

С. Н. БАРШУТИН

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ГОРЕНИЯ

В ТРЕХ ЧАСТЯХ

ЧАСТЬ 2



Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2024

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический университет»**

С. Н. БАРШУТИН

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ГОРЕНИЯ

В ТРЕХ ЧАСТЯХ

ЧАСТЬ 2

Утверждено Ученым советом университета
в качестве учебного пособия для студентов направления подготовки
«Теплоэнергетика и теплотехника» очной и заочной форм обучения,
изучающих дисциплину «Основы теории горения»

Учебное электронное издание



Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2024

УДК 614.841.11(075.8)
ББК Г543я73
Б26

Рецензенты:

Кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник
ООО «Чистая энергия»
С. Н. Кузьмин

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика»
ФГБОУ ВО «ТГТУ»
О. С. Дмитриев

Баршутин, С. Н.

Б26 Основы теории горения [Электронный ресурс] : учебное пособие :
в 3 ч. / С. Н. Баршутин. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО
«ТГТУ».

ISBN 978-5-8265-2735-1

Ч. 2. – 2024. – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ;
CD-ROM-дисковод ; 1,8 Mb ; RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. – Загл. с
экрана.

ISBN 978-5-8265-2759-7

Рассмотрены вопросы по определению горючести углеводородных молекул, склонности к самовозгоранию и температуры самовозгорания, температуры воспламенения и распространения пламени, температурных пределов воспламенения, концентрационных пределов воспламенения, влиянию температуры на скорость горения, температуры пламени, энергии изучения пламени, параметров горения углеводородного топлива сложного состава.

Предназначено для студентов направления подготовки «Теплоэнергетика и теплотехника» очной и заочной форм обучения, изучающих дисциплину «Основы теории горения», а также будет полезно аспирантам, магистрантам и студентам бакалавриата, занимающимся научно-исследовательской работой.

УДК 614.841.11(075.8)
ББК Г543я73

*Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.
Нелегальное копирование и использование данного продукта запрещено.*

ISBN 978-5-8265-2735-1 (общ.)
ISBN 978-5-8265-2759-7 (ч. 2)

© Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический
университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2024

ВВЕДЕНИЕ

Традиционные виды ископаемого топлива еще не одно десятилетие будут являться основным источником для получения тепловой и электрической энергии. Поэтому изучение процессов, происходящих при сжигании традиционных видов топлив, для бакалавров и специалистов направлений теплоэнергетики и теплотехники, является актуальной задачей.

Для профессиональной деятельности инженера-теплоэнергетика требуются навыки расчета основных физико-химических параметров процессов горения. Владение основными закономерностями процессов горения поможет специалистам в области теплоэнергетики и теплотехники осуществлять проектирование устройств с максимальной эффективностью преобразования энергии топлива.

В учебном пособии представлен материал, который используется при чтении курса дисциплины «Основы теории горения»

Данное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

В пособии представлены практические работы по физико-химическим и гидродинамическим процессам горения, их математическому описанию, которые помогут студентам при решении прикладных задач.

В конце учебного пособия приводится список литературы, включающий монографии и учебные пособия, написанные видными специалистами в области теории горения.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРЮЧЕСТИ МОЛЕКУЛ

Существуют теоретический и экспериментальный методы определения горючести материалов. При этом экспериментальный метод предназначен для определения только жидких и твердых веществ.

В первую очередь рассмотрим определение теоретической возможности горючести молекул. Этот метод основывается на анализе коэффициента горючести вещества, который определяется по следующей формуле [1]:

$$K_{\Gamma} = 4n_{\text{C}} + 4n_{\text{S}} + n_{\text{H}} + n_{\text{N}} - 2n_{\text{O}} - 2n_{\text{Cl}} - 3n_{\text{F}} - 5n_{\text{Br}}, \quad (1.1)$$

где n_{C} – количество атомов углерода в молекуле исследуемого вещества; n_{S} – количество атомов серы в молекуле исследуемого вещества; n_{H} – количество атомов водорода в молекуле исследуемого вещества; n_{N} – количество атомов азота в молекуле исследуемого вещества; n_{O} – количество атомов кислорода в молекуле исследуемого вещества; n_{Cl} – количество атомов хлора в молекуле исследуемого вещества; n_{F} – количество атомов фтора в молекуле исследуемого вещества; n_{Br} – количество атомов брома в молекуле исследуемого вещества.

Сравнение коэффициента осуществляется с единицей. При $K_{\Gamma} > 1$ вещество считается горючим, во всех других значениях K_{Γ} вещество не будет взаимодействовать с окислительной средой, а соответственно процесс горения будет отсутствовать при любых значениях температуры этого вещества.

Рассмотрим пример расчета K_{Γ} и определение горючести вещества.

В качестве исследуемого вещества возьмем молекулу нитрометана CH_3NO_2 . Для этого вещества количество атомов углерода в молекуле соответствует единице $n_{\text{C}} = 1$, водород имеет три атома $n_{\text{H}} = 3$, у азота $n_{\text{N}} = 1$, кислорода два атома $n_{\text{O}} = 2$, у остальных элементов $n_i = 0$.

Тогда коэффициент горючести для нитрометана будет равен

$$K_{\Gamma} = 4 \cdot 1 + 3 + 1 - 2 \cdot 2 = 4.$$

Коэффициент горючести нитрометана выше единицы $K_{\Gamma}(\text{CH}_3\text{NO}_2) > 1$, соответственно, это вещество имеет способность гореть.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1

Цель работы: научиться определять горючесть молекул по коэффициенту горючести.

Индивидуальные задания

Определить коэффициент горючести и причислить к группе горючих или негорючих веществ. Определить название вещества, его физические свойства: температуру плавления, температуру кипения, при возможности температуру вспышки (в случае, если вещество относится к горючим материалам), агрегатное состояние при нормальных условиях. Вариант соответствует номеру в списке.

Экспериментальное определение горючести веществ осуществляется в установке (рис. 1.1), которая содержит устройство нагрева 1 (электрическая печь), тигель с исследуемым веществом 2, термопару 3.

1.1. Варианты заданий по практической работе № 1

№ варианта	Вещество № 1	Вещество № 2	Вещество № 3	Вещество № 4	Вещество № 5
1	HCOOH	C ₁₈ H ₂₆ N ₂ O ₄ S	C ₇ H ₁₂ N ₂ O ₄	C ₁₀ H ₁₂	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁
2	C ₁₀ H ₁₃ N ₅ O ₄	CH ₃ COOH	C ₂₇ H ₃₃ N ₃ O ₆ S	C ₁₃ H ₉ Cl ₃ N ₂ O	C ₉ H ₁₆
3	C ₂ H ₅ NO ₂	C ₁₀ H ₁₃ N ₅ O ₅	C ₂ H ₅ COOH	C ₁₃ H ₁₆ N ₁₀ O ₅ S	C ₂₇ H ₄₅ N ₅ O ₅
4	C ₃₆ H ₆₁ N ₅ O ₇ S	C ₃ H ₇ NO ₂	C ₁₀ H ₁₄ N ₂ O ₆	C ₃ H ₇ COOH	C ₁₆ H ₁₈ N ₄ O ₇ S
5	C ₁₄ H ₁₅ N ₅ O ₆ S	C ₂₃ H ₂₄ N ₄ O ₆	C ₆ H ₁₃ NO ₂	C ₉ H ₁₂ N ₂ O ₆	C ₄ H ₉ COOH
6	C ₅ H ₁₁ COOH	C ₁₄ H ₁₈ N ₆ O ₇ S	C ₃₃ H ₃₆ N ₄ O ₃	C ₉ H ₁₁ NO ₃	C ₉ H ₁₃ N ₃ O ₅
7	C ₆ H ₁₂ O ₅	C ₆ H ₁₃ COOH	C ₂₀ H ₂₇ N ₅ O ₅ S	C ₆ H ₁₂ N ₂ O	C ₃ H ₇ NO ₃
8	C ₅ H ₉ NO ₄	C ₆ H ₁₂ O ₆	C ₁₅ H ₃₁ COOH	C ₁₁ H ₁₄ ClN ₃ O ₃ S	C ₁₂ H ₁₂ N ₂ O ₂ S
9	N ₂ O	C ₄ H ₇ NO ₄	C ₅ H ₁₀ O ₅	C ₁₆ H ₃₃ COOH	C ₂₄ H ₃₄ N ₄ O ₅ S
10	CH ₄ N ₂ O	C ₂₇ H ₃₈ N ₆ O ₂	C ₂ H ₅ NO ₂	C ₁₂ H ₂ O ₁₁	C ₁₇ H ₃₅ COOH
11	C ₄ H ₄ N ₂ O ₃	C ₁₃ H ₁₂ N ₂ O	C ₂₁ H ₃₂ N ₆ O ₃	C ₉ H ₁₁ NO ₂	C ₁₅ H ₁₆ O ₉
12	C ₁₀ H ₁₃ N ₅ O ₃	C ₁₁ H ₁₆ N ₈ O ₈	C ₁₅ H ₁₇ N ₅ O ₆ S	C ₁₈ H ₂₁ N ₅ O ₂	C ₆ H ₁₄ N ₂ O ₂
13	C ₆ H ₁₄ N ₄ O ₂	C ₁₀ H ₁₃ N ₅ O ₃	C ₁₅ H ₁₈ N ₆ O ₆ S	C ₄ H ₈ N ₄ O ₄	C ₁₈ H ₂₁ N ₅ O ₂
14	CO	C ₆ H ₉ N ₃ O ₂	C ₁₀ H ₁₄ N ₂ O ₅	C ₁₇ H ₈ Cl ₂ F ₈ N ₂ O ₃	C ₂ H ₄ N ₂ O ₃
15	C ₂ H ₅ N ₃ O ₂	C ₃₁ H ₃₂ N ₄ O ₂	C ₃ H ₇ NO ₂ S	C ₉ H ₁₃ N ₃ O ₄	C ₉ H ₈ N ₄ OS
16	C ₇ H ₆ N ₂ O ₃ S	C ₃ H ₆ N ₂ O ₃	C ₂₀ H ₂₉ FN ₆ O ₃	C ₅ H ₁₁ NO ₂	C ₆ H ₁₃ NO ₅
17	C ₂₁ H ₂₀ O ₁₂	C ₁₁ H ₁₇ N ₃ O ₃ S	C ₃ H ₄ N ₂ O ₄	C ₂₂ H ₂₄ ClN ₅ O ₂	C ₅ H ₉ NO ₂
18	C ₅ H ₉ NO ₃	C ₂₂ H ₂₀ O ₁₃	C ₁₅ H ₂₀ N ₂ O ₄ S	C ₆ H ₁₃ N ₃ O ₃	C ₂₁ H ₂₂ N ₆ O
19	C ₄ H ₆	C ₁₁ H ₁₂ N ₂ O ₂	C ₂₀ H ₁₈ O ₁₁	C ₁₀ H ₁₃ ClN ₂ O ₃ S	C ₁₃ H ₁₄ N ₄ O
20	C ₁₃ H ₁₂ N ₄ O	C ₅ H ₈	C ₆ H ₁₃ NO ₂	C ₃₂ H ₃₀ O ₁₅	C ₁₂ H ₁₈ N ₂ O ₃ S
21	C ₁₄ H ₂₁ N ₃ O ₃ S	C ₃ HCl ₂ N ₃ O ₃	C ₃ H ₄	C ₅ H ₁₁ NO ₂ S	C ₃₂ H ₄₈ O ₈
22	C ₁₅ H ₂₁ NO ₉ S ₂	C ₂₁ H ₂₇ N ₅ O ₄ S	C ₃ H ₃ N ₃ O ₃	C ₈ H ₁₂	C ₄ H ₉ NO ₃
23	C ₄ H ₉ NO ₃	C ₁₆ H ₂₀ N ₂ O ₉ S ₂	C ₁₅ H ₂₁ N ₃ O ₃ S	C ₃ Cl ₃ N ₃ O ₃	C ₇ H ₈
24	CO ₂	C ₄ H ₈ N ₂ O ₃	C ₁₆ H ₂₀ N ₂ O ₁₀ S ₂	C ₂₃ H ₂₈ ClN ₃ O ₅ S	C ₈ H ₁₄ N ₄ O ₇

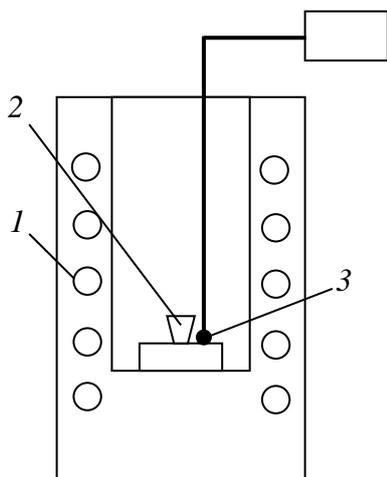


Рис. 1.1. Экспериментальная установка для определения горючести веществ

Методика экспериментального определения горючести вещества заключается в помещении исследуемого материала в тигель 2, который устанавливается в печь 1 с температурой 900 °С. В течение 3 мин за образцом осуществляют наблюдение. Если за это время образец не воспламенился или закипел без воспламенения, то вещество считается негорючим. В обратном случае процедура продолжается для определения степени горючести.

Тигель с горящим образцом вынимают из печи и выдерживают в течение 5 с. Если образец за это время перестает гореть, то вещество причисляют к трудногорючим материалам, иначе

проводят дальнейшие исследования, при которых определяются температура воспламенения и группа горючести.

Для причисления исследуемого вещества к группе горючих материалов должно выполняться одно из следующих условий:

1. В процессе поджога в течение не более 2 мин материал осуществляет самостоятельное горение в течение не более 60 с с потерей массы более 20%.

2. В процессе поджога в течение не более 2 мин горение материала происходит по всей поверхности в течение не более 60 с с потерей массы более 90%.

3. В процессе поджога в течение не более 2 мин горение композиционного материала с негорючей компонентой происходит по всей поверхности в течение не более 60 с с полным выгоранием органической части материала.

4. В процессе поджога в течение не более 2 мин горение композиционного материала с негорючей компонентой происходит в течение более 60 с с потерей массы органической части материала менее 20%.

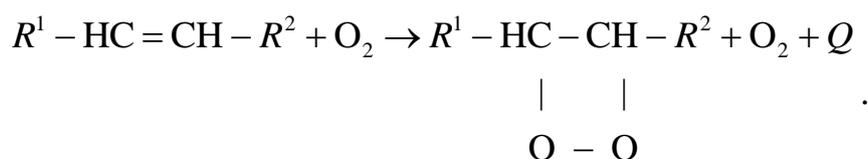
Контрольные вопросы

1. Классификация по горючести веществ.
2. Методы определения горючести.
3. Схема экспериментального определения горючести материала.
4. Метод «Огневой трубы».
5. Метод керамической трубы.
6. Метод определения материалов на негорючесть.
7. Условия отнесения вещества к группе горючих материалов.

2. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКЛОННОСТИ К САМОВОЗГОРАНИЮ МАСЕЛ

Классификация масел предусматривает разделение масел на три типа: животные, растительные и минеральные. Растительные и животные масла (жиры) являются смесями глицеридов с общей формулой $C_3H_5(OCOR)$, где $OCOR$ – остаток кислоты. Такие глицериды имеют в молекуле одну, две или три двойные связи. Например формула глицерида олеиновой кислоты будет иметь вид $C_3H_5(OCOC_{17}H_{33})_3$. Минеральные масла также состоят из глицеридов, но в структуре молекулы отсутствуют двойные связи.

Масла, у которых в структуре молекулы присутствует двойная связь, более всего подвержены к самовозгоранию. Схема окисления имеет вид



В результате образуется пероксид, который разлагается с выделением атомарного кислорода. Выделившийся кислород окисляет следующую молекулу, формируя при этом цепную реакцию.

В свою очередь пероксиды способствуют полимеризации молекул, в результате которой также происходит выделение тепла. Таким образом, чем больше двойных связей в молекуле глицерида, тем выше склонность его к самовозгоранию.

Степень склонности масел к самовозгоранию можно оценить по йодному числу m_J . Это число показывает, сколько грамм йода может присоединить к себе 100 г масла. Чем больше у масла m_J , тем выше вероятность самовозгорания волокнистых материалов, пропитанных этим маслом.

Значения m_J ряда масел (жиров) приведены в табл. 2.1 [1].

Теоретический расчет йодного числа осуществляется следующим образом.

1. Записывается формула, и составляется химическая реакция с йодом.
2. Определяется масса йода при известной и равной 100 г массе масла.

3. Устанавливается склонность к самовозгоранию:

$m_J < 50$ – не склонно к самовозгоранию;

$m_J < 100$ – мало склонно к самовозгоранию;

$m_J > 100$ – склонно к самовозгоранию.

2.1. Значения m_J для масел органического происхождения

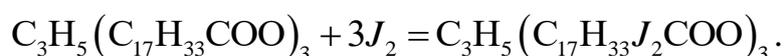
Наименование масла	m_J
Бараний жир	31...46
Свиной жир	42...66
Тюлений жир	122...162
Моржовый жир	168
Олеиновая кислота	80...115
Касторовое масло	82...86
Хлопковое масло	100...120
Подсолнечное масло	127...136
Конопляное масло	145...167
Льняное масло	175...192
Соевое масло	114...139

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2

Цель работы: изучить метод определения возможности самовозгорания различного типа масел.

Пример. Определим склонность к самовозгоранию глицерида олеиновой кислоты.

Составим формулу и химическую реакцию с йодом:



Определяем молекулярную массу

$$M = 884 \frac{\text{Г}}{\text{МОЛЬ}}.$$

Определяем m_J :

$$m_J = \frac{100 \text{ Г} \cdot 254 \frac{\text{Г}}{\text{МОЛЬ}} \cdot 3}{884 \frac{\text{Г}}{\text{МОЛЬ}}} = 86,2 \text{ Г}.$$

Так как для глицерида олеиновой кислоты $m_J = 86,2$ г, то это вещество мало склонно к самовозгоранию.

Индивидуальные задания

Рассчитайте йодное число в соответствии со своим вариантом.

2.2. Варианты заданий для практической работы № 2

№ варианта	Наименование жирной кислоты	№ варианта	Наименование жирной кислоты
1	Лауроолеиновая	13	Сорбиновая
2	Миристоолеиновая	14	Линолевая (LA)
3	Пальмитолеиновая	15	Руменовая (RA)
4	Петроселиновая	16	α -Линоленовая (ALA)
5	Олеиновая	17	Румеленовая (RLA)
6	Элаидиновая	18	γ -Линоленовая (GLA)
7	Цис-вакценовая	19	Дигомо- γ -линоленовая
8	Вакценовая (VA)	20	5, 8, 11-эйкозатриеновая
9	Гадолеиновая	21	Арахидоновая (ETA)
10	Гондоиновая	22	Тимнодоновая (EPA)
11	Эруковая	23	4, 7, 10, 13, 16-докозапентаеновая
12	Нервоновая	24	Цервоновая (DHA)

Контрольные вопросы

1. Механизм окисления ненасыщенных жирных кислот.
2. Зависимость самовозгорания от количества двойных связей в структуре молекулы жирных кислот.
3. Метод определения степени склонности к самовозгоранию.
4. Методика определения йодного числа.
5. Определение понятия температуры воспламенения горючих веществ.
6. Типы масел.
7. Перечислите масла, наиболее подверженные к самовозгоранию.
8. Степень склонности к самовозгоранию. Расчеты и практическое применение.
9. Молярная масса. Методы определения.

3. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ САМОВОЗГОРАНИЯ ВЕЩЕСТВ

Самовозгорание является явлением, которое приводит к возникновению процесса горения материала в условиях отсутствия фактора инициирования зажигания. Самовозгорание подразделяется на химическое, микробиологическое, тепловое.

Химическое самовозгорание возникает в условиях воздействия окислительной среды на вещество или внутреннее химическое взаимодействие компонентов рассматриваемой смеси веществ, происходящих с выделением тепла.

Микробиологическое самовозгорание возникает в результате действия биологического характера органических веществ растительного происхождения при определенной влажности и температуре. Например, хранение зерна в условиях повышенной влажности и температуры приводит к самовозгоранию.

Тепловое самовозгорание происходит в результате длительного воздействия различных источников тепла с малой интенсивностью.

Для безопасного хранения твердого топлива необходимо соблюдение ряда условий, которые определяются массогабаритными параметрами вещества, а также структурной формулой его молекулы.

Хранение вещества может осуществляться в форме конуса с параметрами: высота h , радиус r , длина боковой поверхности l , а также в форме прямоугольника с параметрами: высота h , длина a , ширина b .

Кроме рассмотренных параметров хранения, необходимо по справочникам определить константы условий хранения, и по эмпирическим формулам [2] на начальном этапе определить температуру самовозгорания t_c :

$$t_c = 10^{(A_p + n_p \cdot \lg(S))}, \quad (3.1)$$

где S – удельная поверхность исследуемого вещества; A_p , n_p – константы, определяемые по табл. 3.1.

