6	14,6	11,5	15,1
800	11,6	11,0	11,1	17,1	13,4	17,5
900	13,2	12,5	12,6	19,5	15,3	19,9
1000	14,8	14,0	14,1	22,1	17,2	22,4
1100	16,4	15,5	15,6	24,6	19,3	24,9
1200	18,0	17,1	17,2	27,2	21,3	27,4
1300	19,7	18,6	18,8	29,8	23,5	29,8
1400	21,3	20,1	20,4	32,4	25,6	32,4
1500	23,0	21,8	21,9	35,1	27,8	34,9
1600	24,6	23,4	23,6	37,7	30,0	37,5
1700	26,3	25,0	25,2	40,4	32,3	40,0
1800	28,0	26,6	26,8	43,1	34,6	42,6
1900	29,7	28,2	28,4	45,8	36,9	45,3
2000	31,4	29,8	30,0	48,5	39,3	47,9
2100	33,1	31,4	31,7	51,2	41,7	50,6
2200	35,0	33,0	33,3	53,9	44,1	53,4
2300	36,6	34,7	35,0	56,6	46,7	56,1
2400	38,3	36,3	36,6	59,3	48,9	58,9
2500	40,0	38,0	38,3	62,1	51,4	61,7
2600	41,8	39,5	40,0	64,9	53,9	64,6
2700	43,7	41,4	41,6	67,6	56,4	67,5
2800	45,5	43,0	43,2	70,3	59,0	70,5
2900	47,3	44,7	44,8	73,1	61,6	73,5
3000	49,4	46,3	46,5	75,9	64,3	76,6

ПРИЛОЖЕНИЕ 7 – Образец титульного листа курсовой работы

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Пермский государственный аграрно-технологический университет
имени академика Д.Н. Прянишникова»
(ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ)

Институт землеустройства, кадастра, инженерных и строительных технологий
Кафедра техносферной безопасности, физики и математики

КУРСОВАЯ РАБОТА
по дисциплине «Теория горения и взрыва»
Вариант № _____

Выполнил: студент __ курса
Направления подготовки
«Техносферная безопасность»
Группа : ТБб_ - _____

Проверил: д.т.н., профессор

Пермь, 202__