

ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

*Методические указания к курсовой работе
для студентов бакалавриата направления 20.03.01
и специальности 21.05.04*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра взрывного дела

ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

*Методические указания к курсовой работе
для студентов бакалавриата направления 20.03.01
и специальности 21.05.04*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020

УДК 622.235 (073)

ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА: Методические указания к курсовой работе / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *Ю.И. Виноградов, В.В. Должиков, С.В. Хохлов* СПб, 2020. 66 с.

В методических указаниях изложены основные требования к содержанию и оформлению курсовой работы, даны рекомендации по расчету основных параметров горения и взрыва.

Предназначены для студентов бакалавриата направления 20.03.01 «Техносферная безопасность» и специальности 21.05.04 «Горное дело» специализации «Технологическая безопасность и горноспасательное дело», а также могут быть использованы студентами других горных специализаций.

Научный редактор проф. *О.И. Казанин*

Рецензент канд. техн. наук *Е.Ю. Суровицкая* (ООО «Оскур»)

ВВЕДЕНИЕ

Изучение дисциплины «Теория горения и взрыва» ставит своей целью формирование у студентов теоретических основ прогнозирования условий образования горючих и взрывоопасных систем, разрушающего действия взрыва; определения параметров инициирования горения и взрыва, оценки возможности перехода горения во взрыв при различных технологических процессах на горных предприятиях.

В курсовой работе предлагается теоретически на основании расчетных методов определить параметры горения и взрыва выбранного горючего вещества, охарактеризовать его пожаровзрывоопасные свойства и сравнить полученные расчетные значения с экспериментально установленными показателями пожарной опасности, имеющимися в справочной литературе.

Для помещений заданных размеров определить массу горючего вещества, при испарении которого в помещении образуется наиболее взрывоопасная паровоздушная смесь, определить тротиловый эквивалент взрыва такой смеси, рассчитать безопасное расстояние по действию воздушной ударной волны и количество флегмизатора, необходимого для предотвращения взрыва.

Требования к тексту пояснительной записки:

Расчетно-пояснительная записка должна быть оформлена в соответствии с установленными требованиями.

Используемый размер бумаги – А4, Параметры полосы, см: верхнее – 2,5; нижнее – 2,0, левое – 2,5; правое – 1,5. Для текста используется редактор Word, не ниже версии 7; для формул – Equation или аналог.

Стиль текста: - размер шрифта Times New Roman - 14 кегль, обычный, межстрочный интервал – одинарный, абзацный отступ – 1,25 см; запрет висячих строк; автоматический перенос слов; выравнивание – по ширине; нумерация страниц снизу по центру.

Стиль заголовков: размер шрифта Times New Roman - 14 кегль, полужирный, прописной, по центру, без переносов. Подзаголовки 14 кегль.

Стиль таблиц: размер шрифта Times New Roman - 12 кегль, обычный, в таблицах, не размещающихся на одной полосе, необходимо повторять «заголовок».

Стиль набора формул: шрифт Times New Roman, расположение – по центру.

В тексте необходимы ссылки на использованные литературные источники. Результаты расчетов сводят в таблицы. При выполнении расчетов необходимо привести общий вид формулы с расшифровкой буквенных обозначений, входящих в нее величин, и указанием единиц измерения.

Таблицы, рисунки должны быть пронумерованы, а в тексте пояснительной записки даны ссылки на них. Нумерация разделов, рисунков, таблиц сквозная.

В конце записки помещается библиографический список, составленный в алфавитном порядке и в соответствии с ГОСТом.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ОСНОВНЫХ РАЗДЕЛОВ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

I. Расчет термодинамических характеристик смеси взрывчатых веществ

Курсовая работа состоит из двух частей.

Часть 1. Расчет термодинамических характеристик смеси взрывчатых веществ

Для вещества заданного преподавателем рассчитать следующие термодинамические характеристики:

- кислородный баланс (КБ)
- составить реакцию взрывчатого превращения взрывчатых веществ (ВВ)
- тепловой эффект реакции взрывчатого превращения ($Q_{\text{взр}}$)
- объем газообразных продуктов взрыва ($V_{\text{пв}}$)
- давление газообразных продуктов взрыва (P)
- скорость детонации (D)

Часть 2. Сравнение полученных расчетных значений со справочными данными

Найти в справочной литературе или в Интернете термодинамические характеристики взрывчатого вещества и сравнить их с полученными расчетными значениями. Сделать выводы.

1. Кислородный баланс

По определению, кислородным балансом называется отношение избытка или недостатка кислорода во взрывчатом веществе, необходимого для полного окисления горючих элементов до их высших окислов, выраженного в грамм-атомах, к грамм-молекулярной массе ВВ. Обычно величина кислородного баланса выражается в процентах.

Под полным окислением горючих элементов понимается окисление водорода в воду, углерода в двуокись углерода (углекислый газ), а металла (алюминия) в его высший окисел.

Взрывчатые вещества, состоящие из углерода, водорода, азота и кислорода, можно представить в виде так называемой условной (брутто) формулы $C_aH_bN_cO_d$, тогда кислородный баланс можно определить по формуле

$$КБ = \frac{[d - (2 \cdot a + b/2)] \cdot 16}{12 \cdot a + b + 14 \cdot c + 16 \cdot d} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где a, b, c, d - количество атомов углерода, водорода, азота и кислорода в составе ВВ соответственно.

Сбалансированность химического состава ВВ по кислороду отвечает значениям $КБ = 0\%$.

По величине кислородного баланса, в зависимости от соотношения между a, b и d , все промышленные ВВ принято подразделять на три группы.

1. Первая группа - ВВ с положительным или нулевым КБ, т.е. с количеством кислорода в составе ВВ, достаточным для полного окисления горючих элементов:

$$d \geq 2 \cdot a + b/2, \text{ откуда } КБ \geq 0. \quad (2)$$

В этом случае в составе продуктов взрыва ПВ в основном содержатся газообразные CO_2, H_2O, N_2 и частично продукты диссоциации углекислого газа и воды (водяных паров). При значительном избытке кислорода возможно образование окислов азота NO, NO_2 и др.

2. Вторая группа - ВВ с отрицательным КБ, но с количеством кислорода, достаточным для полного газообразования:

$$a + b/2 \leq d < 2 \cdot a + b/2 \quad (3)$$

Как правило, в этом случае образуются следующие ПВ: CO_2, CO, H_2O, H_2, N_2 .

3. Третья группа - ВВ с существенно отрицательным КБ, при котором в составе ПВ может присутствовать чистый углерод (С) в виде сажи:

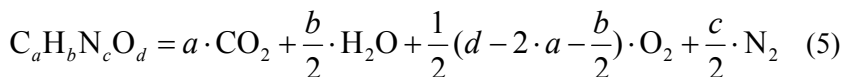
$$d < a + b/2 \quad (4)$$

В таком случае ПВ состоят, в основном, из CO, C, H₂O, H₂, N₂.

2. Составление реакций взрывчатого превращения ВВ

Для ВВ первой группы с КБ ≥ 0 реакции взрывчатого превращения составляются исходя из образования высших окислов всех горючих элементов, содержащихся в ВВ, а именно CO₂, H₂O, Al₂O₃ (принцип Бергло – максимального энерговыделения). Избыток кислорода выделяется в виде собственно O₂.

Составление реакции взрывчатого превращения для таких ВВ имеет следующий вид:



Для ВВ второй группы используется метод максимального газообразования (принцип Ле-Шателье- Малляра).