Удельная площадь определяется по формуле

$$S = \frac{F}{V}, \quad (3.2)$$

где F – площадь поверхности конуса или объекта прямоугольной формы. При этом в этой площади не учитывается площадь поверхности основания. Тогда для конуса

$$F = F_k = \pi r l. \quad (3.3)$$

3.1. Константы A_p, n_p, A_b, n_b для определения температуры самовозгорания веществ

Вещество	Размер частиц, мм	A_p	n_p	A_b	n_b
Битум нефтяной окисленный	–	1,7241	0,259	2,2912	0,122
Бутиловый ксантогенат калия	–	1,853	0,133	2,196	0,132
Войлок строительный	–	1,729	0,279	2,350	0,140
Гипсотермин (в виде крошки)	–	1,792	0,272	2,362	0,107
Гранитоль	–	1,307	0,390	2,160	0,150
Гудрон нефтяной	–	1,7436	0,259	2,3106	0,122
Дерматин	–	1,661	0,230	2,160	0,090
Зеленый пигмент	–	1,900	0,150	–	–
Ионообменная смола СГ № 30	0,8...1,8	2,146	0,106	2,350	0,048
Картон кровельный	–	1,974	0,159	2,334	0,142
Кубозоль «Серый С»	–	2,009	0,100	2,340	0,225
Ледерин	–	1,174	0,470	2,210	0,180
Лепидоцид	<1,0	1,551	0,331	2,243	0,115
Лигнин исходный	<0,1	1,749	0,232	2,302	0,329
Лигнин карбонизованный	<0,1	1,363	0,370	2,134	0,210
Мука ржаная	–	1,815	0,235	2,360	0,130
Нитрозин спирторастворимый	–	1,708	0,222	2,254	0,260
Опилки сосновые	–	1,855	0,219	2,296	0,096
Плита древесноволокнистая изоляционная	–	1,864	0,207	2,381	0,075
Плита торфяная	–	1,760	0,248	2,271	0,117
Полибак	<1,0	1,956	0,113	2,230	0,100
Сено	–	2,103	0,109	2,311	0,058
Силос	–	1,884	0,182	2,300	0,113
Солома пшеничная	–	2,169	0,035	2,438	0,067
Торф фрезерный	–	1,781	0,264	2,396	0,180
Уголь бурый Б-2 Березниковского месторождения	<0,1	1,733	0,209	2,178	0,114
Уголь марки АУП	0,1...1,0	1,943	0,207	2,238	0,134
Уголь марки БАУ-А	1,0...3,5	1,872	0,254	2,316	0,039
Уголь марки БАУ-МФ	0,5...1,5	1,790	0,296	2,342	0,057
Уголь марки ДАК	1,0...3,5	1,855	0,180	1,915	0,686

Вещество	Размер частиц, мм	A_p	n_p	A_b	n_b
Уголь марки ОУ (полуфабрикат)	<1,6	1,930	0,207	2,287	0,099
Уголь марки ОУ-А	<0,1	1,646	0,233	2,106	0,438
Уголь марки ОУ-Б	<0,1	1,871	0,211	2,261	0,086
Уголь-сырец марки А	< 0,1	1,423	0,348	2,077	0,369
Уголь-сырец марки Б	1...5	1,453	0,310	2,076	0,160
Уголь-сырец после сортировки	<0,1	1,646	0,233	2,106	0,438
Хлопок	–	1,986	0,157	2,334	0,061
Целлолигнин карбонизированный	<0,09	1,902	0,170	2,192	0,102
Цианол голубой 4 «З»	–	1,793	0,167	2,181	0,178
Шевелин	–	1,889	0,237	2,358	0,192

Для объекта прямоугольной формы

$$F = F_p = 2ah + 2bh + ab. \quad (3.4)$$

Объем конуса определяется по формуле

$$V = \frac{1}{3} \pi hr^2. \quad (3.5)$$

Далее определяется индукционный период самовозгорания, ч:

$$\tau_i = 10^{\frac{A_b - \lg(t_c)}{n_b}}. \quad (3.6)$$

Остальные параметры: температура тления, температура самонагрева, предельная температура хранения – определяются по следующим формулам:

$$t_{\text{тл}} = 10^{(A_p + 2,18n_p)}; \quad (3.7)$$

$$t_{\text{сн}} = 10^{A_p}; \quad (3.8)$$

$$t_{\text{без}} = 0,9t_{\text{сн}}. \quad (3.9)$$

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3

Цель работы: провести расчеты температуры самовозгорания горючих веществ, температуры тления, температуры самонагрева, определить индукционный период самовозгорания и температуру хранения твердого горючего вещества.

Пример выполнения задания.

Для примера примем в качестве вещества уголь марки АУП, который хранится в виде конуса высотой 3 м и радиусом основания 2 м.

1. Для угля марки АУП по табл. 3.1 определяем значения коэффициентов A_p , n_p , A_b , n_b , $A_p = 1,943$, $n_p = 0,207$, $A_b = 2,238$, $n_b = 0,134$.

2. Определяем удельную поверхность угля:

$$S = \frac{3,14 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3}{3,14 \cdot 4 \cdot \sqrt{4+9}} = 1,248 \text{ м.}$$

3. Определяем температуру самовозгорания:

$$t_c = 10^{(1,943+0,207 \cdot \lg(1,248))} = 91,815 \text{ }^\circ\text{C.}$$

4. Вычисляем индукционный период самовозгорания в часах:

$$\tau_i = 10^{\frac{2,238 - \lg(91,815)}{0,134}} = 112,949 \text{ ч.}$$

5. Находим температуру тления:

$$t_{\text{тл}} = 10^{(1,943+2,18+0,209)} = 250,39 \text{ }^\circ\text{C.}$$

6. Рассчитываем температуру самонагрева вещества:

$$t_{\text{сн}} = 10^{1,943} = 87,7 \text{ }^\circ\text{C.}$$

7. Определяем предельную температуру безопасного хранения угля марки АУП:

$$t_{\text{б.х}} = 0,9 \cdot 87,7 = 78,9 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Таким образом, представлен порядок и пример расчета основных параметров безопасного хранения горючих материалов.

3.2. Варианты заданий для практической работы № 3

№ варианта	Наименование вещества	Форма хранения	Высота h , м	Длина, a , м	Ширина, b , м	Радиус r , м
1	Уголь бурый Б-2 Березниковского месторождения	Конусная	1,5	–	–	1,5
2	Уголь марки АУП	Прямоугольная	2,0	3,5	2,5	–
3	Уголь марки БАУ-А	Конусная	2,5	–	–	2,5
4	Уголь марки БАУ-МФ	Прямоугольная	3,0	3,5	3,5	–
5	Уголь марки ДАК	Конусная	3,5	–	–	3,5
6	Уголь марки ОУ (полуфабрикат)	Прямоугольная	4,0	3,5	3,0	–
7	Уголь марки ОУ-А	Конусная	1,5	–	–	1,5
8	Уголь марки ОУ-Б	Прямоугольная	2,0	3,0	2,0	–
9	Уголь-сырец марки А	Конусная	2,5	–	–	2,5
10	Уголь-сырец марки Б	Прямоугольная	3,0	4,0	3,0	–

№ варианта	Наименование вещества	Форма хранения	Высота h , м	Длина, a , м	Ширина, b , м	Радиус r , м
11	Уголь-сырец после сортировки	Конусная	3,5	–	–	3,5
12	Битум нефтяной окисленный	Прямоугольная	4,0	4,0	2,5	–
13	Войлок строительный	Конусная	1,5	–	–	2,0
14	Гудрон нефтяной	Прямоугольная	2,0	3,5	2,5	–
15	Мука ржаная	Конусная	2,5	–	–	3,0
16	Нитрозинспирто-растворимый	Прямоугольная	3,0	3,5	3,5	–
17	Опилки сосновые	Конусная	3,5	–	–	4,0
18	Плита древесноволокнистая изоляционная	Прямоугольная	4,0	3,5	3,0	–
19	Плита торфяная	Конусная	1,5	–	–	2,0
20	Полиняк	Прямоугольная	2,0	3,0	2,0	–
21	Сено	Конусная	2,5	–	–	3,0
22	Силос	Прямоугольная	3,0	4,0	3,0	–
23	Солома пшеничная	Конусная	3,5	–	–	4,0
24	Торф фрезерный	Прямоугольная	4,0	4,0	2,5	–

Контрольные вопросы

1. Виды самовозгорающихся веществ по вызывающему его фактору.
2. Определение самовозгорания.
3. Показатели, характеризующие самовозгорание веществ.
4. Химическое самовозгорание.
5. Тепловое самовозгорание.
6. Микробиологическое самовозгорание.
7. Приведите примеры химического самовозгорания.
8. Приведите примеры теплового самовозгорания.
9. Приведите примеры микробиологического самовозгорания.

4. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В ГОРЮЧЕЙ СРЕДЕ

Углеводородное топливо и другие углеводородные технические жидкости имеют температуру воспламенения $t_{\text{в}}$, которая зависит от структурной формулы молекулы углеводорода. Для расчета этой температуры применяется следующая формула:

$$t_{\text{в}} = a_0 + a_1 t_{\text{кип}} + \sum_{j=2}^n a_j l_j, \quad (4.1)$$

где a_0 – коэффициент ($-73,14$ °C); a_1 – коэффициент ($0,659$ °C); $t_{\text{к}}$ – температура перехода в газообразное состояние; a_j – эмпирический коэффициент, определяемый по табл. 4.1; l_j – количество связей в молекуле.

4.1. Значения эмпирического коэффициента в зависимости от типа связей в углеводородных жидкостях

Вид связи	a_j , °C
C–C	–2,03
C–C аром.	–0,28
C=C	1,72
C–H	1,105
C–O	2,47
C=O	11,66
C–F	3,33
C–Cl	15,11
C–Br	19,40
O–H	23,90

Существуют углеводороды из группы алканов, ароматических углеводородов и др., у которых температуру возгорания можно вычислить по формуле

$$t_{\text{в}} = a + bt_{\text{кип}}, \quad (4.2)$$

где a , b – экспериментально выведенные коэффициенты, определяемые по табл. 4.2.

4.2. Значения коэффициентов a , b

Класс веществ	a , °С	b	δ , °С
Алканы	-73,22	0,693	1,5
Ароматические углеводороды	- 67,83	0,665	3,0
Бромалканы	- 49,56	0,665	2,2
Спирты	- 41,69	0,652	1,1
Хлоралканы	55,70	0,631	1,7

Средняя квадратичная погрешность расчета δ также представлена в табл. 4.2.

Температуру воспламенения с большей погрешностью можно вычислить по формуле

$$t_{\text{в}} = t_{\text{кип}} - 18 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^4 a_i m_i - \sum_{j=1}^4 a_j m_j}, \quad (4.3)$$

m_i – количество i -го элемента в молекуле углеводорода; a_i – коэффициент значимости элемента; m_j – количество j -го элемента в молекуле углеводорода; a_j – коэффициент значимости элемента.

4.3. Соответствие названия элемента и коэффициента значимости

i	Наименование элемента	Значение коэффициента значимости a_i	j	Наименование элемента	Значение коэффициента значимости a_j
1	Углерод	4	1	Кислород	2
2	Водород	1	2	Хлор	2
3	Сера	4	3	Фтор	3
4	Азот	1	4	Бром	5

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4

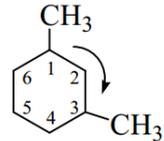
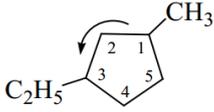
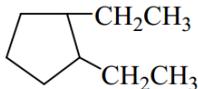
Цель работы: провести расчеты температуры воспламенения и распространения пламени горючей жидкости.

Индивидуальные задания

В соответствии с выбранным вариантом провести расчеты температуры воспламенения заданного углеводородного вещества (табл. 4.4).

4.4. Варианты заданий для практической работы № 4

№ варианта	Наименование вещества	Химическая формула
1	Пропан	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_3$
2	Бутан	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3$
3	Пентан	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3$
4	2-Метилпентан	$\begin{array}{c} \text{H}_3\text{C-CH-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$
5	2,2,4-Триметилпентан	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{H}_3\text{C-CH-CH}_2\text{-C-CH}_3 \\ \quad \\ \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \end{array}$
6	Пропен	$\text{CH}_3\text{-CH}=\text{CH}_2$
7	2-Буден	$\text{CH}_3\text{-CH}=\text{CH-CH}_3$
8	4-Метил-2-пентан	$\begin{array}{c} \text{CH}_3\text{-CH-CH=CH-CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$
9	2-Бром-1-нитропропен	$\begin{array}{c} \text{Br} \quad \text{H} \\ \diagdown \quad / \\ \text{C}=\text{C} \\ / \quad \diagdown \\ \text{H}_3\text{C} \quad \text{NO}_2 \end{array}$
10	2-Бромпентан	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH(Br)-CH}_3$
11	Трет-бутиловый спирт	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3\text{-C-OH} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$
12	1-Гексен	$\text{CH}_2=\text{CH-C}_4\text{H}_9$
13	1-Гептен	$\text{CH}_2=\text{CH-C}_5\text{H}_{11}$
14	1-Октен	$\text{CH}_2=\text{CH-C}_6\text{H}_{13}$
15	2,4,4-Триметил-1-пентен	$\text{CH}_2=\text{C(CH}_3\text{)-CH}_2\text{-C(CH}_3\text{)}_3$
16	1-Децен	$\text{CH}_2=\text{CH-C}_8\text{H}_{17}$
17	1-Октадецен	$\text{CH}_2=\text{CH-C}_{16}\text{H}_{33}$
18	Дивинил	$\text{CH}_2=\text{CH-CH}=\text{CH}_2$

№ варианта	Наименование вещества	Химическая формула
19	Метилаллен	$\text{CH}_3\text{-CH}=\text{C}=\text{CH}_2$
20	Пиперилен	$\text{CH}_3\text{-CH}=\text{CH-CH}=\text{CH}_2$
21	Этилаллен	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}=\text{C}=\text{CH}_2$
22	1,3-Диметилциклогексан	
23	1-Метил-3-этил	
24	1,2-Диэтил-циклопентан	

Контрольные вопросы

1. Факторы, влияющие на температуру воспламенения углеводородных соединений.
2. Формула Элея.
3. Общая структурная формула алканов, примеры.
4. Общая структурная формула алкенов, примеры.
5. Общая структурная формула алкадиенов, примеры.
6. Общая структурная формула алкинов, примеры.
7. Общая структурная формула циклоалканов, примеры.
8. Углеводородное топливо (определение, структура, физические свойства).
9. Температура воспламенения (определение, аналитические и экспериментальные методы определения).
10. Типы связи углеводородных топлив.
11. Классификация углеводородных топлив по структурной формуле молекул.
12. Ароматические углеводороды (определение, структурная формула, основные свойства).

5. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРЕДЕЛЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

Температура воспламенения углеводородов имеет верхний и нижний пределы воспламенения. Нижний температурный предел воспламенения зависит соответственно от давления насыщенного пара, которое можно вычислить по следующему эмпирическому соотношению [1]:

$$p_{\text{н}} = \frac{p_{\text{атм}}}{4,76 \cdot (n - 1) + 1}, \quad (5.1)$$

где $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, мм рт. ст.; n – количество атомов кислорода, требуемое для взаимодействия с молекулой углеводорода.

В общем виде это давление определяется по формуле, предложенной в работе [3]:

$$p_{\text{н}} = \frac{0,21 \cdot p_{\text{атм}}}{2 \cdot \left(n_{\text{C}} + n_{\text{S}} + \frac{n_{\text{H}} - n_{\text{X}} - n_{\text{O}}}{4} \right)}, \quad (5.2)$$

где n_{C} – число атомов углерода в молекуле углеводородного вещества; n_{S} – число атомов серы в молекуле углеводородного вещества; n_{H} – число атомов водорода в молекуле углеводородного вещества; n_{X} – число атомов галогена в молекуле углеводородного вещества; n_{O} – число атомов кислорода в молекуле углеводородного вещества.

Уточненная формула определения насыщенного пара при нижнем температурном пределе воспламенения предложена в литературе [4]:

$$p_{\text{н}} = \frac{p_{\text{атм}}}{1 + 4,76 \cdot \left(2 \cdot \left(n_{\text{C}} + n_{\text{S}} + \frac{n_{\text{H}} - n_{\text{X}} - n_{\text{O}}}{4} \right) \right)}. \quad (5.3)$$

Для алканов можно воспользоваться упрощенной формулой:

$$p_{\text{н}} = \frac{p_{\text{атм}}}{14,04 \cdot n_{\text{C}}}. \quad (5.4)$$

Определение давления насыщенного пара при верхнем температурном пределе воспламенения определяется по формуле

$$p_{\text{в}} = \frac{3,96 \cdot p_{\text{атм}}}{(4,76 \cdot n_{\text{O}} + 4)}. \quad (5.5)$$

Температурные пределы воспламенения определяются по данным табл. 5.1.

5.1. Зависимости верхнего и нижнего температурных пределов воспламенения от соответствующего давления

Давление, Па	133,33	1333,22	2666,44	5332,88	7999,32	13332,20	26 664,40	53 328,80	101 325,00
Вещество	Температура, °С								
Ацетон	213,60	241,90	252,20	263,60	271,00	280,70	295,70	312,50	329,50
Альдегид уксусный	191,50	216,20	225,20	235,20	241,60	250,40	263,00	277,90	293,20
Ангидрид уксусный	274,70	309,00	321,80	335,10	343,80	355,20	373,00	392,80	412,60
Акриловая кислота	276,50	312,00	325,00	339,20	348,00	359,10	376,30	395,00	414,00
Спирт аллиловый	253,00	283,50	294,70	306,40	313,30	323,00	337,50	353,20	369,60
Спирт амиловый	286,60	317,90	328,80	341,00	348,50	358,80	375,00	392,80	410,80
Спирт бензиловый	331,00	365,60	378,80	392,80	402,30	414,70	433,00	456,00	477,70
Бензол	236,30	261,50	270,40	280,60	288,40	299,10	315,20	333,60	353,10
Спирт бутиловый	271,80	303,20	314,50	326,40	333,30	343,10	357,30	373,80	390,50
Спирт бутиловый (вторичный)	260,80	289,00	300,30	311,10	318,20	327,10	340,90	356,90	372,50
Спирт бутиловый (третичный)	252,60	278,50	287,30	297,50	304,00	312,80	325,70	341,00	355,90
Спирт изобутиловый	264,00	294,70	307,30	317,10	324,70	334,50	348,90	364,40	381,00
Бромистый этил	198,70	225,50	235,20	246,30	253,50	263,00	287,50	294,00	311,40
Бутилбензол	295,70	335,00	349,30	365,40	375,60	389,20	409,90	432,20	456,10
Бутилформиат	246,60	279,10	291,00	304,60	312,80	324,00	340,90	359,20	379,00
Метилэтилкетон	224,20	255,30	266,50	279,00	287,00	298,00	314,60	333,00	352,60
Метилциклогексан	237,10	269,80	281,70	295,00	303,50	315,10	332,60	352,60	373,90
3-Метил-2-бутанол	253,10	281,30	291,30	302,60	309,20	318,50	332,00	346,80	361,90
2- Метилбутан	190,10	216,00	225,70	236,50	243,40	255,25	267,10	283,50	300,80
Метиловый спирт	229,00	256,80	267,00	278,00	285,10	294,20	307,80	322,90	337,70
Оксид этилена	198,00	224,00	233,70	244,60	251,70	261,00	275,10	290,80	307,50
Октан	259,00	281,30	304,50	318,10	326,80	338,70	356,60	377,00	398,60
Пропилбензол	279,30	316,40	329,80	344,60	354,10	370,30	386,50	408,70	432,20
Спирт н-пропиловый	258,00	287,70	298,30	309,40	316,50	325,80	339,80	355,00	370,80
Спирт пропиловый (вторичный)	299,10	275,40	285,70	296,80	303,50	312,50	326,00	340,80	355,50
Стирол	266,00	303,80	317,60	332,80	342,50	355,00	374,30	395,50	418,20
Сероуглерод	199,20	228,30	238,70	250,50	257,70	267,90	283,40	301,00	319,50
Толуол	246,30	279,40	291,40	304,80	313,30	324,90	342,50	362,50	383,60
Эфир уксуснометиловый	215,80	243,70	253,90	265,10	272,50	282,40	297,00	313,00	330,80
Эфир уксуснопропиловый	246,30	278,40	289,00	301,80	310,00	320,80	337,00	355,90	374,80
Эфир уксусноэтиловый	229,60	259,50	270,00	282,10	289,60	300,00	315,00	332,30	350,10
Этиловый спирт	241,70	270,70	281,00	292,00	299,00	307,90	321,40	336,50	351,40
Этилциклопентан	240,80	272,90	284,70	298,00	306,40	318,00	335,40	355,30	381,40
Этилбензол	263,20	298,90	311,60	325,80	334,80	347,10	365,70	386,80	409,20
Диэтиловый эфир	198,70	224,90	234,50	245,20	251,20	261,50	275,20	290,90	307,60

Для веществ, у которых неизвестна зависимость, представленная в табл. 5.1, верхний и нижний пределы воспламенения определяются по формулам:

$$t_{\text{H}} = 0,655 \cdot t_{\text{кип}} - 62,46 + \sum_{j=2}^m a_j l_j ; \quad (5.6)$$

$$t_{\text{B}} = 0,723 \cdot t_{\text{кип}} - 41,43 + \sum_{j=2}^m a_j l_j , \quad (5.7)$$

где a_j – коэффициент, определяемый по табл. 5.2; l_j – коэффициент, определяемый по табл. 5.3.

5.2. Значения коэффициента a_j

Структурная группа	$a_j, ^\circ\text{C}$	
	t_{H}	t_{B}
C–H	0,009	0,570
C–O	0,11	1,267
C–C	0,909	– 1,158
O–H	19,57	17,8
C = C	2,66	– 4,64
C = O	5,57	5,86
	– 4,4	– 4,6

5.3. Значения коэффициента l_j

Гомологический ряд	Химическая формула	l_j	
		l_{H}	l_{B}
2-Метилкарбинолы	$(\text{CH}_3)_2\text{CH}-(\text{CH}_2)_n-\text{OH}$	44,1	21,5
2-Метилалканы	$(\text{CH}_3)_2-\text{CH}-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	74,9	52,2
н-Алкилацетаты	$\text{CH}_3\text{COO}-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	50,9	50,9
н-Алکیلформиаты	$\text{HCOO}-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	47,6	25,0
Нормальные алканы	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	73,8	50,3
Нормальные 1-алканы	$\text{CH}_2 = \text{CH}-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	74,5	49,5
Нормальные жирные спирты	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{OH}$	33,7	15

где n – целое число 1, 2, 3... .

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5

Цель работы: провести расчеты температурных пределов воспламенения углеводородных веществ.

Порядок выполнения

1. В соответствии со своим вариантом задания, которое представлено в табл. 5.4, определить у вещества структурную химическую формулу.

5.4. Варианты заданий для практического занятия № 5

Номер варианта	Название вещества	Номер варианта	Название вещества
1	Ацетон	2	Метилэтилкетон
3	Акриловая кислота	4	Метилциклогексан
5	Спирт аллиловый	6	3-Метил-2-бутанол
7	Спирт амиловый	8	2- Метилбутан
9	Спирт бензиловый	10	Метиловый спирт
11	Бензол	12	Октан
13	Спирт бутиловый	14	Пропилбензол
15	Спирт бутиловый (вторичный)	16	Спирт н-пропиловый
17	Спирт изобутиловый	18	Спирт пропиловый (вторичный)
19	Бромистый этил	20	Стирол
21	Бутилбензол	22	Сероуглерод
23	Бутилформиат	24	Толуол

2. По формулам (5.1) – (5.4) определяется давление насыщенного пара при нижнем температурном пределе воспламенения.

3. По формуле (5.5) вычисляется давление насыщенного пара при верхнем температурном пределе воспламенения.

4. По таблице 5.1 методом интерполяции определяются нижний и верхний температурные пределы воспламенения.

5. По формулам (5.6), (5.7) определяются нижний и верхний температурные пределы воспламенения.

6. Осуществить сравнение полученных результатов.

Контрольные вопросы

1. Нижний температурный предел воспламенения.
2. Верхний температурный предел воспламенения.
3. Перечислите методы определения насыщенного пара при нижнем температурном пределе воспламенения.
4. Определение давления насыщенного пара при нижнем и верхнем температурных пределах воспламенения по известному концентрационному пределу воспламенения.
5. Экспериментальный метод определения температурных пределов воспламенения.
6. Применение температурных пределов воспламенения.
7. Условия отнесения жидкостей к пожаровзрывоопасным.

6. РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПРЕДЕЛОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ГОРЮЧЕЙ СРЕДЫ

Процесс горения может осуществляться только при условии наличия необходимых внутренних и внешних параметров исследуемой среды. Первым параметром является соотношение концентраций горючего и окислительной среды. Этот параметр имеет как верхний предел воспламенения, так и нижний, при которых пламя имеет возможность распространяться в пыле- или газовой-воздушной смеси. В основном мы будем рассматривать газозвудушные смеси или мелкодисперсные твердые или жидкие горючие вещества в окислительной среде. Пределы воспламенения образуются вследствие большого расстояния между парами окислителя и горючей среды. В случае, когда концентрация горючего вещества меньше нижнего предела воспламенения, инициирование реакции окисления в одной паре молекул окислителя и горючего не позволяет передать достаточно энергии другой паре для продолжения реакции. Таким образом, смесь не сможет самостоятельно продолжать реакцию окисления, и цепная реакция с выделением тепла прекращается.

Механизм формирования верхнего концентрационного предела аналогичен формированию с нижнего предела воспламенения, с той лишь разницей, что в качестве буферного газа выступает горючий газ.

Область концентраций между нижним и верхним пределами воспламенения называется областью воспламенения, которая зависит от вида горючего, температуры, давления, а также концентрации инертного газа.

Вычисление области концентраций необходимо при определении условий эксплуатации технологического оборудования, систем вентиляции и т.д.

Повышение температуры рассматриваемой горючей смеси расширяет диапазон концентраций области воспламенения, а также для некоторых негорючих смесей переводит в разряд горючих.

Давление также расширяет диапазон области воспламенения, при этом существует нижний порог давления, при котором воспламенения и распространения пламени не происходит.

РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПРЕДЕЛОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ

1. Исходные параметры: название и концентрация φ_1 горючего компонента, объем заданной смеси V_{Γ} , объем свободного пространства $V_{\text{св}}$.

2. По названию горючего вещества определяется структурная химическая формула.

3. Проводится расчет нижнего концентрационного предела по формуле

$$\varphi_{\text{н}} = \frac{100}{1 + h_{\text{обр}} \cdot \Delta H_f^0 + \sum_j^k h_j m_j}, \quad (6.1)$$

где ΔH_f^0 – теплота образования органических веществ, кДж/моль; $h_{\text{обр}}$ – коэффициент при ΔH_f^0 ; m_j – число атомов j -го типа в молекуле; h_j – вклад атома j -го типа в величину нижнего концентрационного предела распространения пламени.

Определение параметров для вычисления по формуле (6.1) осуществляется по табл. 6.1, 6.2.

6.1. Теплота образования органических веществ

Вещество	ΔH_f^0	Вещество	ΔH_f^0
1,1-Диметилцикло-пентан	-138,4	Дипропиловый эфир	-293,4
1,2,3-Триметилбензол	-9,59	Дифениловый эфир	70
1,3,5-Триметилбензол	-16,08	Диэтиламин	-71,7
2,2,4-Триметилпентан	-224	Диэтиловый эфир	-252,2
2,2-Диметилпентан	-206,1	Изопропил бензол	-21,5
2,2-Диметилпропан	-166	Изопропилацетат	-504,7
2,3,3-Триметилгексан	-238,8	Изопропиловый спирт	-272,4
2,4-Диметил-пентанол-3	-370,5	Масляная кислота	-486,3
2-Метилбутадиен-1,3	75,73	Метан	-74,85
2-Метилбутан	-154,5	Метанол	-201
2-Метилбутен-1	-36,64	Метиламин	-23
2-Метилпентаналь	-249,1	Метилацетат	-409,1
2-Метилпропан	-134,5	Метилформиат	-349,8
2-Метилпропен	-16,9	Метилциклогексан	-154,9
2-Метил-тропанол-1	-284	Метилциклопентан	-106,7
3-Метилбутанон-2	-262,6	Метилэтиловый эфир	-216,4
3-Этилпентан	-189,7	Муравьиная кислота	-378,8
<i>n</i> -Амиловый спирт	-302,4	<i>n</i> -октан	-208,5
<i>n</i> -Бутанол	-274,4	Нонан	-228,3

Продолжение табл. 6.1

Вещество	ΔH_f^0	Вещество	ΔH_f^0
<i>n</i> -Пропиламин	-101,5	Октен-1	-82,9
Амилацетат	-556,8	Орто-метилстирол	118,4
Амилбутират	-617,9	Пара-ксилол	17,95
Амилпропионат	-584	Пара-метилстирол	114,7
Аммиак	193	Пентадиен-1,2	145,69
Анилин	75,98	Пентадиен-1,3	75,77
Ацетальдегид	-166	Пентан	-146,4
Ацетилен	226,75	Пентанол-3	-316,7
Ацетон	-218,5	Пентанон-2	-258,6
Бензол	82,93	Пентен-1	-21,27
Бутадиен-1,2	162,21	Пропадиен (аллен)	192,13
Бутадиен-1,3 (дивинил)	110,16	Пропан	-103,9
Бутан	-126,2	Пропаналь	-192
Бутаналь	-205	Пропанол-1	-257,7
Бутандион-2, 3	-327	Пропен	20,41
Бутанон-2	-238,3	Пропилбензол	7,9
Бутен-1	-0,13	Пропилциклопентан	-148,2
Бутиламин	-94,8	Пропионовая кислота	-466
Бутилацетат	-526	Стирол (винилбензол)	147,36
Бутилбензол	-13,7	Толуол	50
Бутилбутират	-587,7	Транс-бутен-2	-11,17
Бутилвиниловый эфир	-179,2	Трет-бутилбензол	-22,68
Бутилформиат	-437,6	Триметиламин	-51
Валериановая кислота	-490,4	Триэтиламин	-98,7
Валериановый альдегид	-227,8	Уксусная кислота	-104,3
Втор-бутилбензол	-17,36	Формальдегид	-115,9
Гексадекан	-373,6	Циклобутан	26,65
Гексан	-167,2	Циклогексан	-123,4
Гексанол-1	-78,94	Циклогексен	-5,36
Гексен-1	-41,7	Циклопентан	-77,24
Гептан	-187,8	Циклопропан	53,3
Гептанол-1	-335,1	Цис-бутен-2	-6,99
Гептанон-2	-291,9	Цис-гексен-2	-48,4
Гептен-1	-62,3	Цис-пентен-2	-28,1
Гептилформиат	199,4	Этан	-84,67
Глицерин	-581,5	Этанол	-234,8
Декан	-249,8	Этиламин	-47,4
Децен-1	-124,2	Этилацетат	-520
Диметиламин	-27,64	Этилбензол	29,8
Диметиловый эфир	-184	Этилен	52,3
Диоксан-1, 4	-315,3	Этиленгликоль	-389,3
Дипропиловый эфир	-293,4	Этилциклобутан	-23

6.2. Коэффициенты при теплоте сгорания

Углеводороды	$h_{обр}$	h_C	h_H	h_O	h_N	h_{Cl}
Алканы	0,0399	3,919	4,483	–	–	–
Алифатические спирты	0,0432	4,287	4,889	–0,522	–	–
Алкены	0,0419	4,141	4,727	–	–	–
Алкилхлориды	0,0399	3,919	4,483	–	–	–0,586
Альдегиды	0,049	4,936	5,583	–0,522	–	–
Амины	0,036	3,501	4,006	–	–0,494	–
Ароматические углеводороды	0,0489	4,904	5,569	–	–	–
Карбоновые кислоты	0,0594	6,087	6,847	–0,522	–	–
Кетоны	0,0453	4,534	5,142	–0,522	–	–
Простые эфиры	0,0415	4,113	4,679	–0,522	–	–
Сложные эфиры	0,051	5,161	5,83	–0,522	–	–

В случае расчета смесей углеводородов, обладающих способностью горения, нижний концентрационный предел распространения определяется по следующему соотношению:

$$\varphi_{н(см)} = \frac{\sum_i^l \varphi_i}{\sum_i \frac{\varphi_i}{\varphi_{ни}}}, \quad (6.2)$$

где φ_i – доля компонента смеси, рассчитанная по занимаемому объему, %; $\varphi_{ни}$ – нижний концентрационный предел распространения i -го компонента пламени; i – тип элемента.

При этом вещества в смеси не должны взаимодействовать между собой при нормальной температуре.

4. Рассчитывается верхний предел распространения пламени. Этот параметр рассчитывается для веществ, включающих в себя следующие элементы: С, Н, О, N, Cl. В зависимости от стехиометрического коэффициента β , который располагается перед кислородом в реакции окисления горючего вещества, для расчета используется соответствующая формула:

$$\varphi_B = \frac{100}{\sum_s^a q_s + \sum_i^k b_i n_i} \quad \text{при } \beta \leq 8; \quad (6.3)$$

$$\varphi_B = \frac{100}{6,554 + 0,768\beta} \quad \text{при } \beta > 8,$$

где b_i – коэффициент, определяемый значимость связи различного типа на значение верхнего концентрационного предела распространения пламени;

n_i – количество связей определенного типа в структурной формуле углеводородного топлива; $\sum_s^a q_s$ – суммарная величина вклада функциональных групп в структурной формуле рассматриваемого углеводорода в итоговое значение верхнего концентрационного предела распространения пламени.

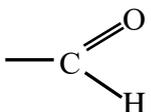
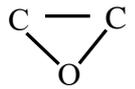
Коэффициент b_i определяется по табл. 6.3.

6.3. Значения коэффициента

Тип связи	b_i	Тип связи	b_i	Тип связи	b_i
C–H	1,39	C=O	1,31	N–H	0,69
C–C	– 0,84	O–H	1,25	N≡C	2,07
C=C	0,24	C–Cl	0,71	C≡C	1,93
C–O	– 1,40	C–N	– 1,77	C=C	0,89

Коэффициент q_s определяется по наличию типа функциональной группы из табл. 6.4.

6.4. Значение q_s для функциональных групп структурной формулы углеводородного соединения

№	Функциональная группа	q_s
1		–1,47
2	Неароматический цикл	$\frac{9}{n_C}$
3		1,11

Значение n_C – количество углерода в цикле. В определении верхнего концентрационного предела распространения пламени для альдегидов, имеющих первую функциональную группу, одна связь C–C, C=O и C–H не учитывается.

Для расчета коэффициента β применяется формула

$$\beta = n_C + n_S + 0,25 \cdot (n_H - n_X) - 0,5n_O + 2,5n_P, \quad (6.4)$$

где n_C – количество атомов углерода; n_S – количество атомов серы; n_H – количество атомов водорода; n_X – количество атомов галогена; n_O – количество атомов кислорода; n_P – количество атомов углерода.

5. Рассчитывается верхний концентрационный предел распространения определяется для всей смеси по следующему соотношению:

$$\varphi_{в(см)} = \frac{\sum_i^l \varphi_i}{\sum_i \frac{\varphi_i}{\varphi_{вi}}}. \quad (6.5)$$

6. Рассчитывается текущая концентрация углеводородного вещества:

$$\varphi_T = \frac{V_{г.}}{V_{св}}. \quad (6.6)$$

7. Определяются условия пожаровзрывобезопасного хранения и эксплуатации углеводородных веществ и их смесей. Для анализа используется следующее условие, при выполнении которого смесь не обладает пожаровзрывоопасного состояния:

$$\varphi_H \geq \varphi_T \geq \varphi_B, \quad (6.7)$$

где φ_T – текущая объемная концентрация вещества или смеси.

Рассмотрим пример выполнения задания.

Исходные данные:

1. Первый компонент бутан (C_4H_{10}).
2. Второй компонент пары циклогексан (C_6H_{12}).
3. Объемная доля бутана в смеси (C_4H_{10}) = 70%.
4. Объемная доля паров циклогексана (C_6H_{12}) = 30%.
5. Объем горючей смеси 25 м³.
6. Свободный объем помещения 800 м³.

Справочные данные:

По таблице 6.1 определяем теплоту образования бутана (C_4H_{10}) и циклогексана (C_6H_{12}) в смеси

$$\Delta H_f^0(C_4H_{10}) = -126,2;$$

$$\Delta H_f^0(C_6H_{12}) = -123,1.$$

Определяем тип углеводорода и соответствующие коэффициенты $h_{обр}$, h_C , h_H . В нашем случае бутан относится к разновидности алканов, которые являются ациклическими углеводородами и содержащие только простые одинарные связи. В соответствии с табл. 6.2 для алканов коэффициенты для формулы 6.1 равны:

$$h_{обр} = 0,0399, h_C = 3,919, h_H = 4,483.$$

Аналогично для циклогексана определяем его вид и соответствующие коэффициенты. Циклогексан относится к циклическим алканам. Соответственно коэффициенты перед теплотой образования будут равны:

$$h_{обр} = 0,0399, h_C = 3,919, h_H = 4,483.$$

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6

Цель работы: провести расчеты пределов концентрации воспламенения горючей среды.

Решение задания по определению пожаровзрывоопасности смеси газов проводится по вышеописанной процедуре.

1. Рассчитывается нижний концентрационный предел каждой компоненты углеводородной смеси в рассматриваемом объеме:

$$\begin{aligned} \varphi_H(C_4H_{10}) &= \frac{100}{1 + h_{обр} \Delta H_f^0 + \sum_j h_j m_j} = \\ &= \frac{100}{1 + 0,0399 \cdot (-126,2) + (3,919 \cdot 4 + 4,483 \cdot 10)} = 1,7708\%; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi_H(C_6H_{12}) &= \frac{100}{1 + h_{обр} \Delta H_f^0 + \sum_j h_j m_j} = \\ &= \frac{100}{1 + 0,0399 \cdot (-123,4) + (3,919 \cdot 6 + 4,483 \cdot 12)} = 1,3627\%. \end{aligned}$$

2. Рассчитывается нижний концентрационный предел углеводородной смеси в рассматриваемом объеме:

$$\varphi_{\text{н(см)}} = \frac{\sum_i^l \varphi_i}{\sum_i^l \frac{\varphi_i}{\varphi_{\text{ни}}}} = \frac{70\% + 30\%}{\frac{70\%}{1,7708\%} + \frac{30\%}{1,3627\%}} = 1,6248\%.$$

3. Определяем коэффициент β для каждого компонента:

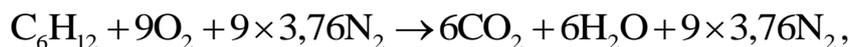


$$\beta(\text{C}_4\text{H}_{10}) = 6,5.$$

или по формуле

$$\beta(\text{C}_4\text{H}_{10}) = n_{\text{C}} + n_{\text{S}} + 0,25 \cdot (n_{\text{H}} - n_{\text{X}}) - 0,5n_{\text{O}} + 2,5n_{\text{P}} = 4 + 0,25 \cdot 10 = 6,5.$$

Для циклогексана коэффициент β



$$\beta(\text{C}_6\text{H}_{10}) = 9$$

или по формуле

$$\beta(\text{C}_6\text{H}_{12}) = n_{\text{C}} + n_{\text{S}} + 0,25 \cdot (n_{\text{H}} - n_{\text{X}}) - 0,5n_{\text{O}} + 2,5n_{\text{P}} = 6 + 0,25 \cdot 12 = 9.$$

4. Рассчитывается верхний предел распространения пламени в рассматриваемом объеме для каждого компонента газовой смеси. Так как у бутана $\beta < 8$, а у циклогексана $\beta > 8$, то расчет будет проходить по разным формулам:

$$\varphi_{\text{в}}(\text{C}_4\text{H}_{10}) = \frac{100}{\sum_s^a q_s + \sum_i^k b_i n_i} = \frac{100}{\frac{9}{4} + (3 \cdot (-0,84) + 10 \cdot 1,39)} = 7,34\%;$$

$$\varphi_{\text{в}}(\text{C}_6\text{H}_{12}) = \frac{100}{6,554 + 0,768\beta} = \frac{100}{6,554 + 0,768 \cdot 9} = 7,43\%.$$

5. Рассчитывается верхний концентрационный предел распространения пламени в рассматриваемом объеме для всей смеси:

$$\varphi_{\text{в(см)}} = \frac{\sum_i^l \varphi_i}{\sum_i^l \frac{\varphi_i}{\varphi_{\text{вi}}}} = \frac{70\% + 30\%}{\frac{70\%}{7,34\%} + \frac{30\%}{7,43\%}} = 7,37\%.$$

6. Рассчитывается концентрация углеводородной смеси в рассматриваемом объеме:

$$\varphi_{\tau} = \frac{V_{\tau}}{V_{\text{св}}} = \frac{25 \text{ м}^3}{800 \text{ м}^3} = 0,03125.$$

7. Проводится анализ на взрывопожароопасность заданного состава горючей смеси:

$$1,3625 \leq 3,125 \leq 7,37.$$

Как видим из приведенного условия заданная смесь газов не удовлетворяет условию взрывопожаробезопасности $\varphi_{\text{н}} \geq \varphi_{\tau} \geq \varphi_{\text{в}}$. Таким образом, смесь является взрывопожароопасной.

6.5. Варианты заданий для практической работы № 6

№ варианта	Первый компонент	Доля 1-го компонента	Второй компонент	Доля 2-го компонента	$V_{\tau}, \text{м}^3$	$V_{\text{св}}, \text{м}^3$
1	Пентан	53	Метиламин	47	21	511
2	Пропилбензол	1	Пропанол-1	99	42	796
3	2,2-Диметилпропан	41	Циклобутан	59	41	561
4	Этилбензол	87	2,3,3-Триметилгексан	13	47	554
5	Диэтиловый эфир	76	Метилацетат	24	28	508
6	Метилэтиловый эфир	64	Бутаналь	36	21	880
7	Трет-бутилбензол	58	Этилциклобутан	42	46	458
8	Пентадиен-1,3	98	Бутадиен-1,3 (дивинил)	2	31	374
9	Пара-метилстирол	1	Метанол	99	14	372
10	Стирол (винилбензол)	28	Бутиламин	72	25	510
11	Этиламин	97	Гептан	3	21	412
12	Амилацетат	64	Гептанол-1	36	26	798
13	Бутилвиниловый эфир	63	Ацетальдегид	37	17	708
14	2-Метилбутан	45	Цис-бутен-2	55	20	849
15	Гексан	28	Цис-пентен-2	72	35	739
16	Гептен-1	9	Метан	91	37	939
17	Триметиламин	2	Изопропилацетат	98	46	601
18	Дипропиловый эфир	51	Децен-1	49	24	583

№ варианта	Первый компонент	Доля 1-го компонента	Второй компонент	Доля 2-го компонента	$V_{г}, \text{м}^2$	$V_{св}, \text{м}^2$
19	Бутадион-2, 3	5	Бутадиен-1,2	95	49	342
20	Гексен-1	36	Дипропиловый эфир	64	16	632
21	Бутан	62	n-Пропиламин	38	47	758
22	Дифениловый эфир	39	2-Метилпропен	61	41	621
23	Пропаналь	59	1,2,3-Триметил-бензол	41	18	351
24	2-Метилпропан	33	3-Метилбутанон-2	67	10	675

Контрольные вопросы

1. Нижний концентрационный предел воспламенения.
2. Верхний концентрационный предел воспламенения.
3. Условия взрывопожароопасности среды.
4. Причины возникновения верхнего и нижнего концентрационных пределов воспламенения среды.
5. Влияние температуры на нижний и верхний концентрационные пределы воспламенения.
6. Влияние давления на нижний и верхний концентрационные пределы воспламенения.
7. Назначение расчетов нижнего и верхнего концентрационных пределов воспламенения различных сред.
8. Область воспламенения.
9. Влияние концентрации смеси на температуру вспышки.

7. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ

Химическую реакцию окисления можно представить в виде общей формулы



где A – углеводородное вещество.

Для инициации процесса реакции для молекул A и O_2 необходимо преодолеть только один энергетический барьер. Соответственно все молекулы A и O_2 , у которых общая кинетическая энергия больше энергетического барьера E , вступят в реакцию с образованием конечных продуктов. Количество молекул, вступивших в реакцию, пропорционально произведению концентраций c_A и c_{O_2} .

Так как процесс окисления углеводородного вещества имеет многостадийный характер, то скорость w реакции будет определяться самой медленной стадией реакции окисления по следующему соотношению:

$$w = \frac{1}{(-b)} w^{(A_n)} = k c_A c_{O_2}, \quad (7.1)$$

где k – константа скорости; $w^{(A_n)}$ – скорость образования вещества на самой медленной стадии окисления углеводородного топлива; $(-b)$ – стехиометрический коэффициент исходных веществ.

С другой стороны, скорость химической реакции для элементарных реакций первого порядка равна

$$w = \frac{1}{(-b)} \frac{dc_{A_n}}{dt} = k c_{A_n}, \quad (7.2)$$

где t – время.

Полученное дифференциальное уравнение можно решить методом разделения переменных

$$k dt = -\frac{dc}{c}. \quad (7.3)$$

Тогда интегрируя от 0 до t и от c_0 до c , определяем концентрацию:

$$c = c_0 e^{-kt}, \quad (7.4)$$

где c_0 – начальная концентрация исходного компонента.

Основной характеристикой скорости реакции является время полураспада $t_{1/2}$. Это время, за которое концентрация уменьшается в 2 раза. Соответствующее соотношение имеет вид

$$t_{1/2} = \frac{0,693}{k}. \quad (7.5)$$

Из формулы видно, что $t_{1/2}$ не зависит от концентрации исходного компонента, сильно зависит от константы скорости k .

Для реакции горения, по правилу Ванг-Гоффа протекающей при температуре от 1000 до 2000 К, увеличение температуры на 10 К вызывает увеличение скорости в 2 – 4 раза.

Для большинства реакций горения константа скорости k определяется по уравнению Аррениуса:

$$k = A e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (7.6)$$

где A – коэффициент; E – энергия активации.

Коэффициент A для элементарных реакций определяется теоретически на базе молекулярно-кинетической теории, по которой этот коэффициент мало зависит от температуры.