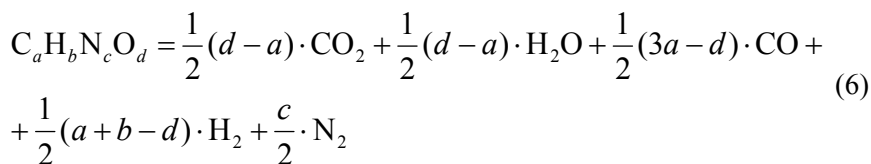
Расчет состава продуктов взрыва по данному принципу для ВВ, не содержащих алюминия, предусматривает последовательность:

- в момент взрыва весь углерод окисляется до окиси углерода (CO);

- оставшаяся часть кислорода равными долями расходуется на окисление водорода (H) до воды (H₂O) и окиси углерода до дву-окиси (CO → CO₂);

- при недостатке кислорода выделяются свободные элементы (H₂, C).

Схема написания реакции взрывчатого превращения по этой методике имеет следующий вид:

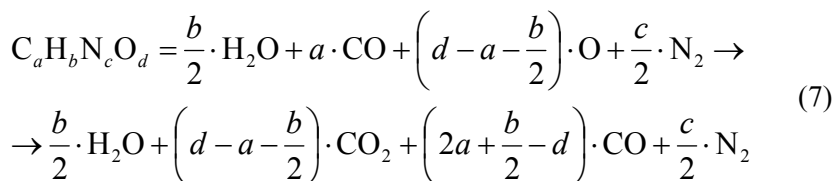


Для ВВ 3 группы используется методика расчета состава продуктов взрыва по Бринкли-Вильсону. При составлении правой

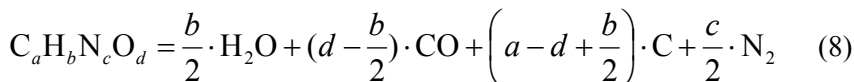
части реакции взрывчатого превращения по этому методу распределение кислорода происходит в две стадии. В составах, не содержащих алюминиевую пудру, кислород сначала окисляет весь водород в H_2O и углерод в CO , а оставшаяся часть кислорода используется на доокисление CO в CO_2 .

Данный метод используется для ВВ 3-й группы, однако он является приемлемым и для ВВ 2-й группы.

Для условий полного газообразования:



Для условий неполного газообразования:



Для алюмосодержащих смесевых ВВ сначала алюминий окисляется в Al_2O_3 , а водород - в воду (H_2O), углерод C - в CO . Оставшийся кислород идет на доокисление CO в CO_2 .

Для практических расчетов термодинамических характеристик многокомпонентных ВВ реакции взрывчатого превращения составляются по вышеперечисленным методикам для 1 кг ВВ. По известному процентному содержанию компонентов в смесевом ВВ определяется количество г-молей компонентов в 1 кг ВВ, после чего составляется условная (брутто) формула ВВ и правая часть химической реакции взрыва.

3. Расчет теплового эффекта реакции взрывчатого превращения ВВ

В основе расчета теплового эффекта взрывчатого превращения ВВ используется закон Гесса (1840 г.), основанный на первом начале термодинамики.

По этому закону тепловой эффект некоторой последовательности химических реакций не зависит от пути превращения исходных веществ в конечные продукты, а определяется только начальным и конечным состояниями системы.

На рис. 1 приведено схематическое изображение состояния системы - треугольник Гесса.

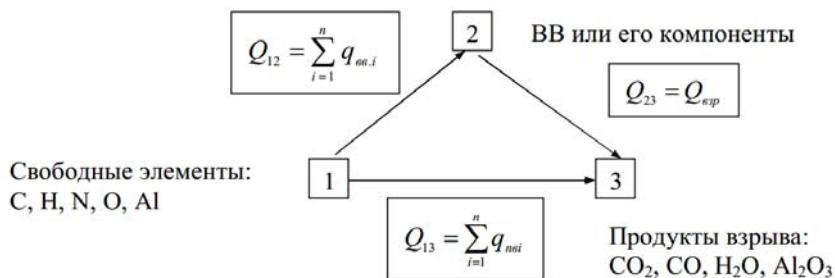


Рис. 1. Треугольник Гесса

По известным значениям теплоты образования ВВ (индивидуального) или компонентов смесового ВВ и теплоты образования продуктов взрыва тепловой эффект реакции взрыва определяется по формуле:

$$Q_{23} = Q_{13} - Q_{12}, \quad (9)$$

$Q_{23} = Q_{\text{взр}}$ - теплота взрыва ВВ, кДж/моль

$Q_{13} = \sum_{i=1}^n q_{\text{ПВ}i}$ - суммарная теплота образования продуктов взрыва с учетом их грамм-молей, кДж/моль

$Q_{12} = \sum_{i=1}^n q_{\text{ВВ}i}$ - суммарная теплота образования компонентов ВВ с учетом их грамм-молей, кДж/моль

4. Расчет температуры газообразных продуктов взрыва

Температура газообразных ПВ рассчитывается по формуле:

$$T_{\text{взр}} = \frac{-\sum n_i a_i + \sqrt{(\sum n_i a_i)^2 + 4 \sum n_i b_i \cdot Q_{\text{взр}} \cdot 10^3}}{2 \sum n_i b_i}, \quad (10)$$

где $T_{\text{взр}}$ - температура продуктов взрыва, °С;

n_i - число молей одноименных газов;

$Q_{\text{взр}}$ - теплота взрыва, кДж/моль;

$a_i b_i$ - эмпирические коэффициенты i -го компонента ПВ.

В таблице 1 приведены значения эмпирических коэффициентов a и b , предложенные Г. Кастом.

Таблица 1

Значения эмпирических коэффициентов a и b

Тип газа	a , Дж/моль·°С	b , Дж/моль·°С
Двухатомные (CO, H ₂ , O ₂ , N ₂ , NO)	20,1	18,86·10 ⁻⁴
Трехатомные (CO ₂ , NO ₂)	41,1	24,30·10 ⁻⁴
Четырехатомные	41,9	18,86·10 ⁻⁴
Пятиатомные	50,28	18,86·10 ⁻⁴
Пары воды (H ₂ O)	16,76	90,10·10 ⁻⁴
Твердые компоненты ПВ (C, Al ₂ O ₃)	24,97	0

5. Определение объема газообразных ПВ

Объем газообразных ПВ определяется по реализации взрывчатого превращения ВВ на основе закона Авогадро, согласно которому объем, занимаемый одним молем газа при температуре 0°С и давлении 1,01·10⁵ Па, равен 22,4 л.

Отсюда получаем выражение для определения объема ПВ (м³/кг):

- для индивидуального ВВ

$$V_{\text{ПВ}} = \frac{22,4 \cdot (n_1 + n_2 + \dots n_i)}{M_{\text{ВВ}}}, \quad (11)$$

где n_1, n_2, \dots - количество грамм-молекул газообразных ПВ

$M_{\text{ВВ}}$ - молекулярная масса ВВ, г·моль

- для многокомпонентного смесового ВВ

$$V_{\text{ПВ}} = \frac{22,4 \cdot (n_1 + n_2 + \dots n_i)}{1000} \quad (12)$$

6. Расчет давления газообразных ПВ

Давление газов в зарядной камере при взрыве конденсированных ВВ может быть определено, исходя из объединенных законов Бойля-Мариотта и Гей-Люссака с поправкой Ван-дер-Ваальса:

$$P = \frac{P_0 \cdot V_{\text{ПВ}} \cdot T_{\text{взр}}}{273 \cdot (V - \alpha)}, \quad (13)$$

где P_0 - атмосферное давление газов при 0°C , $P_0 = 1,01 \cdot 10^5$ Па;
 $T_{\text{взр}}$ - температура взрыва в градусах по Кельвину, К:

$$T_{\text{взр}} = T(^{\circ}\text{C}) + 273^{\circ};$$

V - объем зарядной камеры (заряда ВВ), м^3 ;

$V_{\text{ПВ}}$ - объем ПВ, м^3 ;

α - поправка, учитывающая собственный объем молекул продуктов взрыва – несжимаемая часть газа или коволюм, м^3 .