Проведем вычисление энергии активации и коэффициента A перед экспонентой. Для этого проведем логарифмирование уравнения Аррениуса:

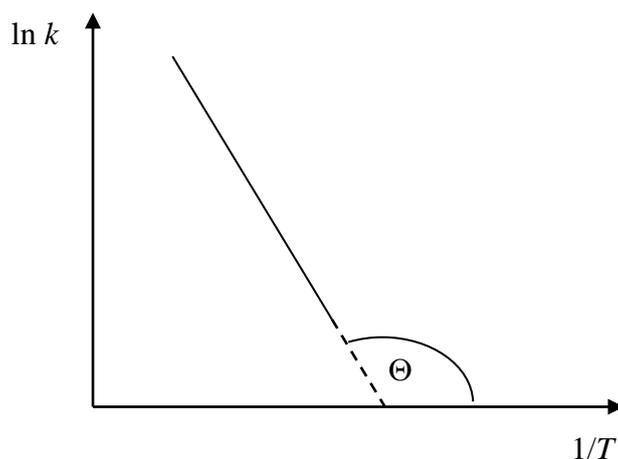
$$\ln(k) = \ln(A) - \frac{E}{R} \frac{1}{T}. \quad (7.7)$$

Если рассматривать уравнение Аррениуса в значениях координаты $\ln(k) - \frac{1}{T}$, то функциональная зависимость будет иметь линейную зависимость с наклоном под углом Θ к оси абсцисс, а также угловым коэффициентом, соответствующим отношению E/R , и тогда:

$$E = R \operatorname{tg}(\Theta); \quad (7.8)$$

$$\ln(A) = \ln(k) + \frac{E}{RT}. \quad (7.9)$$

Определение скорости реакции можно осуществить при нескольких температурах, а если известен кинетический закон реакции, то достаточно значение для одной температуры. Для определения константы скорости необходимо вычисление проводить при разных температурах:



$$k = \frac{w}{c_1^{n_1} c_2^{n_2} c_3^{n_3}}. \quad (7.10)$$

Расчет энергии активации проводится по константам скорости при двух уровнях температур и далее вносится в уравнение:

$$E = \frac{R(T_2 T_1)}{T_2 - T_1} \ln \frac{k_2}{k_1}. \quad (7.11)$$

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 7

Цель работы: определить влияние температуры пламени на скорость горения топлива. Установить взаимосвязь между температурой пламени и величиной константы скорости химической реакции окисления.

Порядок выполнения

1. В соответствии с вариантом задания (табл. 7.1) сформировать исходные данные для выполнения задания.

7.1. Варианты заданий для практической работы № 7

№ п/п	Реакция	График	Температура, К	
			T_1	T_2
1	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	Рис. 7.1	500	510
2	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	Рис. 7.2	490	510
3	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	Рис. 7.3	480	500
4	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	Рис. 7.4	480	490
5	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	Рис. 7.5	480	490
6	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	Рис. 7.6	470	480
7	$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 \rightarrow 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	Рис. 7.7	600	620
8	$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 \rightarrow 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	Рис. 7.8	580	640
9	$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 \rightarrow 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	Рис. 7.9	590	630
10	$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 \rightarrow 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	Рис. 7.10	610	650
11	$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 \rightarrow 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	Рис. 7.11	620	660
12	$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 \rightarrow 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	Рис. 7.12	630	680
13	$2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$	Рис. 7.13	950	1000
14	$2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$	Рис. 7.14	970	1050
15	$2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$	Рис. 7.15	980	1040
16	$2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$	Рис. 7.16	990	1060
17	$2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$	Рис. 7.17	1000	1050
18	$2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$	Рис. 7.18	1010	1040
19	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	Рис. 7.19	530	550
20	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	Рис. 7.20	540	560
21	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	Рис. 7.21	550	570
22	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	Рис. 7.22	560	580
23	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	Рис. 7.23	570	590
24	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	Рис. 7.24	580	600