Заменяем в формуле $V = 1/\Delta$, т.е. на объем, занимаемый 1 кг ВВ при плотности Δ , получаем:

$$P = \frac{P_0 \cdot V_{\text{ПВ}} \cdot T_{\text{взр}} \cdot \Delta}{273 \cdot (1 - \alpha \cdot \Delta)} \quad (14)$$

Величина α зависит от плотности заряжания. Если плотность заряжания ВВ не высока ($\Delta < 1000$ $\text{кг}/\text{м}^3$) приближенно можно принять $\alpha = 0,001 \cdot V_{\text{ПВ}}$. Для более высоких плотностей ($\Delta > 1000$ $\text{кг}/\text{м}^3$) для расчетов принимают $\alpha = 0,0006 \cdot V_{\text{ПВ}}$. Здесь Δ - плотность заряжания ВВ, $\text{кг}/\text{м}^3$.

7. Расчет скорости детонации ВВ

Для приближенной оценки скорости детонации можно воспользоваться выражением:

$$D = D'_{\text{ЭТ}} \sqrt{\frac{Q_{\text{ВВ}}}{Q_{\text{ЭТ}}}}, \quad (15)$$

где D - скорость детонации ВВ, $\text{м}/\text{с}$;

$D'_{\text{эт}}$ - скорость детонации эталонного ВВ при соответствующей плотности заряжания, м/с;

$Q_{\text{ВВ}}$ - теплота взрыва ВВ, кДж/кг;

$Q_{\text{эт}}$ - теплота взрыва эталонного ВВ, кДж/кг.

Скорость детонации эталонного ВВ (аммонита 6ЖВ), равная 3600 м/с при плотности заряжания 1 г/см³, пересчитывается с учетом реальной плотности заряда ВВ по формуле:

$$D'_{\text{эт}} = D_{\text{эт}} + 3500 \cdot (\Delta - 1) \quad (16)$$

Здесь Δ - плотность заряжания ВВ, г/см³.

Методические указания по проведению расчетов в курсовой работе

Часть 1. Расчет термохимических характеристик ВВ

1.1. Расчет кислородного баланса производится по формуле 1.

1.2. Определение группы ВВ по величине КБ формулам 2-4 (см. раздел 1).

1.3. Написание реакции взрывчатого превращения по уравнениям 5-8 с учетом группы ВВ по величине КБ (см. раздел 2).

1.4. Расчет теплоты взрыва производится по закону Гесса по формуле 9 (см. раздел 3).

1.5. Расчет температуры продуктов взрыва производится по формуле 10 (см. раздел 4).

1.6. Расчет объема продуктов взрыва производится по формуле 11 для индивидуальных ВВ и 12 для смесевых ВВ (см. раздел 5).

1.7. Расчет давления продуктов взрыва производится по формуле 14 (см. раздел 6).

1.8. Расчет скорости детонации производится по формулам 15 и 16 (см. раздел 7).

Часть 2. Сравнение полученных расчетных значений со справочными данными

2.1. Все рассчитанные параметры горения и взрыва вещества А заносят в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные значения параметров горения и взрыва вещества А

Термохимические характеристики ВВ	Единица измерения	Значение параметра
Кислородный баланс	%	
Теплота взрыва	кДж	
Температура взрыва	⁰ С	
Объем продуктов взрыва	л	
Давление продуктов взрыва	Па	
Скорость детонации	м/с	

В справочной литературе или в Интернете для взрывчатого вещества находят известные термохимические характеристики и также составляют таблицу справочных значений. Причем здесь необходимо указать, из каких источников взяты эти величины.

2.2. На основании анализа термохимических характеристик вещества сравнения расчетных и экспериментальных значений делают вывод о погрешности расчетных методик

В конце работы формулируются общие выводы по курсовой работе и указывается использованная литература.

II. Определение параметров горения и взрыва горючего вещества

Курсовая работа состоит из трех частей.

Часть 1. Расчет параметров горения и взрыва.

Для вещества А (выбрать в табл. 1 в соответствии с номером варианта задания) рассчитать следующие параметры горения и взрыва:

- адиабатическую температуру горения ($T_{ад}$);
- температуру взрыва ($T_{взр}$);
- концентрационные пределы распространения пламени (КПР);
- минимальную флегматизирующую концентрацию азота (МФК);
- концентрацию горючего в точке флегматизации;
- зависимость КПР от концентрации флегматизатора;
- минимально взрывоопасное содержание кислорода (МВСК);
- температурные пределы распространения пламени (ТПР);
- температуру самовоспламенения ($T_{св}$);
- максимальное давление взрыва (P_{max});
- тротиловый эквивалент вещества ($\eta_{ТНТ}$).

Часть 2. Сравнение полученных расчетных значений со справочными данными

Найти в справочной литературе или в Интернете пожаровзрывоопасные характеристики вещества А и сравнить их с полученными расчетными значениями. Сделать выводы.

Часть 3. Определение параметров взрыва паровоздушной смеси в помещении

Для помещений заданных размеров $a \times b \times h$ (выбрать в табл. 1 в соответствии с номером варианта задания) определить:

- какое количество вещества А (кг) должно испариться в этом помещении, чтобы в нем создалась наиболее взрывоопасная паровоздушная смесь,
- тротиловый эквивалент взрыва этой паровоздушной смеси,

- безопасное расстояние по действию воздушной ударной волны взрыва,

- минимальное количество диоксида углерода (кг), которое потребуется для предотвращения взрыва в этом помещении.

При расчетах принять, что пары вещества равномерно распределены по помещению и помещение относительно герметично. Давление и температуру в помещении считать нормальными.

Варианты заданий по курсовой работе

Номер варианта	Вещество	Химическая формула	Размеры помещения $a \times b \times h$, м
1	амилбензол	$C_{11}H_{26}$	4,0×3,5×3,0
2	трет-амиловый спирт (2-метил-2-бутанол)	$C_5H_{12}O$	5,0×4,0×2,5
3	трет-бутилбензол (2-метил-2-фенилпропан)	$C_{10}H_{14}$	4,5×4,0×3,0
4	2,2-диметилбутан	C_6H_{14}	5,5×4,0×3,0
5	2,4-диметилгексан	C_8H_{18}	6,0×4,5×3,0
6	3,3-диметилгептан	C_9H_{20}	7,0×5,0×3,5
7	2,6-диметил-4-гептанол	$C_9H_{20}O$	6,5×4,0×3,0
8	4,5-диметилоктан	$C_{10}H_{22}$	7,5×5,0×4,0
9	2,2-диметилпентан	C_7H_{16}	8,0×5,5×4,0
10	2,4-диметил-3-пентанол	$C_7H_{16}O$	8,5×5,0×4,0
11	2,4-диметил-3-этилпентан	C_9H_{20}	7,5×4,0×4,0
12	1,4-диэтилбензол	$C_{10}H_{14}$	8,0×5,0×3,5
13	3,5-диэтилтолуол	$C_{11}H_{16}$	9,0×5,5×4,0
14	втор-изоамиловый спирт (3-метил-2-бутанол)	$C_5H_{12}O$	9,5×5,0×4,0
15	изобутиловый спирт (2-метил-1-пропанол)	$C_4H_{10}O$	6,5×6,0×4,0
16	изогексиловый спирт (4-метил-1-пентанол)	$C_6H_{14}O$	10,0×6,0×3,5
17	4-изопропилгептан	$C_{10}H_{22}$	9,5×6,0×4,0
18	п-ксилол (1,4-диметилбензол)	C_8H_{10}	10,0×4,5×3,0
19	2-метил-1-бутанол	$C_5H_{12}O$	6,0×5,0×2,5
20	3-метилгексан (изогептан)	C_7H_{16}	8,5×4,0×3,0
21	2-метилгептан (изооктан)	C_8H_{18}	9,0×6,0×5,5
22	4-метилоктан	C_9H_{20}	6,53,0×3,0
23	3-метилпентан (2-этильутан)	C_6H_{14}	8,0×6,0×4,5
24	4-метил-2-пентанол (метиламиловый спирт)	$C_6H_{14}O$	10,5×6,0×5,0
25	3-метил-4-этилгексан	C_9H_{20}	6,0×4,5×3,0

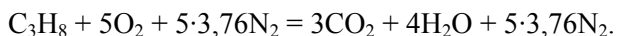
Номер варианта	Вещество	Химическая формула	Размеры помещения $a \times b \times h$, м
26	2-метил-3-этилпентан	C_8H_{18}	8,0×5,0×4,0
27	4-метил-2-этилпентанол (2-этилизогексанол)	$C_8H_{18}O$	7,0×4,0×3,0
28	пентаметилбензол	$C_{11}H_{16}$	6,0×4,0×3,0
29	пропилбензол (фенилпропан)	C_9H_{12}	9,0×5,0×4,0
30	1,2,3,4-тетраметилбензол	$C_{10}H_{14}$	10,0×5,0×4,0
31	2,2,3,3-тетраметилгептан	$C_{11}H_{24}$	10,5×5,0×4,0
32	2,3,3,4-тетраметилпентан	C_9H_{20}	7,0×5,0×4,0
33	1,2,3-триметилбензол	C_9H_{12}	5,0×4,0×3,0
34	2,2,3-триметилбутан	C_7H_{16}	8,0×4,0×3,5
35	3,3,4-триметилгексан	C_9H_{20}	4,0×4,5×3,0
36	2,5,5-триметилгептан	$C_{10}H_{22}$	6,0×3,5×3,0
37	2,2,3-триметилпентан	C_8H_{18}	4,5×5,0×4,0
38	этилбензол	C_8H_{10}	5,5×5,0×3,0
39	3-этилоктан	$C_{10}H_{22}$	7,5×5,0×4,0
40	метаэтилтолуол (1-метил-3-этилбензол)	C_9H_{12}	6,0×6,0×4,5
41	3,3-диэтилпентан	C_9H_{20}	5,5×4,0×3,0
42	втор-октиловый спирт	$C_8H_{18}O$	6,0×4,5×3,0
43	изобутан	C_4H_{10}	7,0×5,0×3,5
44	изобутилбензол	$C_{10}H_{14}$	6,5×4,0×3,0
45	изогексан	C_6H_{14}	7,5×5,0×4,0
46	кумол (изопропилбензол)	C_9H_{12}	8,0×5,5×4,0
47	цимол (1-изопропил-4-метилбензол)	$C_{10}H_{14}$	8,5×5,0×4,0
48	м-ксилол (1,3-диметилбензол)	C_8H_{10}	7,5×4,0×4,0
49	2-метилнонан	$C_{10}H_{22}$	8,0×5,0×3,5
50	3-пентанол	$C_5H_{12}O$	9,0×5,5×4,0

1. Материальный баланс процессов горения

При горении веществ в воздухе происходит быстрая химическая реакция между горючим веществом и кислородом воздуха с интенсивным тепловыделением. В результате этой реакции образуются в основном окислы элементов, входящих в состав горючего вещества. При сгорании углеводородов, состоящих из атомов С и Н, образуется CO_2 (двуокись углерода) и H_2O (вода). При неполном сгорании наряду с ними образуются CO (окись углерода) и $\text{C}_{\text{п(тверд)}}$ (углерод) в виде сажи. При написании уравнения горения и составлении материального баланса, как правило, записывают только продукты полного окисления CO_2 и H_2O . Если в составе горючего вещества есть сера (S), то при сгорании образуется SO_2 . Азот (N), входящий в состав горючего вещества, при горении в воздухе не окисляется, а выделяется в виде свободного азота (N_2). Объясняется это тем, что при горении в воздухе температура горения относительно невысокая (1500-2000 К) и при такой температуре окислы азота не образуются.

Согласно закону сохранения массы количество атомов каждого элемента в левой и правой части химического уравнения должно быть одинаковым. Для того, чтобы уравнивать обе части уравнения, рекомендуется сначала расставить коэффициенты перед окислами в правой части с тем, чтобы уравнивать число атомов элементов горючего вещества (С, Н, S, N ...). Затем, подсчитав количество атомов кислорода в правой части уравнения, поставить коэффициент перед кислородом в левой части уравнения. При этом необходимо учесть кислород, который может входить в состав молекулы горючего вещества (например, как это имеет место в ацетоне $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ или этиловом спирте $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$).

Уравнение материального баланса процесса горения отличается от уравнения химической реакции тем, что в него для удобства расчетов включают азот, содержащийся в воздухе и не участвующий в химическом превращении. Поскольку воздух состоит из 21 % (об.) кислорода и 79 % (об.) азота, т.е. в нем на 1 моль кислорода приходится $79/21 = 3,76$ молей, в уравнении материального баланса перед азотом ставят коэффициент 3,76. Например, уравнение материального баланса для горения пропана будет следующим:



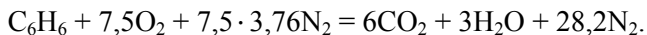
Коэффициент, который записывают перед O_2 (в данном случае 5) необходимо повторить и перед N_2 , так как азот и кислород в воздухе неразделимы.

2. Объем воздуха, необходимый для горения, и объем продуктов горения

Уравнение материального баланса позволяет рассчитывать количество воздуха, необходимое для горения любого горючего вещества и количество образующихся продуктов горения.

Минимальное количество воздуха, необходимое для полного сгорания единицы количества (кг, кмоль, m^3) горючего вещества, называется теоретическим количеством воздуха V_B^0 .

Рассмотрим для примера материальный баланс процесса горения бензола в воздухе:



Из этого уравнения видно, что для полного сгорания 1 кмоль бензола требуется $(7,5 + 7,5 \cdot 3,76)$ кмоль воздуха, который состоит из 7,5 кмоль O_2 и $7,5 \cdot 3,76$ кмоль, не принимающего участия в горении N_2 . При сгорании 1 кмоль бензола образуется 6 кмоль CO_2 , 3 кмоль H_2O и остается не участвовавший в химическом превращении $7,5 \cdot 3,76 = 28,2$ кмоль N_2 .

В общем виде формула для расчета количества воздуха:

$$V_B^0 = \frac{n_{O_2} + n_{N_2}}{n_T}, \quad (17)$$

где n_{O_2} , n_{N_2} , n_T – число кмоль кислорода, азота и горючего вещества в уравнении материального баланса, кмоль.

А для расчета объема продуктов горения:

$$V_B^0 = \frac{n_{CO_2} + n_{N_2}}{n_T}, \quad (18)$$

$$V_{H_2O} = \frac{n_{H_2O}}{n_T}, \quad (19)$$

$$V_{N_2}^0 = \frac{n_{N_2}}{n_T}, \quad (20)$$

где n_{CO_2} , n_{H_2O} , n_{N_2} – количество кмоль веществ в правой части уравнения материального баланса, $V_{N_2}^0$ – объем азота из воздуха, участвовавшего в горении, кмоль/кмоль.