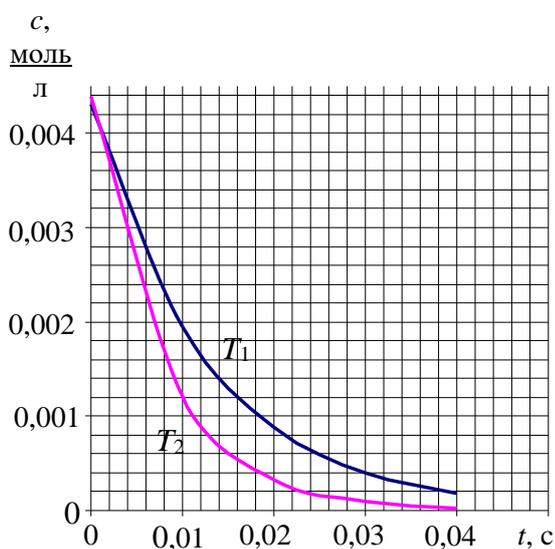


Рис. 7.1

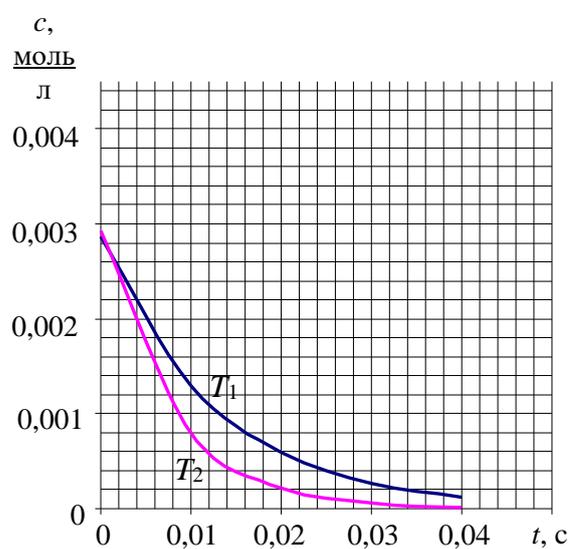


Рис. 7.2

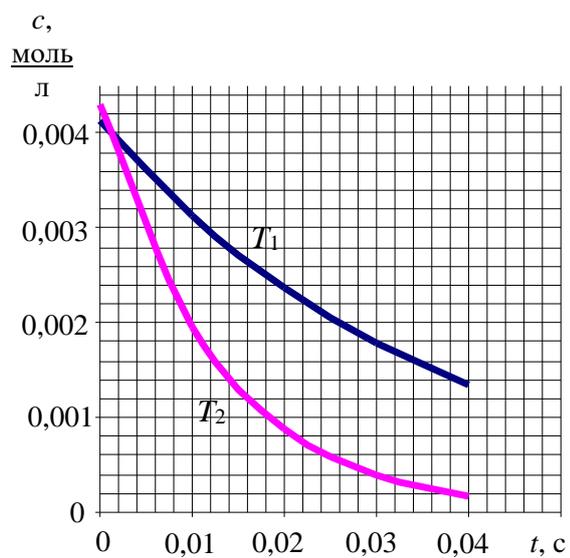


Рис. 7.3

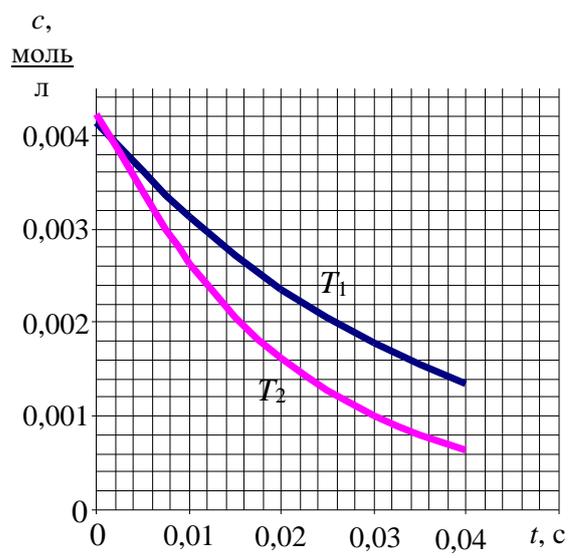


Рис. 7.4

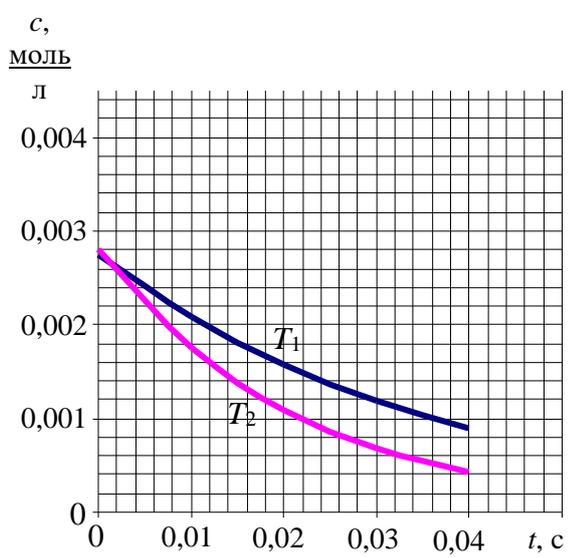


Рис. 7.5

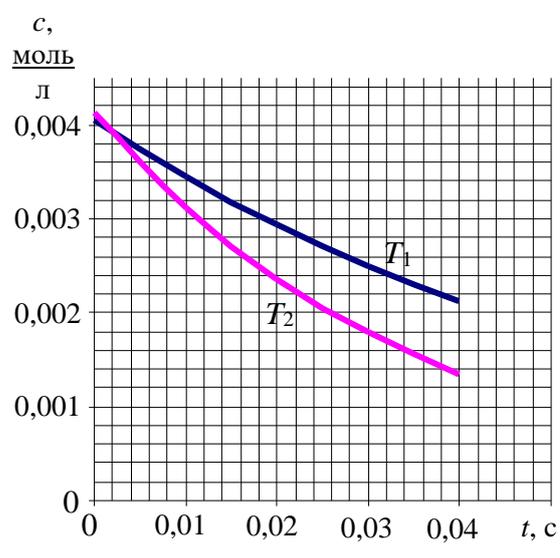


Рис. 7.6

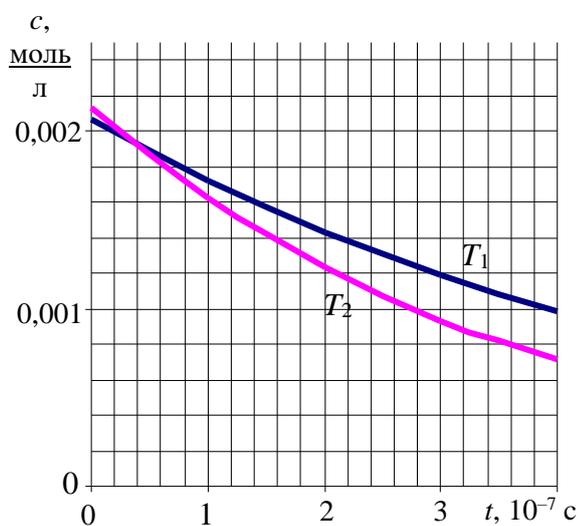


Рис. 7.7

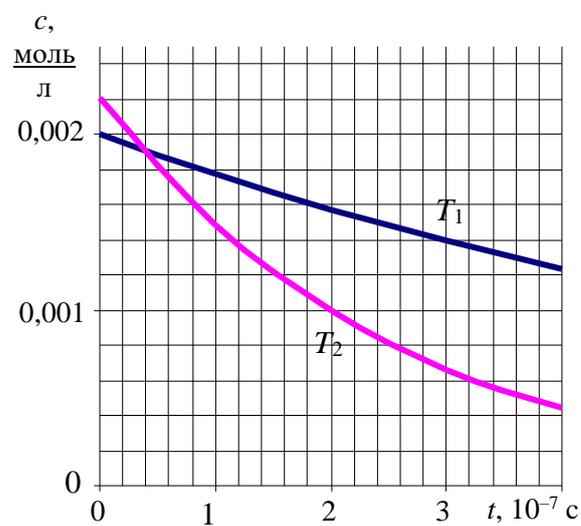


Рис. 7.8

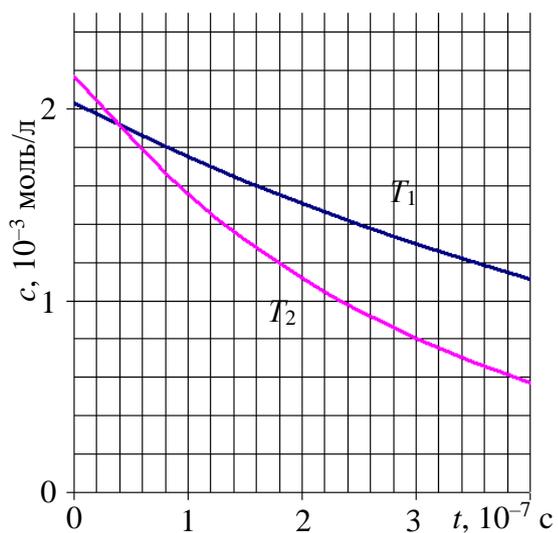


Рис. 7.9

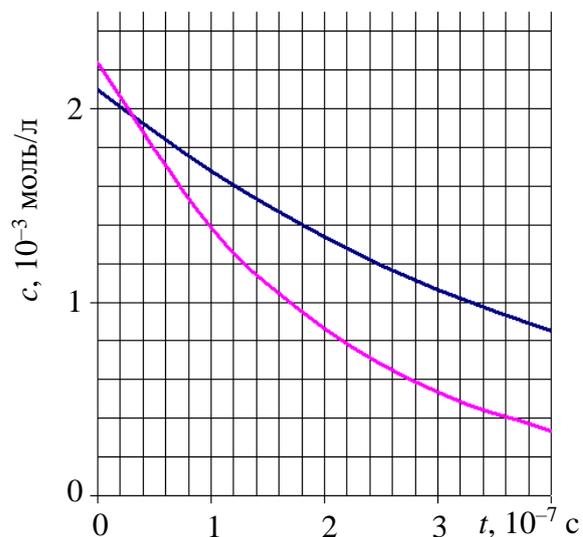


Рис. 7.10

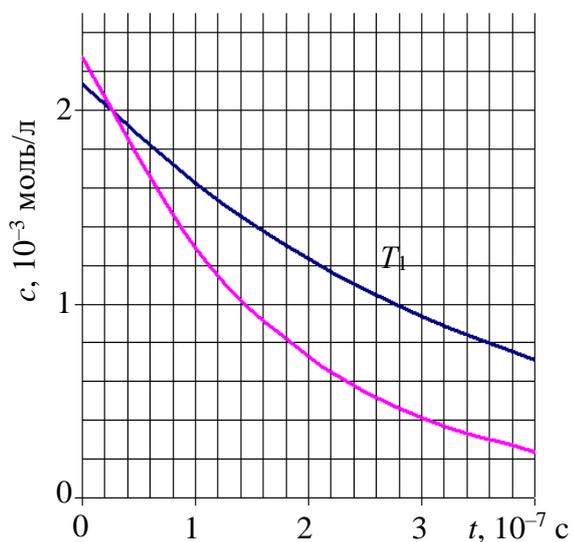


Рис. 7.11

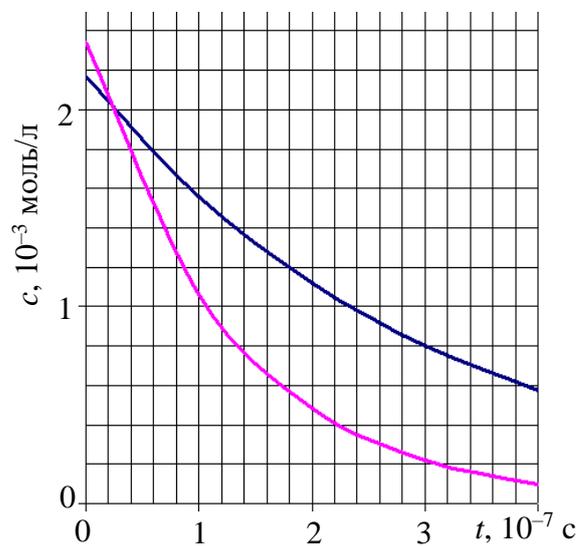


Рис. 7.12

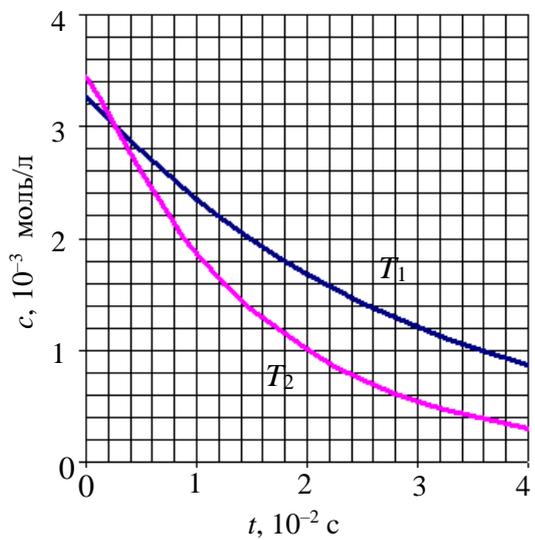


Рис. 7.13

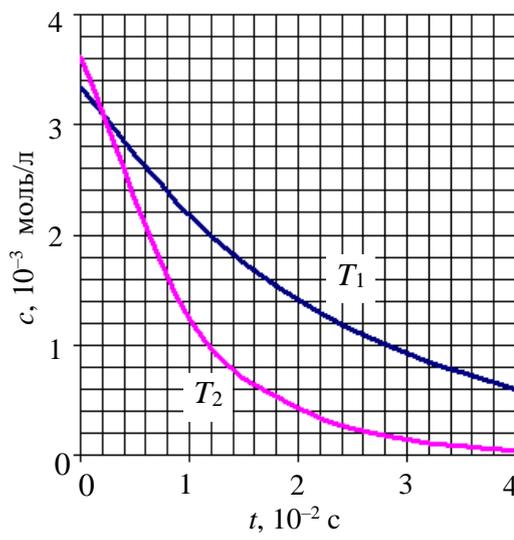


Рис. 7.14

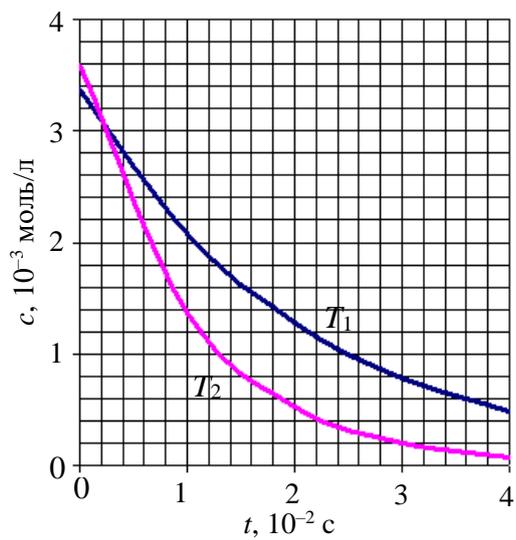


Рис. 7.15

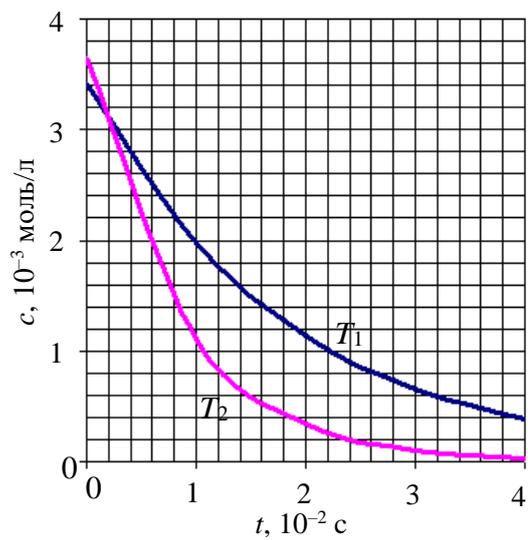


Рис. 7.16

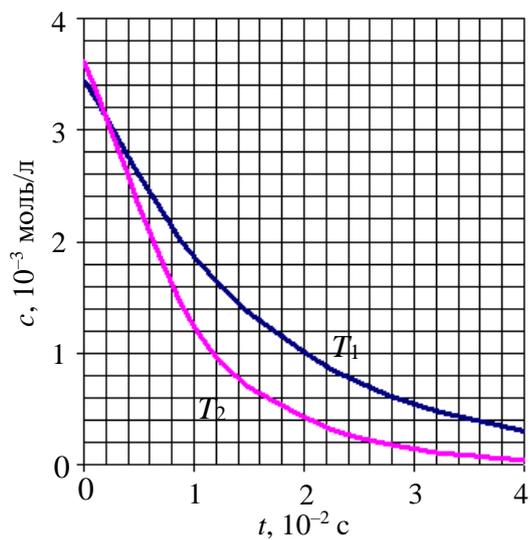


Рис. 7.17

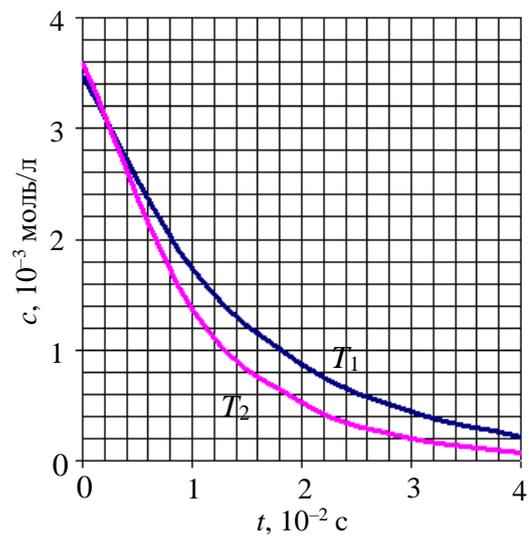


Рис. 7.18

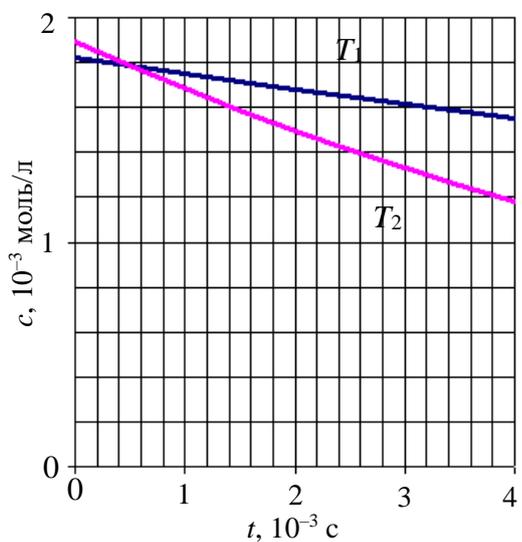


Рис. 7.19

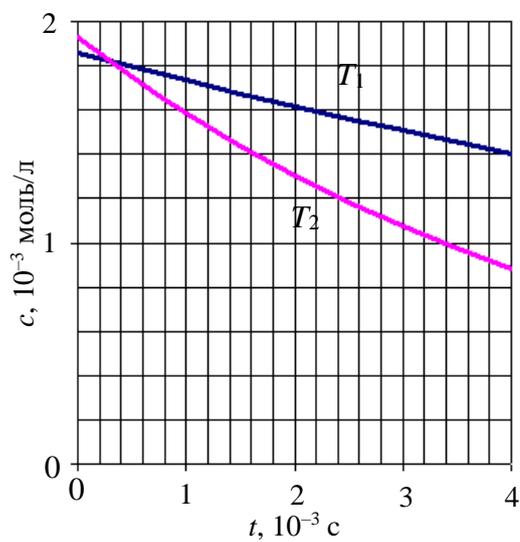


Рис. 7.20

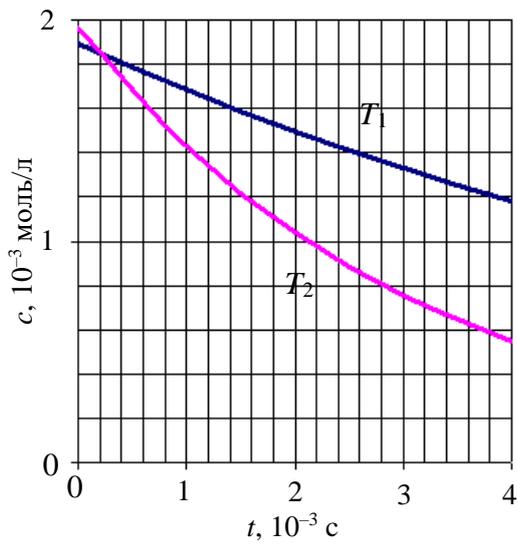


Рис. 7.21

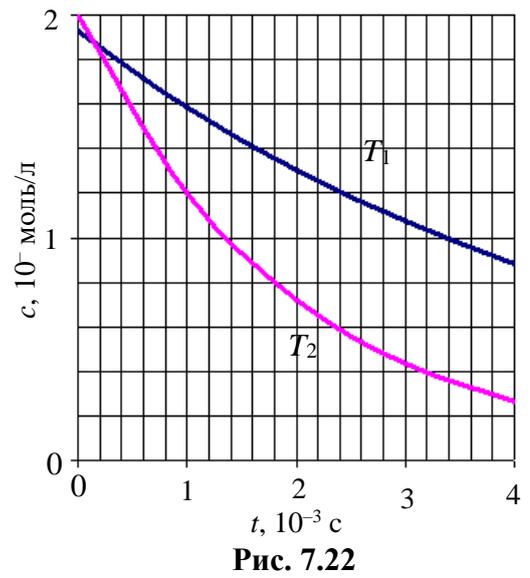


Рис. 7.22

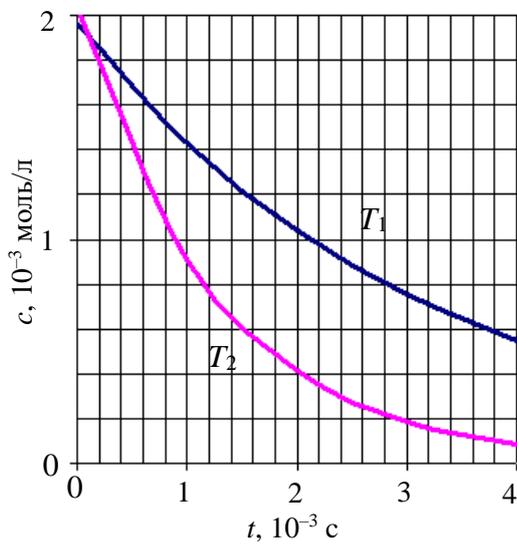


Рис. 7.23

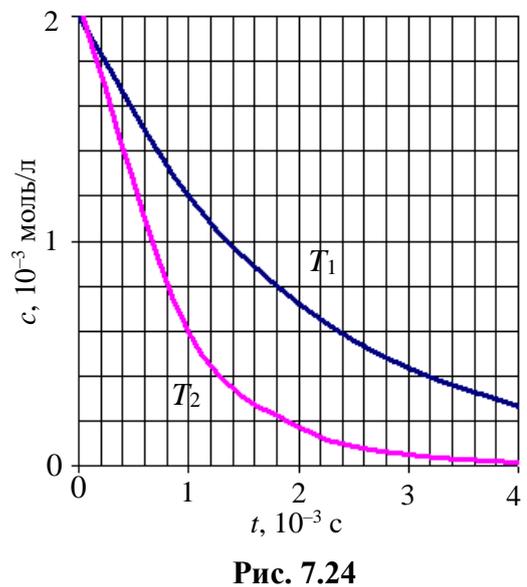


Рис. 7.24

2. По графику и исходным значениям температур заполняется табл. 7.2.

7.2. Значения зависимости концентрации и константы скорости от времени и температуры

T, K	$t, \text{с}$	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
T_1	$c_1, \text{моль/л}$					
	$k_1, \text{л}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$					
T_2	$c_2, \text{моль/л}$					
	$k_2, \text{л}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$					

3. По формуле (7.6) вычисляются константы скорости k_m для всех температур T_m и времен t_n представленных в табл. 7.1.

4. Определяются средние значения константы скорости с указанием погрешности.

5. По формуле (7.11) определяется энергия активации химической реакции горения E .

6. Из формулы (7.9) вычисляется предэкспоненциальный множитель A по двум константам скорости.

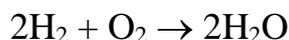
7. Определяется среднее значение предэкспоненциального множителя.

8. Определяется справочное значение параметров E и A .

9. Осуществить процедуру сравнения справочных и расчетных значений энергии активации E и предэкспоненциального множителя A .

Пример выполнения.

По заданным двум кинетическим кривым рис. 7.25, которые получены экспериментальным путем при двух температурах: $T_1 = 555$ К, $T_2 = 575$ К для реакции



с исходными концентрациями c_{01} и c_{02} , равными соответственно $1,91 \cdot 10^{-3}$ моль/л и $1,98 \cdot 10^{-3}$ моль/л, заполняем табл. 7.2.

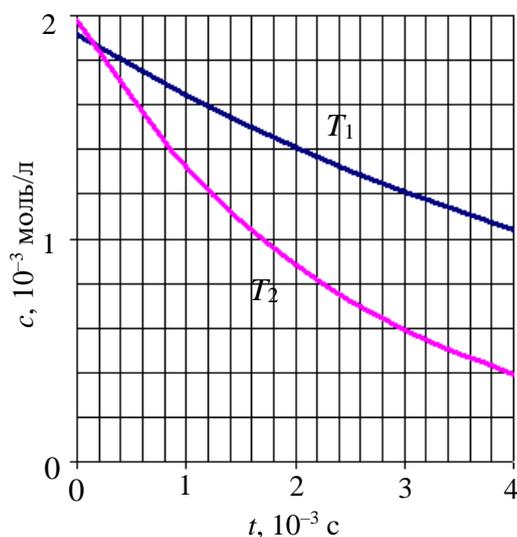


Рис. 7.25

7.3. Результаты расчета константы скорости

T, K	$t, 10^{-3} c$	0	1	2	3	4
555	$c_1, \text{моль/л}$	$1,91 \cdot 10^{-3}$	$1,64 \cdot 10^{-3}$	$1,41 \cdot 10^{-3}$	$1,21 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-3}$
	$k_1, \text{л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	–	152,41	151,76	152,16	151,97
575	$c_2, \text{моль/л}$	$1,98 \cdot 10^{-3}$	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$0,88 \cdot 10^{-3}$	$0,59 \cdot 10^{-3}$	$0,39 \cdot 10^{-3}$
	$k_2, \text{л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	–	405,47	405,47	403,58	406,18

Как видно из представленных расчетов табл. 7.3, константы скорости при температурах 555 и 574 К находятся в пределах ошибки эксперимента получились постоянными. Среднее значение констант скорости равно:

$$k_{555} = 152,07 \pm 0,34 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$k_{575} = 405,17 \pm 1,59 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}.$$

По формуле (7.11) определяется энергия активации процесса горения. Далее по формуле (7.9) вычисляется предэкспоненциальный множитель по формуле

$$E = \frac{8,314 \cdot 575 \cdot 555}{20} \cdot \ln \left(\frac{405,17}{152,07} \right) = 129\,936,9 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}};$$

$$\ln(A_1) = \ln(152,07) + \frac{129\,936,9}{555 \cdot 8,314} = 33,19;$$

$$A_1 = 2,616 \cdot 10^{14};$$

$$\ln(A_2) = \ln(405,17) + \frac{129\,936,9}{575 \cdot 8,314} = 33,19;$$

$$A_2 = 2,616 \cdot 10^{14}.$$

Среднее значение $A = 2,616 \cdot 10^{14}$.

По справочнику определяем параметры кинетики химической реакции окисления водорода. $E_{\text{справ}} = 129\,000 \text{ Дж/моль}$, $A_{\text{справ}} = 2,14 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$.

Определяем отклонение расчетных данных от справочных:

$$\Delta E = 129\,936,9 - 129\,000 = 936,9 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}};$$

$$\Delta A = 2,616 \cdot 10^{14} - 2,14 \cdot 10^{14} = 4,76 \cdot 10^{13} \frac{\text{Дж}}{\text{моль}};$$

$$\delta E = \frac{936,9}{129\,000} \cdot 100\% = 0,72\%;$$

$$\delta A = \frac{4,76 \cdot 10^{13}}{2,14 \cdot 10^{14}} \cdot 100\% = 22,2\%.$$

Контрольные вопросы

1. Назовите определение химической кинетики.
2. Что изучает химическая кинетика?
3. Формальная химическая кинетика.
4. Скорость химической реакции (определение).
5. Назовите факторы, которые влияют на скорость реакции.
6. Какую размерность имеет константа скорости?
7. Кинетическое уравнение химической реакции (определение).
8. Назовите факторы, которые влияют на константу скорости.
9. Методика определения порядка химической реакции.
10. Физический смысл константы порядка реакции.
11. Какие параметры необходимо найти экспериментальным путем для определения порядка реакции.
12. Последовательные реакции (определение).
13. Энергия активации химической реакции (определение).
14. Закономерность изменения концентрации от времени для химических реакций горения.

8. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАМЕНИ

В процессе горения в результате экзотермической химической реакции выделяемое тепло распределяется на нагрев продуктов сгорания и окружающей среды. В результате температуру, до которой нагревается область пламени, будем называть температурой горения. По степени учета различных условий температуру горения подразделяют на:

1. Теоретическую, в которой не учитываются различные потери энергии, но учитывается диссоциация продуктов горения, при этом коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1$.

2. Калориметрическую, в которой не учитываются различные потери энергии и диссоциация продуктов горения, при этом коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1$.

3. Адиабатическую, в которой не учитываются различные потери энергии и диссоциация продуктов горения, при этом коэффициент избытка воздуха $\alpha \neq 1$.

4. Действительную, в которой учитываются различные потери энергии, но не учитывается диссоциация продуктов горения, при этом коэффициент избытка воздуха $\alpha \neq 1$.

Вычисление теоретической температуры горения T_{Γ} осуществляется по следующему соотношению:

$$T_{\Gamma} = \frac{Q_{\text{п.г}}}{C_p V_{\text{п.г}}}, \quad (8.1)$$

где $Q_{\text{п.г}}$ – теплосодержание продуктов горения, кДж/кг; $V_{\text{п.г}}$ – объем продуктов горения, м³/кг; C_p – объемная теплоемкость смеси продуктов, определяемая при температуре, определяемой по формуле $T_{C_p} = \frac{(T_0 + T_{\Gamma})}{2}$, кДж/(м³·К).

В расчетах калориметрической температуры горения принимают допущение, которое исключает тепловые потери в окружающую среду. Кроме того,

теплосодержание продуктов горения определяется по низшей теплоте сгорания рассматриваемого типа топлива.

Реальная температура горения зависит от следующих факторов: состав топлива, концентрация продуктов горения, определяемая коэффициентом избытка воздуха α , начальная температура воздуха, полнота сгорания топлива, теплотери, определяемые коэффициентом теплотерь η . Таким образом, потери тепла $Q_{\text{п}}$ можно представить следующим соотношением:

$$Q_{\text{п}} = Q_{\text{и}} + Q_{\text{н}} + Q_{\text{д}}, \quad (8.2)$$

где $Q_{\text{и}}$ – энергия излучения; $Q_{\text{н}}$ – потенциальное тепло топлива, оставшееся в топливе в результате недожога; $Q_{\text{д}}$ – энергия, израсходованная на диссоциацию продуктов горения.

В зависимости от типа потерь рассчитывается соответственно теоретическая, адиабатическая, калориметрическая, действительная температуры горения.

Для расчета температуры горения топлива составляется следующее уравнение энергетического баланса:

$$Q_{\text{г}}(1 - \eta) = V_{\text{п.г}} C_p (T_{\text{г}} - T_0), \quad (8.3)$$

$Q_{\text{г}}$ – тепло, получаемое в результате горения топлива, кДж; η – коэффициент теплотерь; $V_{\text{п.г}}$ – объем продуктов сгорания, м³; C_p – средняя объемная теплоемкость продуктов горения при постоянном давлении, кДж/(м³·К); $T_{\text{г}}$ – температура горения, К; T_0 – начальная температура, К.

Приближенно температура горения определяется по соотношению (8.1). В этом случае средняя теплоемкость определяется для температуры 2000 К. Так как теплоемкость имеет функциональную зависимость от температуры, то для повышения точности расчетов температуры горения применяют итерационный подход, в котором средняя теплоемкость определяется исходя из температуры, рассчитанной на предыдущем шаге итерации.

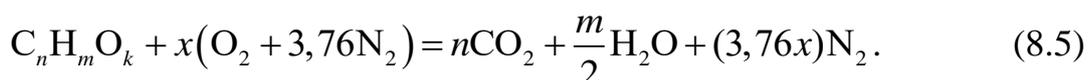
Порядок выполнения

1. Определяется суммарный объем продуктов горения и отдельно объем каждого компонента продуктов горения:

$$V_{п.г} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{SO_2} + \Delta V_{возд}, \quad (8.4)$$

где V_{CO_2} – объем углекислого газа; V_{H_2O} – объем паров воды; V_{N_2} – объем азота; V_{SO_2} – объем диоксида серы; $\Delta V_{возд}$ – объем избытка воздуха.

В зависимости от состава горючего составляются уравнения взаимодействия горючего и воздуха:



Из уравнения (8.5) определяем x по формуле

$$x = n + \frac{m}{2} - \frac{k}{2}. \quad (8.6)$$

Для однокомпонентного горючего количество продуктов сгорания, определяемое в молях, можно пересчитать в объем с учетом температуры продуктов сгорания. В случае если используется смесь различных горючих газов, то для каждого компонента смеси отдельно составляется уравнение взаимодействия с воздухом, а затем по известному соотношению компонентов смеси определяется конечный объем продуктов сгорания.

2. Рассчитывается низшая теплота сгорания вещества.

Для жидких и твердых топлив низшую теплоту сгорания можно определить по формуле Д. И. Менделеева

$$Q_H = 339,4\omega_C + 1257\omega_H - 108,9(\omega_O + \omega_N - \omega_S) - 25,1(9\omega_H + \omega_W), \quad (8.6)$$

где ω_C – массовая доля углерода; ω_H – массовая доля водорода; ω_O – массовая доля кислорода; ω_N – массовая доля азота; ω_S – массовая доля серы; ω_W – массовая доля паров воды, %.

В случае расчета горения газообразных топлив используется следующая формула:

$$Q_H = \sum_i^s Q_{ни} \cdot \frac{\varphi_i}{100}, \quad (8.7)$$

где φ_i – объемная доля i -го компонента смеси газов; s – количество компонентов в смеси; $Q_{ни}$ – низшая теплота сгорания i -го компонента смеси газов.

В качестве примера рассмотрим смесь газов, состоящую из оксида углерода, водорода, метана, этилена, этана, пропана, бутана, пентана, сероводорода. Тогда формула (8.7) приобретет следующий вид:

$$Q_n = 126,5 \cdot \varphi_{CO} + 107,7 \cdot \varphi_{H_2} + 358,2 \cdot \varphi_{CH_4} + 590,8 \cdot \varphi_{C_2H_4} + \\ + 636,9 \cdot \varphi_{C_2H_6} + 913,4 \cdot \varphi_{C_3H_8} + 1185,8 \cdot \varphi_{C_4H_{10}} + 1462,3 \cdot \varphi_{C_5H_{12}} + 234,6 \cdot \varphi_{H_2S},$$

где φ_{CO} – объемная доля оксида углерода; φ_{H_2} – объемная доля водорода; φ_{CH_4} – объемная доля метана; $\varphi_{C_2H_4}$ – объемная доля этилена; $\varphi_{C_2H_6}$ – объемная доля этана; $\varphi_{C_3H_8}$ – объемная доля пропана; $\varphi_{C_4H_{10}}$ – объемная доля бутана; $\varphi_{C_5H_{12}}$ – объемная доля пентана; φ_{H_2S} – объемная доля сероводорода. Получаемая размерность низшей теплоты сгорания кДж/м³.

3. Определяется количество тепла $Q_{п.г}$, которое пошло на повышение температуры продуктов сгорания в условиях теплопотерь в процессе горения:

$$Q_{п.г} = Q_n \cdot (1 - \eta). \quad (8.8)$$

Размерность в формуле (8.8) в зависимости от размерности низшей теплоты сгорания Q_n может быть кДж/кг или кДж/м³.

4. Определяем среднее теплосодержание продуктов горения $Q_{ср}$. Этот параметр можно определить в условиях отсутствия теплопотерь η по формуле

$$Q_{ср} = \frac{Q_n}{V_{п.г}}. \quad (8.9)$$

В случае наличия теплопотерь формула (8.10) приобретает вид:

$$Q_{ср} = \frac{Q_{п.г}}{V_{п.г}}. \quad (8.10)$$

5. Температура горения определяется по среднему значению теплосодержания продуктов горения $Q_{ср}$. Для этого по табл. 8.1 в соответствии с $Q_{ср}$, которое численно равно энтальпии соответствующих компонентов, приближенно определяем температуру горения.

8.1. Энтальпия компонентов продуктов сгорания и топлива

Температура, °С	CO ₂ , кДж м ³	N ₂ , кДж м ³	O ₂ , кДж м ³	CO, кДж м ³	CH ₄ , кДж м ³	H ₂ , кДж м ³	H ₂ O (водяные пары), кДж м ³	Воздух	
								сухой, кДж м ³	влажный на 1 м ³ сухого газа, кДж м ³
100	171,86	129,91	132,09	130,62	165,90	129,78	151,03	130,45	132,85
200	360,36	260,90	267,96	262,92	354,48	260,40	305,34	262,84	267,20
300	563,10	393,36	408,24	396,90	569,52	391,86	464,19	396,51	403,95
400	794,32	528,52	552,88	534,24	811,44	524,16	628,16	533,40	543,48
500	1001,50	666,35	701,20	674,10	1075,20	655,20	797,15	673,45	689,35
600	1233,54	807,18	853,02	819,00	1365,84	788,76	971,70	816,72	832,38
700	1472,38	951,09	948,43	964,32	1672,86	923,16	1152,48	962,85	981,40
800	1716,96	1097,36	1163,92	1115,52	2002,56	1058,40	1338,96	1111,12	1132,64
900	1967,13	1247,13	1322,28	1266,30	2343,60	1198,26	1530,90	1261,80	1286,37
1000	2221,00	1396,50	1482,20	1419,60	2704,80	1335,60	1728,30	1414,10	1441,90
1100	2477,75	1549,57	1639,22	1575,42	3072,30	1473,78	1931,16	1568,93	1599,95
1200	2738,28	1703,52	1807,56	1733,76	3457,44	1617,84	2139,00	1724,64	1758,96
1300	3000,27	1859,65	1970,02	1889,16	–	1763,58	2351,05	1882,66	1920,23
1400	3265,22	2016,84	2135,00	2052,12	–	1911,00	2567,74	2041,48	2082,64
1500	3531,75	2175,45	2301,45	2211,30	–	2072,70	2787,75	2201,25	2245,95
1600	3800,16	2333,92	2468,32	–	–	–	3011,84	2362,08	2410,40
1700	4070,48	2494,07	2636,87	–	–	–	3239,35	2523,31	2575,33
1800	4342,50	2654,28	2806,20	–	–	–	3470,04	2685,24	2740,50
1900	4614,91	2816,18	2976,54	–	–	–	3742,62	2848,86	2907,95
2000	4898,80	2977,80	3147,40	3015,60	–	–	3938,80	3075,20	3075,20
2100	5164,11	3139,92	3319,89	–	–	–	4177,11	–	–
2200	5439,50	3302,42	3507,46	–	–	–	4455,44	–	–
2300	5717,80	3466,10	3666,89	–	–	–	4657,96	–	–
2400	5994,48	3639,84	3840,48	–	–	–	4893,36	–	–
2500	6272,75	3793,75	4011,25	–	–	–	5148,25	–	–

Аппроксимацию зависимости температуры от энтальпии для диоксида углерода, азота и водяного пара можно представить в виде линейных уравнений:

$$T_{\text{CO}_2} = \frac{Q_{\text{cp}} + 279,42}{2,579}; \quad (8.11)$$

$$T_{\text{N}_2} = \frac{Q_{\text{cp}} + 105,44}{1,5396}; \quad (8.12)$$

$$T_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{Q_{\text{cp}} + 273,31}{2,105}. \quad (8.13)$$

Более точно можно аппроксимировать квадратичной зависимостью (рис. 8.1).