Общий объем продуктов горения определяется по формуле:

$$V_{\text{ПГ}}^0 = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2}^0 \quad (21)$$

Горючая газоздушная смесь, соответствующая уравнению материального баланса называется стехиометрической. В такой смеси нет ничего лишнего, горючее и окислитель находятся в пропорции, обеспечивающей полное ее сгорание.

Для вышеприведенного примера стехиометрическая смесь состоит из 1 объема бензола (пары в газообразном состоянии), 7,5 объемов кислорода и 7,5·3,76 объемов азота. При сгорании такой смеси в продуктах горения будет только CO_2 , H_2O и N_2 в объемах, соответствующих правой части уравнения.

При горении расход воздуха может отличаться от теоретически необходимого. Отношение количества воздуха, участвовавшего в горении к теоретически необходимому, называется коэффициентом избытка воздуха

$$\alpha = \frac{V_B}{V_B^0} \quad (22)$$

Действительный расход воздуха на единицу горючего записывается как $V_B = \alpha \cdot V_B^0$. Разность между действительным и теоретически необходимым количеством воздуха называется избытком воздуха

$$\Delta V = V_{\text{в}} - V_{\text{в}}^0 \text{ или } \Delta V_{\text{в}} = V_{\text{в}}^0 (\alpha - 1) \quad (23)$$

Для стехиометрической смеси $\alpha = 1$ и $\Delta V_{\text{в}} = 0$.

Если горение происходит с избытком воздуха ($\alpha > 1$), то азота в продуктах горения будет больше (добавится азот из избытка воздуха):

$$V_{\text{N}_2} = V_{\text{N}_2}^0 + 0,79\Delta V_{\text{в}} \quad (24)$$

и в продуктах горения появится кислород

$$V_{\text{O}_2} = 0,21\Delta V_{\text{в}} \quad (25)$$

В этом случае полный объем продуктов горения

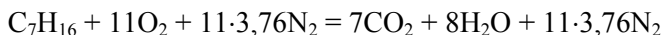
$$V_{\text{пг}} = V_{\text{пг}}^0 + \Delta V_{\text{в}} \quad (26)$$

или

$$V_{\text{пг}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} \quad (27)$$

Для газообразных горючих веществ расчет объемов воздуха и продуктов горения чаще всего проводят в $\text{м}^3/\text{м}^3$. Так как 1 кмоль любого газа в одинаковых условиях занимает один и тот же объем (при нормальных условиях $22,4 \text{ м}^3$), то объем, рассчитанный в $\text{м}^3/\text{м}^3$, численно будет таким же, как и в кмоль/кмоль.

Если горючее вещество находится в конденсированном состоянии (жидком или твердом), то, как правило, расчеты объемов воздуха и продуктов горения проводят в $\text{м}^3/\text{кг}$. Для этого кмоль воздуха или продукта горения переводят в м^3 , умножая на объем одного кмолья газа ($22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$), а кмоль горючего переводят в кг, умножая на массу одного кмолья горючего (M_r , кг/кмоль). Например, при сгорании 1 кг гептана



требуется воздуха

$$V_{\epsilon}^0 = \frac{(n_{O_2} + n_{N_2}) \cdot 22,4}{n_2 \cdot M_2} = \frac{(11 + 11 \cdot 3,76) \cdot 22,4}{1 \cdot 100} = 11,7 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

$$\text{образуется } V_{\epsilon}^0 = \frac{n_{CO_2} \cdot 22,4}{n_2 \cdot M_2} = \frac{7 \cdot 22,4}{1 \cdot 100} = 1,57 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

и далее по химическому уравнению.

3. Теплота сгорания вещества

В основе процесса горения лежит химическая реакция горючего вещества с окислителем, которая происходит с интенсивным тепловыделением. Количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании единицы количества горючего вещества (моль, кг или м³), называют низшей теплотой сгорания Q_H .

Если горючее имеет в своем составе водород, то при его сгорании образуется вода в газообразном состоянии, которая, охлаждаясь, будет конденсироваться. Так как в процессе конденсации паров тепло выделяется, то общее количество теплоты, полученное при сгорании вещества, будет больше на эту величину. Напомним, что количество теплоты, выделяющееся при конденсации паров, равно количеству теплоты, затраченному на парообразование. Тогда:

$$Q_B = Q_H + r, \quad (28)$$

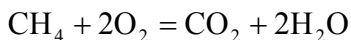
где Q_B – высшая теплота сгорания вещества, а r – удельная теплота парообразования воды.

При расчетах температуры горения пользуются величиной Q_H , так как при температуре горения вода находится в газообразном состоянии. Значения низшей теплоты сгорания вещества (тепловой эффект химической реакции) приводится в справочной литературе. Эта величина может быть рассчитана по закону Гесса, который говорит о том, что тепловой эффект химической реакции равен разности сумм теплоты образования продуктов реакции и теплоты образования исходных веществ:

$$Q_{\text{н}} = \left(\sum \Delta H_{fi}^0 \cdot n_i \right)_{\text{прод}} - \left(\sum \Delta H_{fi}^0 \cdot n_i \right)_{\text{исх}}, \quad (29)$$

где ΔH_{fi}^0 – теплота образования i -того вещества, n_i – количество молей i -го вещества.

Напомним из курса химии, что теплота образования сложного вещества равна количеству теплоты, выделившейся при его образовании из простых веществ. Теплота образования простого вещества (вещества, молекулы которого состоят из атомов одного элемента, например, N_2 , O_2 , H_2 , S , C ...) принимается равной нулю. Теплота образования некоторых горючих веществ приведена в табл. 10 и 11 приложения. При сгорании метана



низшая теплота сгорания, согласно закону Гесса, равна

$$Q_{\text{н}} = \Delta H_{fCO_2}^0 \cdot n_{CO_2} + \Delta H_{fH_2O}^0 \cdot n_{H_2O} - \Delta H_{fCH_4}^0 \cdot n_{CH_4} - \Delta H_{fO_2}^0 \cdot n_{O_2} \quad (30)$$

Учитывая, что кислород – простое вещество и для него $\Delta H_{fO_2}^0 = 0$,

$$Q_{\text{н}} = \Delta H_{fCO_2}^0 \cdot n_{CO_2} + \Delta H_{fH_2O}^0 \cdot n_{H_2O} - \Delta H_{fCH_4}^0 \cdot n_{CH_4} \quad (31)$$

Подставляя значения теплоты образования CO_2 , H_2O и CH_4 из табл. 10 приложения, окончательно получим

$$Q_{\text{н}} = 396,6 \cdot 1 + 242,2 \cdot 2 - 75 = 806 \text{ кДж/моль.}$$

4. Температура горения

Под температурой горения понимают максимальную температуру, до которой нагреваются продукты горения. Принято различать адиабатическую температуру горения, рассчитываемую без учета потерь тепла в окружающее пространство, и действительную температуру горения, учитывающую эти теплопотери.

Для расчета температуры горения составим уравнение теплового баланса, считая, что выделившееся в результате сгорания те-

пло нагревает продукты горения (CO_2 , H_2O , $\text{N}_2\dots$) от начальной температуры T_0 до температуры T_r , увеличивая их теплосодержание.

$$Q_n(1-\eta) = \sum [H_{\text{пр}i}(T_r) - H_{\text{пр}i}(T_0)] \cdot V_{\text{пр}i} \quad (32)$$

где η – коэффициент теплотерь (доля потерь тепла на излучение); $H_{\text{пр}i}(T_r), H_{\text{пр}i}(T_0)$ – значения теплосодержания (энтальпии) i -го продукта горения при температуре горения и начальной температуре; $V_{\text{пр}i}$ – объем i -го продукта горения.

Если теплосодержание продуктов горения при $T = 273 \text{ K}$ принять равным нулю, то

$$Q_n(1-\eta) = \sum [H_{\text{пр}i}(T_g)] \cdot V_{\text{пр}i} \quad (33)$$

Задача состоит в том, чтобы по известной зависимости теплосодержания газов от температуры методом последовательных приближений найти температуру, при которой будет справедливо это равенство.

Напомним, что адиабатическим называют процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой, поэтому температуру горения, рассчитанную при условии отсутствия теплотерь, называют адиабатической. И так для адиабатического процесса, так как $\eta = 0$,

$$Q_n = \sum [H_{\text{пр}i}(T_g)] \cdot V_{\text{пр}i} \quad (34)$$

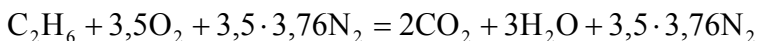
Температура горения зависит от концентрации горючего в горючей смеси. Если горение происходит с избытком воздуха, т.е. при $\alpha > 1$, то выделившееся в результате сгорания тепло частично затрачивается на нагрев этого лишнего воздуха. В горючей смеси с $\alpha < 1$ из-за недостатка воздуха полное сгорание горючего вещества произойти не может, поэтому и тепловыделение в такой смеси будет неполным. Из этого можно сделать вывод, что максимальная температура горения будет при сгорании стехиометрической смеси, т.е. при $\alpha = 1$.

Адиабатическую температуру горения, как правило, рассчитывают для стехиометрической смеси, т.е. при условии $\alpha = 1$.

Разберем пример 1. Найти адиабатическую температуру горения стехиометрической смеси этана с воздухом, начальная температура горючей смеси $T_0 = 273 \text{ К}$.

Решение. Адиабатическую температуру горения вещества находят при условии отсутствия теплопотерь ($\eta = 0$) для стехиометрической смеси горючего с воздухом, т. е. при $\alpha = 1$.

Запишем уравнение горения этана в воздухе



Объем продуктов горения составляет $V_{\text{CO}_2} = 2 \text{ моль} / \text{ моль}$;

$V_{\text{H}_2\text{O}} = 3 \text{ моль} / \text{ моль}$; $V_{\text{N}_2}^0 = 3,5 \cdot 3,76 = 13,2 \text{ моль} / \text{ моль}$.

Избыток воздуха $\Delta V_g = 0$, так как $\alpha = 1$.

Низшую теплоту сгорания этана рассчитаем по закону Гесса, взяв значения теплоты образования веществ из табл. 10 приложения.

$$\begin{aligned} Q_u &= 2\Delta H_{\text{fCO}_2}^0 + 3\Delta H_{\text{fH}_2\text{O}}^0 - \Delta H_{\text{fC}_2\text{H}_6}^0 = 2 \cdot 396,6 + 3 \cdot 242,2 - 88,4 = \\ &= 1431,4 \text{ кДж/моль.} \end{aligned}$$

Так как теплопотери отсутствуют, то все выделившееся тепло идет на нагревание продуктов горения. Среднее теплосодержание продуктов горения будет составлять

$$H_{cp} = \frac{Q_u}{\sum V_{ngi}} = \frac{Q_u}{V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}^0} = \frac{1431,4}{2 + 3 + 13,2} = 78,6 \text{ кДж/моль.}$$

Воспользовавшись зависимостью теплосодержания газов от температуры (табл. 12 приложения), можно установить, какой температуре соответствует такое теплосодержание. Лучше всего это сделать, ориентируясь на азот, так как его больше всего в продуктах горения. Из табл. 12 приложения видно, что при температуре $2300 \text{ }^\circ\text{C}$ теплосодержание азота $77,8 \text{ кДж/моль}$. Уточним, сколько потребовалось бы тепла, чтобы нагреть продукты горения до такой температуры.

При $T_1 = 2300 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_1 = H_{\text{CO}_2} \cdot V_{\text{CO}_2} + H_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} + H_{\text{N}_2} \cdot V_{\text{N}_2}^0,$$

подставляя численные значения теплосодержаний этих газов из табл. 12 приложения, получим

$$Q_1 = 126,9 \cdot 2 + 104,2 \cdot 3 + 77,8 \cdot 13,2 = 1593 \text{ кДж/моль.}$$

Но это больше, чем выделилось тепла в результате реакции горения

$$Q_1 > Q_n$$

Поэтому можно сказать, что температура горения меньше, чем 2300 °С.

Определим, сколько тепла потребуется для нагревания продуктов горения до 2200 °С.

При $T_2=2200^\circ\text{C}$

$$Q_2 = 120,8 \cdot 2 + 98,8 \cdot 3 + 74,1 \cdot 13,2 = 1516 \text{ кДж/моль.}$$

Но и $Q_2 > Q_n$, значит $T_2 < 2200^\circ\text{C}$.

Сделаем следующий шаг (в этом и состоит суть метода последовательных приближений), выберем $T_3 = 2100$ °С, при этой температуре

$$Q_3 = 114,7 \cdot 2 + 93,4 \cdot 3 + 70,4 \cdot 13,2 = 1493 \text{ кДж/моль.}$$

Это совсем немного больше, чем Q_n .

При $T_2=2200^\circ\text{C}$

$$Q_4 = 108,6 \cdot 2 + 88,1 \cdot 3 + 66,8 \cdot 13,2 = 1363 \text{ кДж/моль.}$$

Q_4 уже меньше, чем Q_n , из этого можно сделать вывод, что температура горения имеет значение между 2000 °С и 2100 °С. Уточним эту температуру линейной интерполяцией между двумя этими ближайшими значениями

$$T_2^{ad} = T_4 + \frac{T_3 - T_4}{Q_3 - Q_4} \cdot (Q_n - Q_4) = 2000 + \frac{2100 - 2000}{1439 - 1363} \cdot (1431 - 1363) = 2090^\circ C = 2363 K$$

Для приближенных расчетов действительной температуры горения можно использовать формулу 35

$$T_2 = T_0 + \frac{Q_n(1-\eta)}{\sum C_{p_{ngi}} \cdot V_{ngi}}, \quad (35)$$

где $C_{p_{ngi}}$ – среднее значение теплоемкости i -го продукта горения при постоянном давлении в интервале температур от 273 К до T_2 , которая принята равной 1500 К.