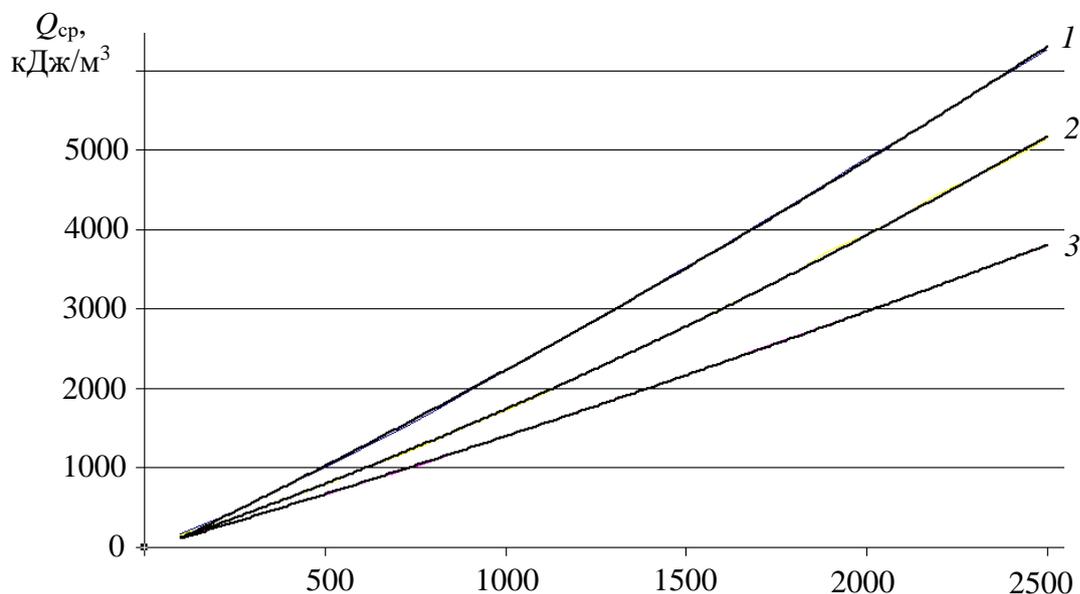


Рис. 8.1. Аппроксимация зависимости температуры от энтальпии:

$$1 - Q_{\text{cp}} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot T_r^2 + 2,1861 \cdot T_r - 102,62 \text{ (диоксид углерода);}$$

$$2 - Q_{\text{cp}} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot T_r^2 + 1,5641 \cdot T_r - 29,91 \text{ (водяной пар);}$$

$$3 - Q_{\text{cp}} = 7 \cdot 10^{-5} \cdot T_r^2 + 1,3517 \cdot T_r - 20,879 \text{ (азот)}$$

Для нахождения температуры необходимо решить соответствующее квадратное уравнение.

В соответствии с объемным содержанием компонентов продуктов сгорания определяем температуру пламени для каждого компонента и далее по формуле определяем итоговую температуру горения:

$$T_{\Gamma} = \sum_i^s T_{\Gamma i} \cdot \frac{\varphi_i}{100}, \quad (8.14)$$

где $T_{\Gamma i}$ – температура i -го газа.

В случае учета потерь тепла температура горения будет действительной, в обратном случае – адиабатической.

8.2. Варианты заданий для практической работы № 8

№ варианта	φ_{CH_4}	$\varphi_{\text{C}_2\text{H}_4}$	$\varphi_{\text{C}_2\text{H}_6}$	$\varphi_{\text{C}_3\text{H}_8}$	$\varphi_{\text{C}_4\text{H}_{10}}$	$\varphi_{\text{C}_5\text{H}_{12}}$	φ_{CO}	η
1	66,1	19,2	5,6	2,0	3,9	0,2	3,0	0,06
2	72,5	17,3	0,5	1,4	2,3	1,4	4,6	0,07
3	72,1	11,8	3,9	1,9	2,3	3,2	4,7	0,08
4	77,6	10,7	2,3	1,7	1,2	3,2	3,3	0,09
5	72,7	17,3	2,5	1,1	3,1	0,5	2,7	0,10
6	78,3	8,0	0,9	3,8	0,9	4,6	3,6	0,11
7	86,3	1,6	1,1	3,5	0,6	3,5	3,4	0,12
8	70,5	13,6	4,3	3,3	0,8	3,8	3,7	0,13
9	72,2	16,2	1,4	2,2	3,2	1,0	3,9	0,14
10	75,8	13,0	3,6	2,0	3,9	1,0	0,7	0,15
11	68,9	14,5	4,0	2,1	3,8	2,9	3,8	0,16
12	59,0	19,3	5,6	3,1	4,9	4,2	3,7	0,17
13	83,1	1,3	5,2	2,5	3,4	2,5	2,1	0,18
14	81,7	6,1	5,9	1,1	4,2	0,3	0,8	0,19
15	79,4	5,9	1,0	4,1	4,8	1,2	3,7	0,20
16	64,5	19,0	3,6	4,0	2,4	4,8	1,6	0,21
17	75,7	13,9	1,3	3,0	0,9	2,5	2,6	0,22
18	70,6	14,0	0,7	4,1	3,5	3,1	4,2	0,23
19	71,9	13,7	1,5	4,6	2,5	5,0	0,8	0,24
20	65,2	14,3	9,5	1,8	4,1	2,5	2,7	0,25
21	78,8	1,9	6,3	3,4	4,5	1,4	3,7	0,04
22	74,8	11,7	2,8	4,4	2,5	0,6	3,2	0,03
23	77,0	9,1	6,9	0,7	1,8	3,9	0,6	0,02
24	77,4	16,5	1,1	0,3	0,2	1,6	2,9	0,06

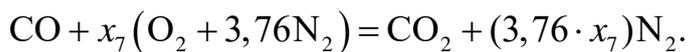
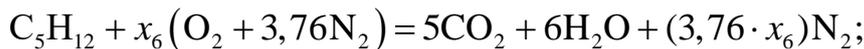
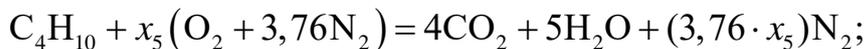
Цель работы: получить навыки расчета температуры пламени, которая формируется в результате горения различного вида топлива.

Пример выполнения

Исходные данные: $\varphi_{\text{CH}_4} = 60\%$, $\varphi_{\text{C}_2\text{H}_4} = 16,5\%$, $\varphi_{\text{C}_2\text{H}_6} = 9,8\%$, $\varphi_{\text{C}_3\text{H}_8} = 3,1\%$,
 $\varphi_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 6,8\%$, $\varphi_{\text{C}_5\text{H}_{12}} = 2,6\%$, $\varphi_{\text{CO}} = 1,2\%$.

Задание. Определить температуру горения для трех вариантов расчета: с использованием табл. 8.1, линейной аппроксимации (8.11) – (8.13), аппроксимации квадратичной функцией (рис. 8.1).

1. Для каждого компонента газовой смеси составляем уравнение взаимодействия с воздухом:



Найдем значения x_i :

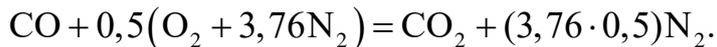
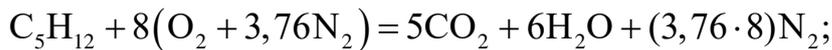
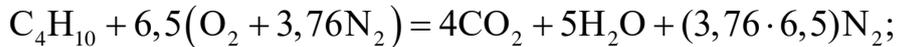
$$x_1 = 1 + \frac{4}{4} = 2, \quad x_2 = 2 + \frac{4}{4} = 3, \quad x_3 = 2 + \frac{6}{4} = 3,5,$$

$$x_4 = 3 + \frac{8}{4} = 5, \quad x_5 = 4 + \frac{10}{4} = 6,5, \quad x_6 = 5 + \frac{12}{4} = 8,$$

$$x_7 = 1 - \frac{1}{2} = 0,5,$$

где индекс $i = 1$ соответствует компоненту CH_4 , $i = 2$ соответствует компоненту C_2H_4 , $i = 3$ соответствует компоненту C_2H_6 , $i = 4$ соответствует компоненту C_3H_8 , $i = 5$ соответствует компоненту C_4H_{10} , $i = 6$ соответствует компоненту C_5H_{12} , $i = 7$ соответствует компоненту CO .

Тогда уравнения приобретут вид:



Определяем общее количество молей компонентов продуктов сгорания на один моль каждого компонента топлива.

$$n_{ob1} = 1 + 2 + 3,76 \cdot 2 = 10,52, \quad n_{1\text{CO}_2} = 1, \quad n_{1\text{H}_2\text{O}} = 2, \quad n_{1\text{N}_2} = 7,52;$$

$$n_{ob2} = 2 + 2 + 3,76 \cdot 3 = 15,28, \quad n_{2\text{CO}_2} = 2, \quad n_{2\text{H}_2\text{O}} = 2, \quad n_{2\text{N}_2} = 11,28;$$

$$n_{ob3} = 2 + 3 + 3,76 \cdot 3,5 = 18,16, \quad n_{3\text{CO}_2} = 2, \quad n_{3\text{H}_2\text{O}} = 3, \quad n_{3\text{N}_2} = 13,16;$$

$$n_{ob4} = 3 + 4 + 3,76 \cdot 5 = 25,8, \quad n_{4\text{CO}_2} = 3, \quad n_{4\text{H}_2\text{O}} = 4, \quad n_{4\text{N}_2} = 18,8'$$

$$n_{ob5} = 4 + 5 + 3,76 \cdot 6,5 = 33,44, \quad n_{5\text{CO}_2} = 4, \quad n_{5\text{H}_2\text{O}} = 5, \quad n_{5\text{N}_2} = 24,44;$$

$$n_{ob6} = 5 + 6 + 3,76 \cdot 8 = 41,08, \quad n_{6\text{CO}_2} = 5, \quad n_{6\text{H}_2\text{O}} = 6, \quad n_{6\text{N}_2} = 30,08;$$

$$n_{ob7} = 1 + 3,76 \cdot 0,5 = 2,88, \quad n_{7\text{CO}_2} = 1, \quad n_{7\text{N}_2} = 1,88.$$

Определяем объемную долю каждого компонента:

$$\varphi_{1\text{CO}_2} = \frac{1}{10,52} \cdot 100\% = 9,5\%; \quad \varphi_{1\text{H}_2\text{O}} = \frac{2}{10,52} \cdot 100\% = 19\%; \quad \varphi_{1\text{N}_2} = \frac{7,52}{10,52} \cdot 100\% = 71,5\%;$$

$$\varphi_{2\text{CO}_2} = \frac{2}{15,28} \cdot 100\% = 13,1\%; \quad \varphi_{2\text{H}_2\text{O}} = \frac{2}{15,28} \cdot 100\% = 13,1\%; \quad \varphi_{2\text{N}_2} = \frac{11,28}{15,28} \cdot 100\% = 73,8\%;$$

$$\varphi_{3\text{CO}_2} = 11\%; \quad \varphi_{3\text{H}_2\text{O}} = 16,5\%; \quad \varphi_{3\text{N}_2} = 72,5\%;$$

$$\varphi_{4\text{CO}_2} = 11,6\%; \quad \varphi_{4\text{H}_2\text{O}} = 15,5\%; \quad \varphi_{4\text{N}_2} = 72,9\%;$$

$$\varphi_{5\text{CO}_2} = 12\%; \quad \varphi_{5\text{H}_2\text{O}} = 15\%; \quad \varphi_{5\text{N}_2} = 73\%;$$

$$\varphi_{6\text{CO}_2} = 12,2\%; \quad \varphi_{6\text{H}_2\text{O}} = 14,6\%; \quad \varphi_{6\text{N}_2} = 73,2\%;$$

$$\varphi_{7\text{CO}_2} = 34,7\%; \quad \varphi_{7\text{N}_2} = 65,3\%.$$

Определяем среднюю объемную долю для каждого компонента продуктов сгорания:

$$\varphi_{\text{CO}_2} = \sum_{i=1}^7 \frac{\varphi_{i\text{CO}_2} \varphi_i}{100} = \frac{9,5 \cdot 60}{100} + \frac{13,1 \cdot 16,5}{100} + \frac{11 \cdot 9,8}{100} + \frac{11,6 \cdot 3,1}{100} + \frac{12 \cdot 6,8}{100} + \frac{12,2 \cdot 2,6}{100} + \frac{34,7 \cdot 1,2}{100} = 10,85\%;$$

$$\varphi_{\text{H}_2\text{O}} = \sum_{i=1}^7 \frac{\varphi_{i\text{H}_2\text{O}} \varphi_i}{100} = \frac{19 \cdot 60}{100} + \frac{13,1 \cdot 16,5}{100} + \frac{16,5 \cdot 9,8}{100} + \frac{15,5 \cdot 3,1}{100} + \frac{15 \cdot 6,8}{100} + \frac{14,6 \cdot 2,6}{100} = 17,06\%;$$

$$\varphi_{\text{N}_2} = \sum_{i=1}^7 \frac{\varphi_{i\text{N}_2} \varphi_i}{100} = \frac{71,5 \cdot 60}{100} + \frac{73,8 \cdot 16,5}{100} + \frac{72,5 \cdot 9,8}{100} + \frac{72,9 \cdot 3,1}{100} + \frac{73 \cdot 6,8}{100} + \frac{73,2 \cdot 2,6}{100} + \frac{65,3 \cdot 1,2}{100} = 72,09\%.$$

Произведем проверку расчетов.

$$\varphi_{\text{CO}_2} + \varphi_{\text{H}_2\text{O}} + \varphi_{\text{N}_2} = 100\%;$$

$$10,85\% + 17,06\% + 72,09\% = 100\%.$$

Так как сумма всех компонентов равна 100%, то расчеты выполнены правильно.

Проведем расчет объема компонентов продуктов сгорания исходя из одного моля исходного вещества. Так как смесь состоит из семи компонентов, то расчет ведем для каждого и вычисляем среднее:

$$n_{\text{CO}_2} = \frac{1+2+2+3+4+5+1}{7} = 2,57 \text{ моль};$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{2+2+3+4+5+6}{7} = 3,14 \text{ моль};$$

$$n_{\text{N}_2} = \frac{7,52+11,28+13,16+18,8+24,44+30,08+1,88}{7} = 15,31 \text{ моль};$$

$$N_{\text{п.г}} = 2,57 + 3,14 + 15,31 = 21,02 \text{ моль(п.г)/моль(топлива)}.$$

2. Определяем низшую теплоту сгорания заданного вещества. Так как вещество имеет газообразный вид, то воспользуемся формулой (8.7):

$$Q_{\text{н}} = 358,2 \cdot 60 + 590,8 \cdot 16,5 + 636,9 \cdot 9,8 + 913,4 \cdot 3,1 + 1185,8 \cdot 6,8 + 1462,3 \cdot 2,6 + 126,5 \cdot 1,2 = 52\,330,58 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

3. Рассчитываем количество тепла, которое пошло на повышение температуры продуктов сгорания с учетом потерь:

$$Q_{п.г} = 52\,330,58 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \cdot (1 - 0,15) = 44\,481 \text{ кДж}.$$

Так как объем продуктов сгорания посчитан на 1 моль топлива, то при расчете среднего теплосодержания необходимо пересчитать также на 1 моль.

Определяем среднее теплосодержание продуктов горения $Q_{\text{ср}}$ на 1 моль топлива:

$$Q_{\text{ср}} = \frac{44\,481 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}}{21,02 \frac{\text{моль(п.г)}}{\text{моль(топлива)}}} = 2116,13 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

4. Далее определяем температуру горения для каждого компонента продуктов сгорания. На этом этапе необходимо определить температуру по табл. 8.1, формулам (8.11) – (8.13), линейной аппроксимации зависимости табл. 8.1 и квадратичной аппроксимации зависимости энтальпии от температуры диоксида углерода, водяного пара и азота.

Так как точное значение среднего теплосодержания продуктов сгорания в табл. 8.1 отсутствует, то температуру будем определять по формуле

$$T_{\text{Гр}} = T_1 + \frac{Q_{\text{ср}} - Q_1}{Q_2 - Q_1} (T_2 - T_1),$$

где T_1 – начальная температура интервала температур, в котором располагается значение среднего теплосодержания продуктов сгорания; T_2 – конечная температура интервала температур, в котором располагается значение среднего теплосодержания продуктов сгорания; Q_1 – начальное значение энтальпии в интервале температур T_1, T_2 ; Q_2 – конечное значение энтальпии в интервале температур T_1, T_2 .

Для нашего варианта температура горения по табл. 8.1 будет иметь следующее значение:

$$T_{\text{ГрCO}_2} = 900 \text{ }^\circ\text{C} + \frac{2116,13 - 1967,13}{2221,00 - 1967,13} \cdot (1000 \text{ }^\circ\text{C} - 900 \text{ }^\circ\text{C}) = 958,69 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$T_{\text{ГрN}_2} = 1400 \text{ }^\circ\text{C} + \frac{2116,13 - 2016,84}{2175,45 - 2016,84} \cdot (1500 \text{ }^\circ\text{C} - 1400 \text{ }^\circ\text{C}) = 1462,6 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$T_{\text{ТН}_2\text{О}} = 1100 \text{ °C} + \frac{2116,13 - 1931,16}{2139 - 1931,16} \cdot (1100 \text{ °C} - 1200 \text{ °C}) = 1188,99 \text{ °C}.$$

Тогда средняя температура горения $T_{\text{Т}}$ будет равна

$$T_{\text{Т}} = 958,69 \cdot 0,1085 + 1462,6 \cdot 0,7209 + 1188,99 \cdot 0,1706 = 1361,25 \text{ °C}.$$

Определим температуру горения в результате аппроксимаций табличных значений

$$T_{\text{ТaCO}_2} = \frac{2116,13 + 279,42}{2,579} = 928,87 \text{ °C};$$

$$T_{\text{ТaN}_2} = \frac{2116,13 + 105,44}{1,5396} = 1442,95 \text{ °C};$$

$$T_{\text{ТaH}_2\text{О}} = \frac{2116,13 + 273,31}{2,105} = 1135,13 \text{ °C};$$

$$T_{\text{Тa}} = 928,87 \cdot 0,1085 + 1442,95 \cdot 0,7209 + 1135,13 \cdot 0,1706 = 1334,66 \text{ °C}.$$

Линейная аппроксимация данных табл. 8.1 в заданном интервале температур показывает заниженные значения температуры горения на 30 °C. Наиболее точное значение температуры получается в результате квадратичной аппроксимации данных табл. 8.1, рис. 8.1.

Контрольные вопросы

1. Уравнение материального и теплового баланса (определение, примеры).
2. Теплота сгорания (определение, разновидность размерностей представления).
3. Низшая теплота сгорания горючих веществ (определение).
4. Высшая теплота сгорания горючих веществ (определение).
5. Методы расчета теплоты сгорания горючих веществ и смесей.
6. Формула Д. И. Менделеева для расчета низшей теплоты сгорания.
7. Формула Д. И. Менделеева для расчета высшей теплоты сгорания.
8. Метод расчета теоретического расхода воздуха на горение.
9. Коэффициент избытка воздуха (определение, применение).
10. Метод расчета количества продуктов сгорания для различных топлив и их смесей.
11. Продукты сгорания, свойства, состав.
12. Метод расчета температуры горения.

9. РАСЧЕТ ЭНЕРГИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАМЕНИ

Основным механизмом передачи энергии от пламени во внешнюю среду является излучение электромагнитных волн с длиной волны от дальнего инфракрасного излучения до ультрафиолетового. Излучение возникает в результате перехода электронов с энергетических уровней, соответствующих возбужденному состоянию молекул или атомов, на уровни с меньшей энергией. Соотношение, устанавливающее связь между энергиями двух уровней, имеет вид

$$E^* = E + h\nu,$$

где E^* – энергия возбужденного состояния атома или молекулы; E – энергия уровня, на который происходит переход электрона; h – постоянная Планка; ν – частота электромагнитного излучения.

Таким образом, энергия одного кванта с частотой ν определяется по соотношению $E_k = h\nu$. В пламени распределение квантов по частоте можно определить по соотношению, который предложил Планк:

$$u_\lambda(\lambda, T) = \frac{8 \cdot \pi \cdot h \cdot c}{\lambda^5 \cdot \left(\exp\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right)}, \quad (9.1)$$

где T – температура абсолютно черного тела; c – скорость света в вакууме; λ – длина волны узкого интервала частот излучения; h – постоянная Планка; k – постоянная Больцмана.

По типу распределения интенсивности излучения, в зависимости от длины волны, в спектре различают три типа: со сплошным спектром, с линейчатым спектром, со смешанным спектром.

Диапазон длин волн излучения пламени составляет от 0,1 до 100,0 мкм. Излучение пламени изучается как приближение к излучению идеального черного тела. Такое тело является не только идеальным поглотителем, но и идеальным излучателем. Для идеального черного тела эти параметры равны единице.

Интегральная величина мощности излучения определяется законом Стефана–Больцмана

$$j = \frac{2 \cdot \pi^5 \cdot k^4 \cdot T^4}{15 \cdot c^2 \cdot h^3} = \sigma \cdot T^4, \quad (9.2)$$

где σ – постоянная Стефана–Больцмана.

Так как размерность интегральной величины j является Вт/м², то для нахождения энергии излучения необходимо найти площадь поверхности.

Для газообразных типов топлив диффузионные пламена возникают только в неперемешанном состоянии. Форма такого типа пламени описывается уравнением Дуфа

$$\begin{aligned} \bar{h} &= 1 - \bar{r} + \bar{r}^2 \cdot \ln(r^2), \\ \bar{h} &= \frac{h}{H}, \\ \bar{r} &= \frac{r}{R}, \end{aligned} \quad (9.3)$$

где H – максимальная высота пламени; R – максимальный радиус пламени; h – расстояние от поверхности пламени до его основания; r – расстояние от поверхности пламени до его оси.

Для определения максимальной высоты пламени применяется следующая формула:

$$H = \frac{\rho \cdot \beta \cdot u \cdot R^2}{4D \cdot C_{O_2}}, \quad (9.4)$$

где u – линейная скорость горения материала; R – радиус горелки; C_{O_2} – концентрация кислорода в объемных долях; β – стехиометрический коэффициент, ρ – плотность горючего газа; D – коэффициент диффузии кислорода (для нормальных условий можно принять $1,22 \cdot 10^{-5}$ м²/с).

Так как в результате расчета (график функции рис. 9.1) имеет практически линейный вид, то вращение вокруг оси Oh мы получим конус с основанием радиусом, практически равным R .

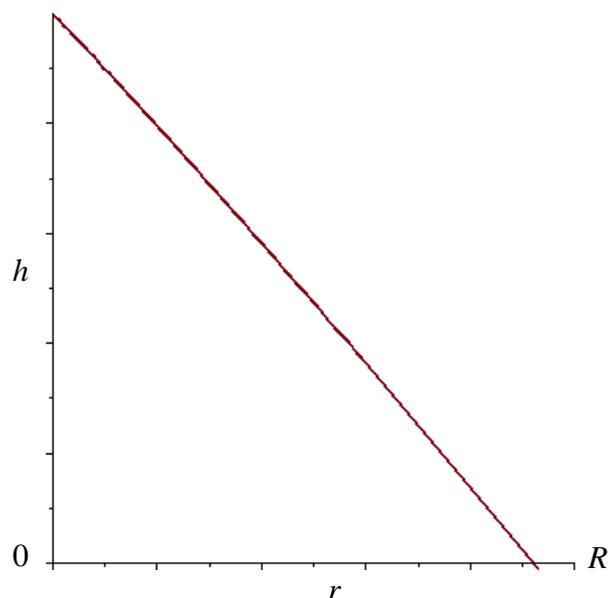


Рис. 9.1. График зависимости высоты границы пламени от расстояния до центра

Для более точного определения радиуса основания можно объединить, уравнения (9.3) и (9.4) решить относительно r , приравняв h нулю. В результате получится более точное значение, которое будет отличаться от радиуса горелки не более чем на 8%. Еще более точное значение можно найти, применив формулу площади поверхности фигуры, образуемой в результате вращения графика функции вокруг оси Ox [Зорич, В. А. Математический анализ : учебник для студентов математических и физико-математических факультетов и специальностей высших учебных заведений / В. А. Зорич ; В. А. Зорич. – 6-е изд., доп. – Москва : Изд-во МЦНМО, 2012. – 700 с.]:

$$S = 2\pi \int_{t_1}^{t_2} y(t) \sqrt{(x'(t))^2 + (y(t))^2} dt. \quad (9.5)$$

В нашем случае вращение должно проходить вокруг оси Oy и в соответствии с формулой (9.3) $t = y = h$, $x = r$ $t_1 = 0$, $t_2 = H$ получим уравнение для расчета значения площади:

$$S = 2\pi \int_0^H r(h) \sqrt{(r'(h))^2 + 1} dh. \quad (9.6)$$

Единственная трудность при вычислении площади по формуле (9.6) является выделение функции $r(h)$ из уравнений (9.3), (9.4). С применением пакетов математических программ, например Maple или Matlab, данное преобразование возможно получить в явном виде, однако представление в данном учебном пособии полученных уравнений не имеет смысла, так как результат преобразований получается в виде специализированных математических функций объемом в несколько страниц.