Чем больше полученное значение T_2 отличается от 1500 К, тем большая погрешность вносится в ее определение. Средние значения теплоемкости продуктов горения при постоянном давлении в температурном интервале 273-1500 К приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения теплоемкости продуктов

№ п/п	Вещество	Химическая формула	Удельная теплоемкость, C_{p_i}	
			кДж/(м ³ ·К)	кДж/(моль·К)
1	Азот	N ₂	1,41	3,18 · 10 ⁻²
2	Вода (пар)	H ₂ O	1,78	3,98 · 10 ⁻²
3	Воздух	O ₂ +3,76N ₂	1,44	3,23 · 10 ⁻²
4	Диоксид серы	SO ₂	2,28	5,11 · 10 ⁻²
5	Диоксид углерода	CO ₂	2,27	5,08 · 10 ⁻²
6	Оксид углерода	CO	1,50	3,37 · 10 ⁻²

5. Температура взрыва

Принципиальное различие между горением и взрывом заключается в скорости процесса. При взрыве химическое превращение происходит настолько быстро, что все выделившееся тепло остается в системе, а образовавшиеся продукты не успевают расшириться, т. е. процесс взрыва является адиабатическим и изохорным ($V = \text{const}$). Количество теплоты, выделившееся при взрыве, примерно равно низшей теплоте сгорания вещества $Q_{\text{взр}} \approx Q_n$. Темпера-

тура взрыва значительно выше адиабатической температуры горения, так как при горении часть тепла, выделившегося при химическом превращении, затрачивается на совершение работы расширения газа, а при взрыве все выделившееся тепло расходуется только на увеличение внутренней энергии системы. Учитывая, что $Q_{взр} \approx Q_n$, а изменение энтальпии (теплосодержания) продуктов реакции происходит лишь в результате изменения внутренней энергии ($dH = dU + pdV = dU_{npi} dV = 0$), уравнение теплового баланса для взрыва можно записать в следующем виде

$$Q_n = \sum [U_{nzi}(T_{взр}) - U_{nzi}(T_0)] \cdot V_{nzi}, \quad (36)$$

где $U_{nzi}(T_{взр})$ и $U_{nzi}(T_0)$ – значения внутренней энергии i -го продукта взрыва (горения) при температуре взрыва и начальной температуре.

Если для удобства расчетов принять, что внутренняя энергия газов при $T = 273$ К равна нулю, то полная внутренняя энергия продуктов взрыва при температуре взрыва будет равна количеству теплоты, выделившейся в результате химической реакции

$$Q_n = \sum U_{nzi}(T_{взр}) \cdot V_{nzi}, \quad (37)$$

Температуру взрыва находят методом последовательных приближений так же как адиабатическую температуру горения (см. пример в п. 4). Только при расчетах вместо зависимости теплосодержания от температуры используют зависимость внутренней энергии от температуры (табл. 13 приложения).

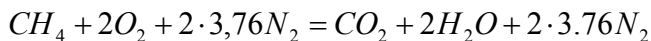
Так как процесс взрыва адиабатно-изохорный (теплопотери отсутствуют и нагревание продуктов происходит без расширения газовой смеси), все выделившееся тепло расходуется на увеличение внутренней энергии системы. Среднее значение внутренней энергии продуктов взрыва составит


$$U_{cp} = \frac{Q_n}{\sum V_{nzi}} = \frac{Q_n}{V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2}^0} \quad (38)$$

Если сравнить полученное значение температуры взрыва с адиабатической температурой горения, можно прийти к выводу, что температура взрыва примерно на 500 К выше адиабатической температуры горения. Таким образом, химическое превращение, протекающее в форме взрыва (изохорно-адиабатический процесс), происходит со значительно большим разогревом.

6. Концентрационные пределы распространения пламени (КПР) и стехиометрическая концентрация

Газовая смесь горючего с окислителем способна воспламениться и распространять пламя только при определенных концентрациях горючего. Минимальная концентрация горючего, при которой смесь способна воспламениться и распространять пламя, называется нижним концентрационным пределом распространения пламени (НКПР), а максимальная концентрация горючего – верхним концентрационным пределом распространения пламени (ВКПР). При концентрациях горючего ниже НКПР и выше ВКПР его смеси с воздухом негорючи. Например, для метана CH_4 концентрационные пределы распространения пламени составляют НКПР – 5 об. %, а ВКПР – 15 об. % (см. табл. 18 приложения), для аммиака NH_3 НКПР – 15 об. %, а ВКПР – 28 об. %. Скорость распространения пламени и его температура минимальны в предельных смесях, т.е. при концентрациях горючего, равных НКПР и ВКПР. Максимальные значения скорости и температуры пламени, как правило, имеют смеси стехиометрического состава. Поэтому эти смеси наиболее пожаровзрывоопасны. Концентрацию горючего в стехиометрической смеси рассчитывают по уравнению материального баланса процесса горения. Например, из уравнения горения видно, что стехиометрическая смесь метана с воздухом




 стехиометрическая смесь

содержит 1 моль метана, 2 моля кислорода и 2 · 3,76 молей азота. Концентрация горючего в такой смеси

$$\varphi_{смex} = \frac{n_{CH_4} \cdot 100}{n_{CH_4} + n_{O_2} + n_{N_2}} = \frac{1 \cdot 100}{1 + 2 + 2 \cdot 3,76} = 9,5\%$$

Для некоторых газов стехиометрические концентрации приведены в табл. 18 приложения. Значения концентрационных пределов распространения пламени, приведенные в справочной литературе, установлены экспериментально. В настоящем методическом указании для некоторых веществ они приведены в табл. 18 и 19 приложения. Для большинства веществ их можно приближенно рассчитать.

7. Расчет КПП по аппроксимационной формуле

Значения как нижнего, так и верхнего концентрационных пределов распространения пламени (КПП) можно рассчитать по аппроксимационной формуле

$$\varphi_{n(\epsilon)} = \frac{100}{a \cdot n + b}, \quad (39)$$

где n – число молей кислорода, необходимое для полного сгорания одного моля горючего вещества, находят из уравнения реакции горения (стехиометрический коэффициент при кислороде); a и b – константы, имеющие определенные значения для нижнего и верхнего пределов в зависимости от значения n , приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения констант а и b

Область применения	a	b
Для вычисления нижнего предела	8,684	4,679
Для вычисления верхнего предела		
при $n < 7,5$	1,55	0,56
при $n > 7,5$	0,768	6,554

8. Зависимость КПП от концентрации флегматизатора

Концентрационная область распространения пламени горючей смеси сужается при введении негорючих компонентов. Изменение концентрационных пределов зависит от природы и концентрации негорючего вещества, используемого в качестве флегматизатора.

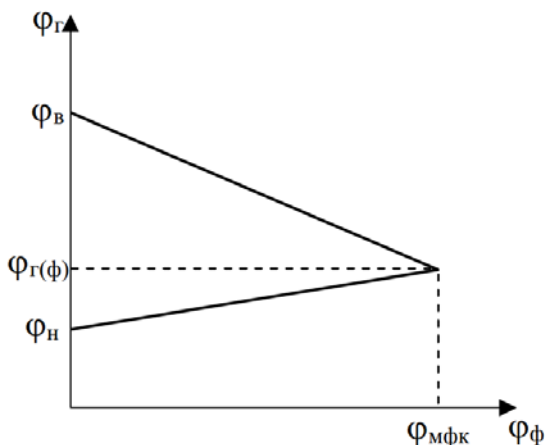


Рис. 1. Зависимость концентрационных пределов распространения пламени от концентрации флегматизатора в газовой смеси

Чаще всего в качестве флегматизаторов используют нейтральные газы (нераагирующие в пламени), такие, как углекислый газ CO_2 , азот N_2 , водяной пар H_2O . При увеличении концентрации флегматизатора в горючей смеси верхний концентрационный предел уменьшается, а нижний, как правило, незначительно увеличивается. При некоторой определенной для каждого флегматизатора концентрации нижний и верхний концентрационные пределы смыкаются (рис. 1). Эта точка называется экстремальной точкой области распространения пламени или точкой флегматизации. Концентрация флегматизатора, при которой происходит смыкание нижнего и верхнего концентрационных пределов, называется минимальной флегматизирующей концентрацией (МФК). По сути, это минимальное ко-

личество флегматизатора, которое необходимо ввести в газоздушную смесь стехиометрического состава, чтобы сделать ее негорючей. Речь идет о стехиометрической смеси, так как она наиболее пожаровзрывоопасна.