Для определения энергии излучения при расчете на 1 моль вещества необходимо интегральную величину мощности излучения умножить на площадь поверхности пламени S и время соответствующего процесса t :

$$Q_{\text{изл}} = jSt. \quad (9.7)$$

Время горения 1 моля топлива можно определить из следующего соотношения:

$$t = \frac{V_T}{Su}, \quad (9.8)$$

где V_T – объем одного моля топлива.

Объединяя уравнения (9.2), (9.7), (9.8), получим

$$Q_{\text{изл}} = \frac{\sigma T^4 V_T}{u}. \quad (9.9)$$

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 9

Цель работы: получить навыки расчета спектрального распределения энергии излучения пламени, определить зависимости интегральной плотности излучения от температуры.

Порядок выполнения

1. В соответствии с вариантом задания из практической работы № 8 и результатами расчетов записать исходные данные: температура горения, состав топлива, радиус отверстия горелки (табл. 9.1).

9.1. Варианты заданий для практической работы № 9

№ варианта	Радиус горелки R, м	№ варианта	Радиус горелки R, м	№ варианта	Радиус горелки R, м
1	0,005	9	0,013	17	0,021
2	0,006	10	0,014	18	0,022
3	0,007	11	0,015	19	0,023
4	0,008	12	0,016	20	0,024
5	0,009	13	0,017	21	0,025
6	0,01	14	0,018	22	0,026
7	0,011	15	0,019	23	0,027
8	0,012	16	0,020	24	0,028

2. Определяем стехиометрический коэффициент β по соответствующим реакциям горения горючей смеси (8.5). В нашем случае стехиометрический коэффициент β можно определить по формуле

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^m \varphi_i x_i}{1 + \sum_{i=1}^m \varphi_i x_i}, \quad (9.10)$$

где x_i – параметр в химической реакции окисления топлива (8.5).

3. Из таблицы 9.2 определяем скорости горения каждого компонента топлива и далее определяем среднюю скорость.

9.2. Линейные скорости горения углеводородов

Горючее	Метан	Этилен	Этан	Пропан	Бутан	Пентан	СО
Линейная скорость u , м/с	0,39	0,79	0,46	0,45	0,44	0,45	0,45

4. Рассчитываем среднюю плотность горючего газа в соответствии с составом варианта задания.

5. Вычисляем коэффициент диффузии кислорода

$$D = \sqrt{\frac{3kTN_A}{M_{O_2}}} \sqrt[3]{\frac{kT}{p}} \frac{\ln(0,5)}{\ln \left(1 - \frac{\pi d_{O_2}^2}{4 \sqrt[3]{\left(\frac{kT}{p}\right)^2}} \right)}, \quad (9.11)$$

где k – постоянная Больцмана; M_{O_2} – молярная масса кислорода; N_A – число Авогадро; T – температура горения; p – давление; $d_{O_2}^2$ – диаметр молекулы кислорода.

6. Определяем по формуле (9.4) максимальную высоту пламени H .

7. Определяется площадь поверхности пламени. В случае отсутствия автоматизированных вычислительных возможностей, которые позволяют точно рассчитать площадь по формуле (9.6), расчет ведется приближенным методом. Форма пламени приводится к конусу с основанием R и высотой H .

8. Рассчитывается энергия излучения, которое формируется в результате сжигания 1 моля топливного газа.

9. Определяется общее количество энергии, которое выделяется в результате сжигания 1 моль топливного газа.

10. Вычисляется доля энергии излучения в %.

Пример выполнения

1. Выбираем состав топлива в соответствии с вариантом из практической работы № 8: $\varphi_{CH_4} = 60\%$, $\varphi_{C_2H_4} = 16,5\%$, $\varphi_{C_2H_6} = 9,8\%$, $\varphi_{C_3H_8} = 3,1\%$, $\varphi_{C_4H_{10}} = 6,8\%$, $\varphi_{C_5H_{12}} = 2,6\%$, $\varphi_{CO} = 1,2\%$. Температура горения в результате выполнения расчетов была определена для заданного состава $1361,25$ °С. Радиус отверстия горелки выбираем в соответствии с вариантом из табл. 9.1. В нашем случае $0,03$ м.

2. Сведем в табл. 9.3 стехиометрические коэффициенты и скорости горения и плотности газа.

Таблица 9.3

Компонент топлива	Метан	Этилен	Этан	Пропан	Бутан	Пентан	СО
φ , %	60	16,5	9,8	3,1	6,8	2,6	1,2
β	2	3	3,5	5	6,5	8	0,5
u , м/с	0,39	0,79	0,46	0,45	0,44	0,45	0,45
ρ , кг/м ³	0,717	1,26	1,264	1,882	2,5	3,457	1,25
$\frac{\varphi\beta}{100}$	1,2	0,495	0,343	0,155	0,442	0,208	0,006

Определяем стехиометрический коэффициент β :

$$\beta = \frac{60 \cdot 2 + 16,5 \cdot 3 + 9,8 \cdot 3,5 + 3,1 \cdot 5 + 6,8 \cdot 6,5 + 2,6 \cdot 8 + 1,2 \cdot 0,5}{100 - 60 \cdot 2 - 16,5 \cdot 3 - 9,8 \cdot 3,5 - 3,1 \cdot 5 - 6,8 \cdot 6,5 - 2,6 \cdot 8 - 1,2 \cdot 0,5} = 0,74.$$

3. Определяем среднюю линейную скорость горения топлива:

$$u_{\text{ср}} = 0,4704 \text{ м/с.}$$

4. Определяем среднюю плотность из справочника коэффициент диффузии и концентрацию кислорода в размерности

$$\rho_{\text{ср}} = 1,095 \text{ кг/м}^3.$$

5. Вычисляем коэффициент диффузии кислорода по формуле (9.11):

$$D = \sqrt{\frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1634 \cdot 6,23 \cdot 10^{23}}{0,032}} \sqrt[3]{\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1634}{101325}} \times \frac{\ln(0,5)}{\ln \left[1 - \frac{\pi (3,15 \cdot 10^{-10})^2}{4 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1634}{101325} \right)^2}} \right]} = 7,42 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}.$$

6. Вычисляем максимальную высоту пламени:

$$H = \frac{\rho \cdot \beta \cdot u \cdot R^2}{4 \cdot D \cdot C_{\text{O}_2}} = \frac{1,095 \cdot 0,74 \cdot 0,4704 \cdot 0,03^2}{4 \cdot 7,42 \cdot 10^{-4} \cdot 0,28} = 0,4124 \text{ м.}$$

7. Определяем площадь поверхности пламени. Примем допущение, что пламя имеет форму конуса с радиусом основания R и высотой H . Тогда площадь будем определять по формуле

$$S_{\text{пл}} = \pi \cdot R \cdot \sqrt{R^2 + H^2} = 3,14 \cdot 0,03 \cdot \sqrt{0,03^2 + 0,4124^2} = 0,0389 \text{ м}^2.$$

8. Рассчитываем энергию излучения, которое формируется в результате сжигания 1 моля топливного газа:

$$Q_{\text{изл}} = \frac{\sigma \cdot T^4 \cdot S^2 \cdot u}{V_T} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 1361,25^4 \cdot 0,0224}{0,4704} = 9271 \text{ Дж.}$$

9. Определяем общее количество энергии, которое выделяется в результате сжигания 1 моль топливного газа. Для этого по справочникам определяем удельную теплоту сгорания одного моля каждого компонента топлива (табл. 9.4).

Таблица 9.4

Компонент топлива	Метан	Этилен	Этан	Пропан	Бутан	Пентан	СО
$\varphi, \%$	60	16,5	9,8	3,1	6,8	2,6	1,2
$q, \text{кДж/м}^3$	35 820	58 690	63 751	91 256	118 651	146 200	126 360
$q\varphi/100$	21 492	9683	6247	2828	8068	3801	151

$$q_{\text{т.г}} = 52\,273 \text{кДж/м}^3.$$

Определим теплоту сгорания 1 моля топливного газа:

$$Q_{\text{т.г}} = 52273 \cdot 0,0224 = 1171 \text{кДж}.$$

10. Вычисляем долю энергии излучения в %:

$$\delta = \frac{Q_{\text{изл}}}{Q_{\text{т}}} \cdot 100\% = \frac{9271}{1171\,000} \cdot 100\% = 0,8\%.$$

Контрольные вопросы

1. Закон Планка для теплового излучения.
2. Закон Стефана–Больцмана.
3. Закон Вина
4. Закон Киргофа для теплового излучения.
5. Классификация спектров пламени.
6. Приведите примеры пламени со сплошным спектром.
7. Приведите примеры пламени с линейчатым спектром.

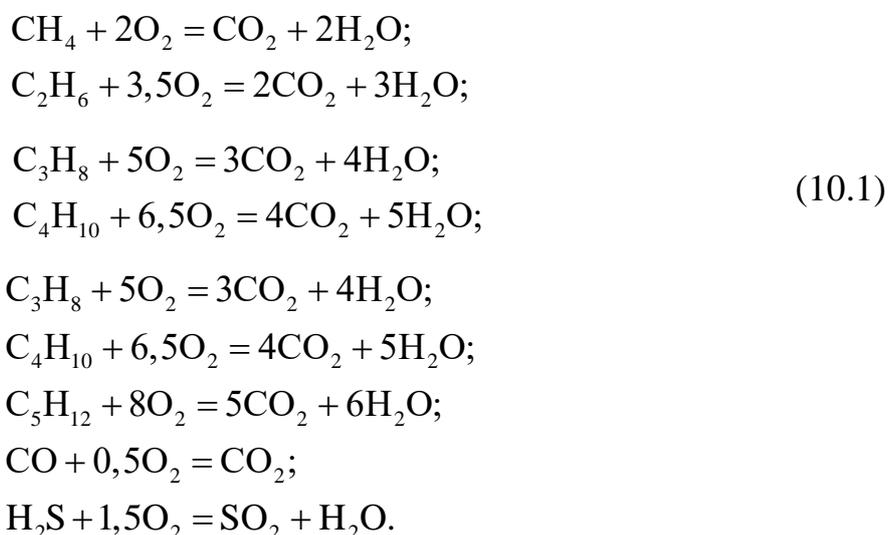
10. РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА СЛОЖНОГО СОСТАВА

Газообразное топливо представляет собой смесь различных горючих и негорючих газов. Основными горючими составляющими большинства газообразных топлив являются предельные углеводороды метанового ряда, а также водород, оксид углерода и иногда сероводород.

Определение объема воздуха, теоретически необходимого для полного сгорания топлива, и теоретического объема продуктов сгорания, а также определение действительных объемов воздуха и продуктов сгорания (с учетом коэффициента избытка воздуха) являются основной задачей при проектировании котельных установок и различных устройств, использующих в своей работе процессы горения.

Материальный баланс процесса горения выражает количественные соотношения между исходными веществами (топливо, воздух) и конечными продуктами (дымовые газы).

Согласно закону Дальтона горючие составляющие газа вступают в химическую реакцию с кислородом в определенных количественных соотношениях, определяемых из стехеометрических уравнений горения углеводородных компонентов, диоксида углерода CO_2 , азота N_2 и сероводорода H_2S :



Влага в рабочем составе газообразного топлива находится в виде водяных паров. Обычно химический состав газообразного топлива определяют экспериментально в объемных процентах на сухую массу (сухой газ), а влажность газа оценивается по абсолютной влажности ($g_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{с.г}}$) в граммах на кубический метр сухого газа (г/м^3). Состав влажного газа обычно рассчитывают при известном содержании влаги, отнесенном к сухому газу. Правильность анализа или расчета проверяется равенствами:

– для сухого газа

$$\varphi_{\text{CO}_2}^{\text{с.г}} + \varphi_{\text{CO}}^{\text{с.г}} + \varphi_{\text{H}_2}^{\text{с.г}} + \varphi_{\text{CH}_4}^{\text{с.г}} + \varphi_{\text{C}_2\text{H}_4}^{\text{с.г}} + \dots + \varphi_{\text{N}_2}^{\text{с.г}} = 100\%; \quad (10.2)$$

– для влажного газа

$$\varphi_{\text{CO}_2}^{\text{в.г}} + \varphi_{\text{CO}}^{\text{в.г}} + \varphi_{\text{H}_2}^{\text{в.г}} + \varphi_{\text{CH}_4}^{\text{в.г}} + \varphi_{\text{C}_2\text{H}_4}^{\text{в.г}} + \dots + \varphi_{\text{N}_2}^{\text{в.г}} + \varphi_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{в.г}} = 100\%. \quad (10.3)$$

Пересчет состава сухого газа на состав влажного газа осуществляется по формуле

$$\varphi_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{в.г}} = \frac{g_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{с.г}}}{(8,036 + 0,01 \cdot g_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{с.г}})}. \quad (10.4)$$

Далее определяется содержание других компонентов влажного газа по формуле

$$\varphi_i^{\text{в.г}} = \varphi_i^{\text{с.г}} \cdot (1 - 0,01 \cdot \varphi_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{в.г}}). \quad (10.5)$$

Средняя молекулярная масса топливного газа вычисляется по следующему соотношению:

$$\mu_{\text{т.г}} = \sum_i^n 0,01 \cdot \varphi_i^{\text{в.г}} \cdot \mu_i, \quad (10.6)$$

где μ_i – молекулярная масса элемента топливного газа, кг/кмоль , n – количество компонентов топливного газа.

Удельная мольная изобарная теплоемкость топливного газа

$$\mu_{\text{ср.т.г}} = \sum_i^n 0,01 \cdot \varphi_i^{\text{в.г}} \cdot \mu_{\text{ср}i}, \quad (10.7)$$

где μ_{cpi} – мольная изобарная теплоемкость двухатомных и трех- и более атомных элементов топливного газа, кДж/(кмоль·К).

Расчет массовых долей топливного газа:

$$g_i = \frac{\mu_i \cdot \varphi_i^{B.G.}}{\mu_{T.G.}}. \quad (10.8)$$

Определение удельной массовой изобарной теплоемкости топливного газа:

$$c_{pT.G.} = \sum_i^n \frac{\mu_{cpi}}{\mu_{T.G.}} \cdot g_i. \quad (10.9)$$

Газовая постоянная топливного газа

$$R_{T.G.} = \frac{R}{\mu_{T.G.}}, \quad (10.10)$$

где R – универсальная газовая постоянная.

Плотность топливного газа при нормальных условиях ($p_0 = 101\,325$ Па, $T_0 = 273,15$ К)

$$\rho_{T.G.} = \frac{p_0}{R_{T.G.} \cdot T_0}. \quad (10.11)$$

Свойства влажного воздуха

Определение состава сухого воздуха. Сухой атмосферный воздух состоит из 21% кислорода и 79% азота:

$$\varphi_{N_2}^{c.B.} = 79\%; \quad \varphi_{O_2}^{c.B.} = 21\%.$$

Так как влажный воздух состоит из азота, кислорода и водяных паров, то необходимо пересчитать содержание компонентов воздуха, с учетом присутствия в нем влаги.

Влагосодержание воздуха находим по заданным параметрам относительной влажности воздуха φ , давлению p_0 и температуре воздуха t_B . Для этого на начальном этапе по таблице свойств воды и водяного пара определяем давление насыщения при температуре воздуха t_B . Кроме таблиц, можно воспользоваться также диаграммой для воды и водяного пара или программами, основанными на этих диаграммах. Например, программа «Диаграмма HS

для воды и водяного пара» с сайта NeuroThermal позволяет определить всевозможные параметры воды, которые нужны для расчета характеристик процессов, использующих воду и пар.

Парциальное давление водяного пара, которое содержится в воздухе, определим по формуле

$$p_{\text{п}} = \varphi p_{\text{н}}, \quad (10.12)$$

где $p_{\text{н}}$ – давление насыщенного пара.

На следующем этапе по диаграмме воды и водяного пара в соответствии с температурой воздуха и парциальным давлением водяного пара находим удельный объем $v_{\text{п}}$ и далее плотность пара $\rho_{\text{п}}$:

$$\rho_{\text{п}} = \frac{1}{v_{\text{п}}}. \quad (10.13)$$

Для определения плотности воздуха вначале находим давление воздуха по формуле

$$p_{\text{в}} = p_0 - p_{\text{п}}, \quad (10.14)$$

а затем $\rho_{\text{в}}$:

$$\rho_{\text{в}} = \frac{p_{\text{в}}}{R_{\text{в}} T_{\text{в}}}, \quad (10.15)$$

где $R_{\text{в}}$ – газовая постоянная воздуха; $T_{\text{в}}$ – температура воздуха, К.

Влагосодержание воздуха определяется по соотношению

$$d = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{в}}}. \quad (10.16)$$

Преобразуем влагосодержание воздуха на 1 м^3 :

$$g_{\text{H}_2\text{O}} = d \rho_{\text{с.в}}, \quad (10.17)$$

где $\rho_{\text{с.в}}$ – плотность сухого воздуха при нормальных условиях в размерности $\text{кг}/\text{м}^3$.

Содержание влаги во влажном воздухе

$$\varphi_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{в}} = \frac{1,244 \cdot g_{\text{H}_2\text{O}}}{1 - 1,244 \cdot g_{\text{H}_2\text{O}}}. \quad (10.18)$$

Далее все составляющие воздуха пересчитываются на влажную массу:

$$\varphi_j^{B.B} = \varphi_j^{c.B} \cdot (1 - 0,01 \cdot \varphi_{H_2O}^B), \quad (10.19)$$

где j – компоненты воздуха (O_2, N_2).

Средняя (кажущаяся) молекулярная масса влажного воздуха определяется по формуле

$$\mu^{B.B} = \sum_j^l 0,01 \cdot \varphi_j^{B.B} \cdot \mu_j, \quad (10.20)$$

где l – количество компонентов воздуха.

Удельная мольная изобарная теплоемкость влажного воздуха

$$\mu_{cp}^{B.B} = \sum_j^l 0,01 \cdot \varphi_j^{B.B} \cdot \mu_{cpj}. \quad (10.21)$$

Удельная массовая изобарная теплоемкость влажного воздуха

$$c_p^{B.B} = \sum_j^l \frac{\mu_{cpj}}{\mu^{B.B}}. \quad (10.22)$$

Пересчет объемных долей элементов влажного воздуха на массовые:

$$g_j = \frac{\mu_j \cdot 0,01 \cdot \varphi_j^{B.B}}{\mu^{B.B}}. \quad (10.23)$$

Газовая постоянная влажного воздуха

$$R^{B.B} = \frac{R}{\mu^{B.B}}. \quad (10.24)$$

Плотность влажного воздуха при нормальных условиях

$$\rho_{B.B} = \frac{P_0}{R^{B.B} \cdot T_0}. \quad (10.25)$$

Свойства продуктов сгорания при $\alpha = 1$

Объем водяных паров в продуктах сгорания определяется по объему водяного пара в исходном воздухе и водяного пара, образующегося в результате окисления компонентов топливного газа.

Объем водяного пара, содержащегося во влажном воздухе, определяется по формуле

$$V_0^B = L_0^{B.B} \cdot d \cdot \rho^{B.B} \cdot v_{H_2O}, \quad (10.26)$$

где $L_0^{B.B}$ – расход влажного воздуха, м³; v_{H_2O} – удельный объем водяных паров при нормальных условиях, м³/кг.

Рассчитываются расходы сухого $L_0^{c.B}$ и влажного $L_0^{B.B}$ воздуха, обеспечивающие полное сжигание газообразного топлива при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$.

Расход влажного воздуха определяется по формуле

$$L_0^{B.B} = (1 + 0,00124 \cdot g_{H_2O}) \cdot L_0^{c.B}. \quad (10.27)$$

Расход сухого воздуха, необходимого для сжигания топлива:

$$L_0^{c.B} = (1 + k) \cdot V_0^{O_2}. \quad (10.28)$$

Определяется объем кислорода, необходимый для полного окисления горючих компонентов влажного топлива в соответствии с реакциями горения:

$$V_0^{O_2} = 0,01 \cdot (2 \cdot \varphi_{CH_4}^{B.G} + 3,5 \cdot \varphi_{C_2H_6}^{B.G} + 5 \cdot \varphi_{C_3H_8}^{B.G} + 6,5 \cdot \varphi_{C_4H_{10}}^{B.G} + 8 \cdot \varphi_{C_5H_{12}}^{B.G} + 1,5 \cdot \varphi_{H_2S}^{B.G}). \quad (10.29)$$

Здесь коэффициент 0,01 учитывает переход от оценки компонентов газообразного топлива в процентах к объемным долям их содержания в 1 м³ топлива.

Для определения выхода продуктов горения используются те же стехиометрические соотношения приведенных выше реакций горения.

Объем водяного пара, содержащегося в продуктах сгорания:

$$V_0^{п.с} = 0,01 \cdot (2 \cdot \varphi_{CH_4}^{B.G} + 3 \cdot \varphi_{C_2H_6}^{B.G} + 4 \cdot \varphi_{C_3H_8}^{B.G} + 5 \cdot \varphi_{C_4H_{10}}^{B.G} + 6 \cdot \varphi_{C_5H_{12}}^{B.G} + \varphi_{H_2S}^{B.G} + \varphi_{H_2O}^{B.G}). \quad (10.30)$$

Объем азота в продуктах сгорания

$$V_0^{N_2} = 0,01 \cdot \varphi_{N_2}^{B.G} + k_s \cdot V_0^{O_2}, \quad (10.31)$$

где k_s – стехиометрический коэффициент, определяющий соотношение кислорода и азота в сухом воздухе ($k_s = 3,76$).

Выход продуктов горения – V_0 , в общем случае горения газа в теоретических условиях (когда $\alpha = 1$) представляет собой сумму объемов оксидов CO₂, SO₂, водяного пара H₂O, источником которого являются продукты горения

водорода, собственно водяной пар, содержащийся в самом газообразном топливе, и водяной пар, находящийся в воздухе. Азот в продукты горения поступает вместе с кислородом воздуха, а также и как возможный компонент газообразного топлива.

Следовательно, можно определить общий объем продуктов сгорания:

$$V_0 = V_0^{\text{SO}_2} + V_0^{\text{CO}_2} + V_0^{\text{H}_2\text{O}} + V_0^{\text{N}_2}. \quad (10.32)$$

В случае отличного от единицы коэффициента избытка воздуха необходимо скорректировать состав продуктов сгорания по следующему соотношению:

$$V_{\text{п.с}} = V_{\text{п.с}}^{\text{SO}_2} + V_{\text{п.с}}^{\text{CO}_2} + V_{\text{п.с}}^{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{п.с}}^{\text{N}_2} + V_{\text{п.с}}^{\text{O}_2} + V_{\text{п.с}}^R, \quad (10.33)$$

где $V_{\text{п.с}}^{\text{O}_2}$ – объем кислорода, который не вступил в реакцию окисления топлива на объем топлива этого топлива при $\alpha > 1$; $V_{\text{п.с}}^R$ – объем топливного газа, который не прореагировал из-за нехватки кислорода, при $\alpha < 1$.

Как мы видим, в формуле (10.33) добавились два слагаемых, которые появляются при α больше или меньше единицы. Соответственно при $\alpha > 1$ будет отсутствовать слагаемое $V_{\text{п.с}}^R$, при $\alpha < 1$ будет отсутствовать слагаемое $V_{\text{п.с}}^{\text{O}_2}$.

В случае когда $\alpha = 1$ $V_{\text{п.с}} = V_0$.

При $\alpha > 1$

$$V_{\text{п.с}}^{\text{N}_2} = 0,01 \cdot \varphi_{\text{N}_2}^{\text{в.г}} + \alpha \cdot 3,76 \cdot \varphi_{\text{O}_2}^{\text{в.г}}; \quad (10.34)$$

$$V_{\text{п.с}}^{\text{O}_2} = (\alpha - 1) \cdot V_0^{\text{O}_2}. \quad (10.35)$$

При $\alpha < 1$ $V_{\text{п.с}}^R$ рассчитывается в соответствии со следующей формулой:

$$V_{\text{п.с}}^R = (1 - \alpha) V_{\text{т.г}}, \quad (10.36)$$

где $V_{\text{т.г}}$ – объем топливного газа.

Слагаемые выражения для V_0 при $\alpha = 1$ раскрываются в результате анализа тех же стехиометрических соотношений реакций горения (10.1), которые были приведены выше.

$$V_0^{\text{CO}_2} = 0,01 \cdot (\varphi_{\text{CH}_4}^{\text{в.г}} + 2 \cdot \varphi_{\text{C}_2\text{H}_6}^{\text{в.г}} + 3 \cdot \varphi_{\text{C}_3\text{H}_8}^{\text{в.г}} + 4 \cdot \varphi_{\text{C}_4\text{H}_{10}}^{\text{в.г}} + 5 \cdot \varphi_{\text{C}_5\text{H}_{12}}^{\text{в.г}}). \quad (10.37)$$

Доля углекислого газа в продуктах сгорания

$$\varphi_{\text{CO}_2}^{\text{п.с}} = \frac{V_0^{\text{CO}_2}}{V_0} \cdot 100\% . \quad (10.38)$$

Объем и доля диоксида серы в продуктах сгорания определяются по следующим выражениям:

$$V_0^{\text{SO}_2} = 0,01 \cdot \varphi_{\text{H}_2\text{S}}^{\text{в.г}} ; \quad (10.39)$$

$$\varphi_{\text{SO}_2}^{\text{п.с}} = \frac{V_0^{\text{SO}_2}}{V_0} \cdot 100\% . \quad (10.40)$$

Доля азота в продуктах сгорания определяется по следующему выражению:

$$\varphi_{\text{N}_2}^{\text{с.п}} = \frac{V_0^{\text{N}_2}}{V_0} \cdot 100\% . \quad (10.41)$$

Доля водяного пара в продуктах сгорания определяется по следующему выражению:

$$\varphi_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{п.с}} = \frac{V_0^{\text{H}_2\text{O}}}{V_0} \cdot 100\% . \quad (10.42)$$

Производится проверка правильности проведенных расчетов:

$$\varphi_{\text{CO}_2}^{\text{п.с}} + \varphi_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{п.с}} + \varphi_{\text{N}_2}^{\text{п.с}} + \varphi_{\text{SO}_2}^{\text{п.с}} = 100\% . \quad (10.43)$$

Сумма долей всех компонентов продуктов сгорания должно быть равно 100%. Если это условие выполняется, то расчеты выполнены правильно.

Средняя (кажущаяся) молекулярная масса продуктов сгорания

$$\mu^{\text{п.с}} = \sum_i^{l_{\text{п.с}}} 0,01 \cdot \varphi_i^{\text{п.с}} \cdot \mu_i . \quad (10.44)$$

Удельная мольная изобарная теплоемкость продуктов сгорания

$$\mu_{\text{ср}}^{\text{п.с}} = \sum_i^{l_{\text{п.с}}} 0,01 \cdot \varphi_i^{\text{п.с}} \cdot \mu_{\text{ср}i} . \quad (10.45)$$

Удельная массовая изобарная теплоемкость продуктов сгорания

$$c_p^{\text{п.с}} = \sum_i^l \frac{\mu_{\text{ср}i}}{\mu^{\text{п.с}}} \cdot g_i . \quad (10.46)$$

Пересчет объемных долей элементов продуктов сгорания на массовые:

$$g_i = \frac{\mu_i \cdot 0,01 \cdot \varphi_i^{\text{п.с}}}{\mu^{\text{п.с}}} \quad (10.47)$$

Газовая постоянная продуктов сгорания

$$R^{\text{п.с}} = \frac{R}{\mu^{\text{п.с}}} \quad (10.48)$$

Плотность продуктов сгорания при нормальных условиях

$$\rho^{\text{п.с}} = \frac{P_0}{R^{\text{п.с}} \cdot T_0} \quad (10.49)$$

Определяем удельный объем продуктов сгорания:

$$v^{\text{п.с}} = \frac{1}{\rho^{\text{п.с}}} \quad (10.50)$$

Характеристики горения топлива

Рассчитываем низшую теплоту сгорания газообразного топлива, состав которого соответствует рабочему состоянию (влажный газ), суммируя тепловые эффекты реакций окисления горючих компонентов топлива.

$$Q_p^H = 358 \cdot \varphi_{\text{CH}_4}^{\text{в.г}} + 636 \cdot \varphi_{\text{C}_2\text{H}_6}^{\text{в.г}} + 913 \cdot \varphi_{\text{C}_3\text{H}_8}^{\text{в.г}} + 1185 \cdot \varphi_{\text{C}_4\text{H}_{10}}^{\text{в.г}} + 1465 \cdot \varphi_{\text{C}_5\text{H}_{12}}^{\text{в.г}} + 234 \cdot \varphi_{\text{H}_2\text{S}}^{\text{в.г}} \quad (10.51)$$

Цифры означают уменьшенные в 100 раз тепловые эффекты реакций окисления соответствующих горючих составляющих, подставленных в объемных процентах.

Пересчет характеристик горения топлива на 1 кг топливного газа.

Масса продуктов сгорания при $\alpha = 1$

$$M_0^{\text{п.с}} = \frac{V_0 \cdot \rho^{\text{п.с}}}{\rho_{\text{т.г}}} \quad (10.52)$$

Масса влажного воздуха, необходимого для горения топлива:

$$M_0^{\text{в.в}} = \frac{L_0^{\text{в.в}} \cdot \rho^{\text{в.в}}}{\rho_{\text{т.г}}} \quad (10.53)$$

Низшая теплота сгорания топлива из расчета на кг топливного газа

$$Q_{\text{рм}}^H = \frac{Q_p^H}{\rho_{\text{т.г}}} \quad (10.54)$$

Далее определим температуру горения. Для этого по i - t -диаграмме теоретической t_{α}^T и балансной t_{α}^B температур горения необходимо рассчитать общее и балансовое теплосодержание.

На первом этапе определяется химическая энтальпия продуктов сгорания [5]:

$$i_x = \frac{Q_p^H}{V_{п.с}}. \quad (10.55)$$

В знаменателе представленной формулы объем продуктов сгорания, который вычислен при коэффициенте избытка кислорода $\alpha = 1$. В случае отличного от единицы величины α V_0 должен быть скорректирован на соответствующую величину.

Физическая энтальпия (кДж/м³) подогретого топлива

$$i_T = \frac{c_T t_T}{V_{п.с}}, \quad (10.56)$$

где c_T – удельная теплоемкость подогретого топлива; t_T – температура подогрева топлива.

Энтальпия подогретого воздуха

$$i_B = \frac{c_B \cdot t_B \cdot L_0^{B.B}}{V_{с.п}}, \quad (10.57)$$

где c_B – удельная теплоемкость подогретого воздуха; t_B – температура подогрева воздуха.

Энтальпия химического и механического недожога топлива записывается в виде

$$\left. \begin{aligned} i_3 &= \frac{Q_3}{V_{п.с}}; \\ i_4 &= \frac{Q_4}{V_{п.с}}. \end{aligned} \right\} \quad (10.58)$$

Значения Q_3 и Q_4 рассчитываются в зависимости от коэффициента избытка воздуха и способа сжигания в долях от Q_p^H . Соответственно для определения

теоретической температуры горения топлива общее теплосодержание рассчитывают по формуле

$$i_{\text{общ}}^i = i_x + i_T + i_B. \quad (10.59)$$

Для определения балансной температуры горения общее теплосодержание рассчитывают по формуле

$$i_{\text{общ}}^{\delta} = i_x + i_T + i_B - i_3 - i_4. \quad (10.60)$$

Далее по диаграмме рис. 10.1 по значениям общего теплосодержания определяются значения. При этом линия выбирается по значению коэффициента избытка воздуха α .

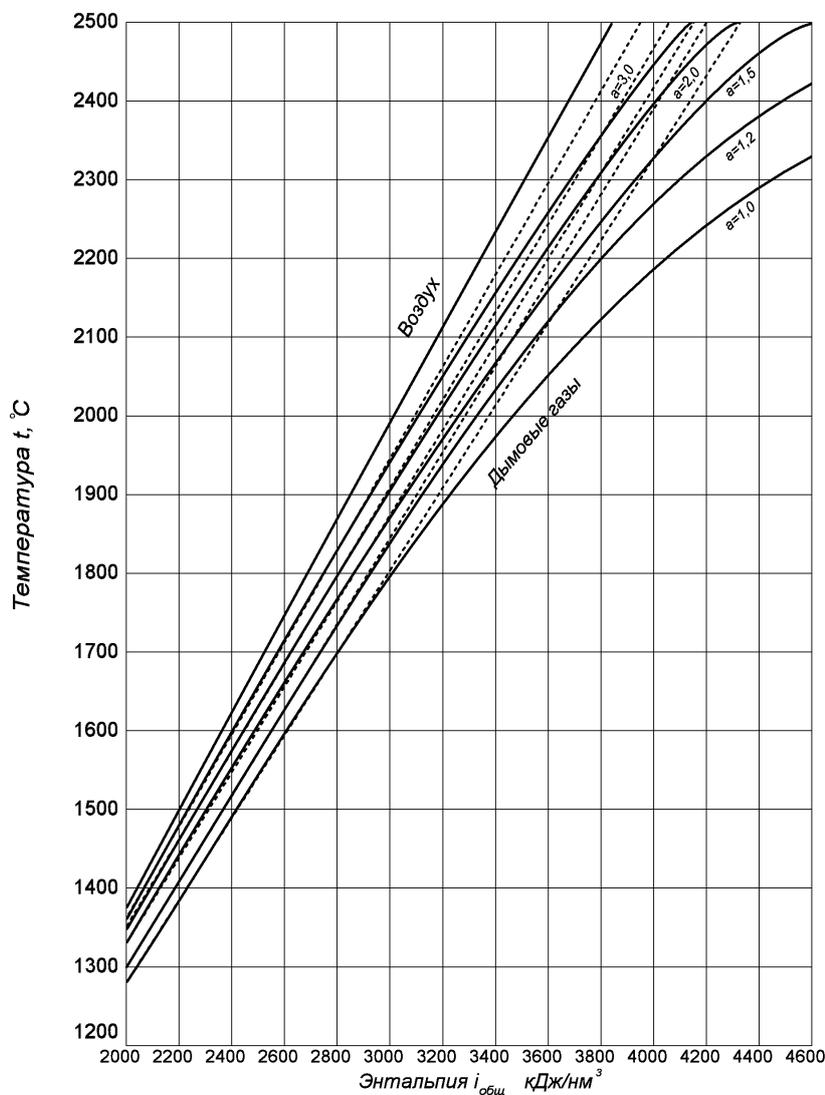


Рис. 10.1. i - t -диаграмма для природного газа, коксового газа и смеси коксового и доменного газов: сплошная линия для определения теоретической температуры горения, пунктирная линия – балансная температура горения

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 10

Цель работы: получить навык расчета материального баланса процесса горения, оценить влияние коэффициента избытка воздуха и влажности на объем продуктов сгорания и низшую и высшую теплоту сгорания топлива.

Порядок выполнения

1. В соответствии с вариантом задания (табл. 10.1) записать состав топливного газа, а также влажность воздуха.

10.1. Варианты заданий для практической работы № 10

№ варианта	$\Phi_{\text{CH}_4}^{\text{с.г}}$	$\Phi_{\text{C}_2\text{H}_6}^{\text{с.г}}$	$\Phi_{\text{C}_3\text{H}_8}^{\text{с.г}}$	$\Phi_{\text{C}_4\text{H}_{10}}^{\text{с.г}}$	$\Phi_{\text{C}_5\text{H}_{12}}^{\text{с.г}}$	$\Phi_{\text{CO}_2}^{\text{с.г}}$	$\Phi_{\text{N}_2}^{\text{с.г}}$	$\Phi_{\text{H}_2\text{S}}^{\text{с.г}}$	$\delta_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{с.г}}$	Φ_{B}
1	68,9	17,3	4,3	3,0	2,4	0,2	0,9	2,9	3,9	88
2	52,7	35,9	2,7	4,4	0,6	0,9	1,4	1,3	4,4	85
3	62,3	23,4	1,1	4,0	4,1	1,3	1,3	2,4	4,7	57
4	56,1	31,8	7,0	0,3	0,9	0,4	1,5	2,1	5,9	91
5	57,3	33,6	0,9	1,1	4,5	1,1	1,4	0,1	3,4	74
6	58,6	27,1	3,9	3,2	1,7	2,4	0,4	2,7	3,8	69
7	74,3	5,2	9,9	2,0	3,4	2,9	1,5	1,0	5,4	83
8	66,1	14,3	9,7	2,0	2,7	2,6	2,4	0,3	3,5	96
9	66,7	19,8	7,2	1,2	2,2	0,8	1,7	0,2	2,9	94
10	64,9	28,2	1,3	0,6	1,2	0,6	0,5	2,8	0,7	79
11	53,5	27,0	9,9	4,9	0,4	0,4	1,6	2,3	2,2	57
12	67,5	17,4	4,9	0,2	3,1	1,9	2,5	2,5	3,1	89
13	67,7	16,8	8,1	1,0	1,1	1,0	3,0	1,2	5,4	71
14	52,6	38,7	2,4	1,6	1,6	0,3	0,8	2,1	1,3	49
15	52,5	27,6	7,8	3,7	2,0	1,9	2,1	2,4	0,6	67
16	75,2	12,0	2,2	0,3	2,5	2,7	2,8	2,2	5,9	86
17	69,5	13,4	7,8	1,3	2,6	1,7	1,4	2,4	0,6	85
18	58,4	21,6	6,7	4,0	3,2	2,8	1,7	1,7	1,1	79
19	55,3	30,3	1,6	4,7	3,2	1,5	1,7	1,8	3,0	83
20	53,3	28,5	9,1	3,4	1,7	1,3	0,4	2,3	4,9	70
21	78,7	14,4	1,4	0,1	0,9	2,3	0,8	1,3	5,4	47
22	76,8	9,2	6,0	0,0	0,9	2,9	2,1	2,2	4,9	70
23	63,5	29,6	1,3	2,0	0,4	0,9	2,3	0,1	3,8	95
24	58,5	31,2	1,7	2,2	2,8	1,0	0,3	2,3	3,3	79

2. В соответствии с методическими рекомендациями вычисляются:

- содержание компонентов влажного топливного газа;
- средняя молекулярная масса топливного газа;
- удельная мольная изобарная теплоемкость топливного газа;
- массовые доли топливного газа;
- удельная массовая изобарная теплоемкость топливного газа;
- газовая постоянная топливного газа;
- плотность топливного газа;
- парциальное давление водяного пара;
- удельный объем водяного пара;
- плотность водяного пара;
- давление воздуха;
- плотность воздуха;
- влагосодержание воздуха;
- содержание влаги во влажном воздухе;
- составляющие воздуха на влажную массу;
- средняя (кажущаяся) молекулярная масса влажного воздуха;
- удельная мольная изобарная теплоемкость влажного воздуха;
- удельная массовая изобарная теплоемкость влажного воздуха;
- массовые доли элементов влажного воздуха;
- газовая постоянная влажного воздуха;
- плотность влажного воздуха при нормальных условиях;
- объем водяного пара, содержащегося во влажном воздухе;
- объем кислорода, необходимого для полного окисления горючих компонентов влажного топлива;
- расход сухого воздуха;
- расход влажного воздуха;
- объем водяного пара, содержащегося в продуктах сгорания;
- объем азота в продуктах сгорания;
- общий объем продуктов сгорания;
- доля углекислого газа в продуктах сгорания;
- доля диоксида серы;

- доля азота в продуктах сгорания;
- доля водяного пара;
- средняя (кажущаяся) молекулярная масса продуктов сгорания;
- удельная мольная изобарная теплоемкость продуктов сгорания;
- удельная массовая изобарная теплоемкость продуктов сгорания;
- газовая постоянная продуктов сгорания;
- плотность продуктов сгорания при нормальных условиях;
- низшая теплота сгорания газообразного топлива, приведенная к объему топливного газа;
- масса продуктов сгорания;
- масса влажного воздуха, необходимого для горения топлива;
- низшая теплота сгорания топлива из расчета на кг топливного газа;
- химическая энтальпия;
- физическая энтальпия;
- энтальпия подогретого воздуха;
- теоретическая температура горения топлива;
- балансная температура горения топлива.

Контрольные вопросы

1. Понятие материального баланса в процессе горения.
2. Метод пересчета долей компонентов топливного газа с сухого на влажный газ.
3. Процедура определения удельного объема водяного пара.
4. Понятие относительной влажности газа.
5. Парциальное давление газа.
6. Объяснить понятие мольной изобарной теплоемкости.
7. Методика расчета объема водяного пара в воздухе.
8. Метод определения кажущейся молекулярной массы продуктов сгорания.
9. Низшая теплота сгорания топлива.
10. Высшая теплота сгорания топлива.
11. Балансная температура горения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вторая часть учебного пособия «Основы теории горения» предназначена для подготовки высококвалифицированных специалистов в области теплоэнергетики и теплотехники. В пособии изучены вопросы по определению горючести углеводородных молекул, склонности к самовозгоранию и температуры самовозгорания, температуры воспламенения и распространения пламени, температурные пределы воспламенения, концентрационных пределов воспламенения, влияние температуры на скорость горения, температуры пламени, энергии излучения пламени, параметров горения углеводородного топлива сложного состава. Полученные навыки и умения должны позволить студентам в области теплоэнергетики и теплотехники осуществлять расчеты основных параметров процесса горения, необходимые для проектирования различных узлов и компонентов энергетических установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум по направлению «Техносферная безопасность» / В. А. Девисилов, Т. И. Дроздова, С. С. Тимофеева. – М. : Изд-во «Форум», 2012. – 351 с.
2. Липкович, И. Э. Теория горения и взрыва : учебное пособие для практических занятий / И. Э. Липкович, Н. В. Петренко, И. В. Орищенко. – зерноград : ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2014. – 121 с.
3. Алексеев, С. Г. Температура вспышки. Ч. II. Расчет через давление насыщенного пара / С. Г. Алексеев, В. В. Смирнов, Н. М. Барбин // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 10. – С. 21 – 35.
4. Perry's Chemical Engineers' Handbook By ed. R. H. Perry, D. W. Green, J. O. Maloney. – N. Y. :Mc-Graw-Hill, 1997. – 2643 p.,] [5, Perry's Chemical Engineers' Handbook By ed. D. W. Green, R. H. Perry. – N. Y. : Mc-Graw-Hill, 2008. – P. 2 – 515.
5. Коломиец, П. В. Расчет горения топлива : методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Химмотология» / П. В. Коломиец. – Тольятти : ТГУ, 2011. – 38 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРЮЧЕСТИ МОЛЕКУЛ	4
Практическая работа № 1	5
2. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКЛОННОСТИ К САМОВОЗГОРАНИЮ МАСЕЛ	7
Практическая работа № 2	8
3. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ САМОВОЗГОРАНИЯ ВЕЩЕСТВ	10
Практическая работа № 3	12
4. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В ГОРЮЧЕЙ СРЕДЕ	15
Практическая работа № 4	17
5. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРЕДЕЛЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ	19
Практическая работа № 5	22
6. РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПРЕДЕЛОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ГОРЮЧЕЙ СРЕДЫ	24
Практическая работа № 6	30
7. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ	34
Практическая работа № 7	36
8. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАМЕНИ	45
Практическая работа № 8	52
9. РАСЧЕТ ЭНЕРГИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАМЕНИ	57
Практическая работа № 9	61
10. РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА СЛОЖНОГО СОСТАВА	65
Практическая работа № 10	76
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	79
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	79

Учебное электронное издание

БАРШУТИН Сергей Николаевич

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ГОРЕНИЯ

В ТРЕХ ЧАСТЯХ

ЧАСТЬ 2

Учебное пособие

Редактор Л. В. Комбарова
Графический и мультимедийный дизайнер Т. Ю. Зотова
Обложка, упаковка, тиражирование Л. В. Комбаровой

ISBN 978-5-8265-2759-7



Подписано к использованию 20.02.2024.
Тираж 50 шт. Заказ № 19

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14
Тел./факс (4752) 63-81-08.
E-mail: izdatelstvo@tstu.ru