Минимальную флегматизирующую концентрацию можно рассчитать, если исходить из того, что адиабатическая температура горения смеси стехиометрического состава не может быть меньше 1500 К.

Если за предельную адиабатическую температуру горения принять температуру, равную 1500 К, то достаточно точно расчет МФК можно провести по уравнению (19), которое для этого случая запишется

$$T_z = \frac{Q_n}{\sum C p_i \cdot V_{nzi} + C p_\phi \cdot V_\phi}, \quad (40)$$

где $C p_\phi$ – среднее значение теплоемкости флегматизатора при постоянном давлении для температурного интервала 273-1500 К, V_ϕ – количество флегматизатора в исходной горючей смеси. Тогда из (24) получим

$$V_\phi = \frac{Q_n - (T_z - T_0) \cdot \sum C p_{nzi} \cdot V_{nzi}}{(T_z - T_0) \cdot C p_\phi} \quad (41)$$

Если в уравнение (25) подставить значение $T_z = 1500$ К, то получим количество флегматизатора в исходной горючей смеси, при котором достигается эта предельная температура горения.

$$V_\phi = \frac{Q_n - (1500 - T_0) \cdot \sum C p_{nzi} \cdot V_{nzi}}{(1500 - T_0) \cdot C p_\phi}, \quad (42)$$

где $T_0 = 273$ К.

А минимальная флегматизирующая концентрация в % об. составит:

$$\varphi_{\text{мфк}} = \frac{V_{\phi} \cdot 100}{V_{\text{з}} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\phi}} \quad (43)$$

или

$$\varphi_{\text{мфк}} = \frac{n_{\phi} \cdot 100}{n_{\text{з}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} + n_{\phi}} \quad (44)$$

При расчете МФК принимают, что при сгорании горючего вещества на этом пределе углерод, содержащийся в нем, окисляется в основном до СО.

Концентрацию горючего в смеси, соответствующей точке флегматизации, в % об.

$$\varphi_{\text{з}(\phi)} = \frac{V_{\text{з}} \cdot 100}{V_{\text{з}} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\phi}} \quad (45)$$

или

$$\varphi_{\text{з}(\phi)} = \frac{n_{\text{з}} \cdot 100}{n_{\text{з}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} + n_{\phi}} \quad (46)$$

Концентрацию кислорода в этой же смеси (в точке флегматизации) называют минимальным взрывоопасным содержанием кислорода (МВСК), она будет равна

$$\varphi_{\text{O}_2(\phi)} = \frac{V_{\text{O}_2} \cdot 100}{V_{\text{з}} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\phi}} \quad (47)$$

или

$$\varphi_{\text{O}_2(\phi)} = \frac{n_{\text{O}_2} \cdot 100}{n_{\text{з}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} + n_{\phi}} \quad (48)$$

Значения МВСК, полученные экспериментально для некоторых газовоздушных смесей при разбавлении их CO_2 , приведены в табл. 18 приложения.

9. Температурные пределы распространения пламени (ТПР)

Температурными пределами распространения характеризуют пожарную опасность жидких горючих веществ. Нижний температурный предел распространения (НТПР) – это температура жидкости, при которой концентрация насыщенных паров над ее поверхностью равна НКПР. Аналогично при верхнем температурном пределе распространения пламени (ВТПР) концентрация насыщенных паров жидкости равна ВКПР. Из этого следует, что если для горючего вещества известны КПР, то по зависимости давления насыщенного пара от температуры могут быть найдены температурные пределы.

Допустим, известен НКПР пламени паров горючей жидкости. Необходимо найти НТПР, т. е. температуру, при которой концентрация насыщенных паров над поверхностью этой жидкости будет равна НКПР. По концентрации паров φ_n (значение НКПР) можно найти парциальное давление насыщенных паров

$$P_n = \frac{\varphi_n \cdot P_0}{100}, \quad (49)$$

где P_0 – атмосферное давление (общее давление паровоздушной смеси).

По давлению насыщенного пара нетрудно установить соответствующую температуру жидкости, которая и будет значением НТПР. Зависимость давления насыщенного пара от температуры для большинства жидкостей известна и приведена в справочной литературе в виде таблиц, графиков или задана уравнением Антуана $\lg P = f(T)$ (табл. 11 приложения)

$$\lg P = A - \frac{B}{C + t} \quad (50)$$

или

$$t = \frac{B}{A - \lg P} - C \quad (51)$$

где где P выражено в кПа, а t в °С; A , B , C – константы уравнения Антуана

10. Температура самовоспламенения

Температура самовоспламенения $T_{\text{св}}$, приведенная в справочниках, получена экспериментально по стандартной методике для горючей смеси стехиометрического состава. Установлено, что в пределах гомологического ряда величина $T_{\text{св}}$ является функцией длины углеродной цепи в молекуле. Чем длиннее цепь, тем ниже температура самовоспламенения. Метод расчета $T_{\text{св}}$ основан на эмпирической зависимости $T_{\text{св}}$ от средней длины углеродной цепи.

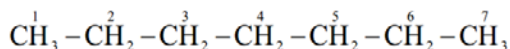
Метод пригоден для расчета $T_{\text{св}}$ алифатических углеводородов, алифатических спиртов и ароматических углеводородов.

Задача состоит в том, чтобы по структурной формуле химического соединения найти для него среднюю длину углеродных цепей.

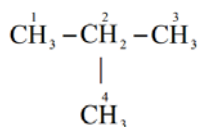
Углеродная цепь – это цепочка атомов углерода от одного конца молекулы до другого.

Длина цепи – это число атомов углерода в такой цепи.

Например, в нормальном гептане одна углеродная цепь и ее длина равна 7.




В изобутане три цепи с одинаковой длиной (1–2–3, 1–2–4 и 3–2–4), длина каждой цепи равна 3. Средняя длина углеродных цепей в этом соединении тоже равна 3



Определив среднюю длину цепи, далее по табл. 15–17 приложения находят $T_{св}$. Например, для *n*-гептана $T_{св} = 496$ К, а для изобутана $T_{св} = 743$ К. (табл. VII приложения для предельных углеводородов).

В молекуле химического соединения со сложной структурой бывает трудно сразу найти все углеродные цепи. Поэтому для определения числа цепей используют формулу:

$$m = \frac{M_p \cdot (M_p - 1)}{2}, \quad (52)$$

где M_p – число концевых функциональных групп, таких как: метил (-CH₃), гидроксил (-ОН) и фенил ()

Например, в *n*-гептане две группы CH₃, т. е. $M_p = 2$, из формулы (36) следует, что число цепей равно 1. В изобутане $M_p = 3$, подставляя это значение в формулу (36), получим $m = 3$.

11. Максимальное давление взрыва

Максимальное давление взрыва – это давление, которое возникает в результате сгорания или детонации парогазовых смесей в изохорно-адиабатических условиях. При сгорании парогазовой смеси в замкнутом объеме изменение давления в системе вызвано повышением температуры и изменением числа молей газа, которое происходит в результате химического превращения. Исходя из этого, максимальное давление взрыва парогазовых смесей рассчитывают по формуле

$$P_{взр}^{\max} = P_0 \cdot \frac{T_{взр} \cdot n_{пр}}{T_0 \cdot n_c}, \quad (53)$$

где P_0 , T_0 и n_c – давление, температура и количество молей горючей смеси до взрыва; $T_{взр}$ и $n_{пр}$ – температура взрыва и количество молей продуктов горения.

Количество молей газовой смеси до взрыва n_c и после взрыва n_{n_2} рассчитываются по формулам

$$n_c = n_c + n_{O_2} + n_{N_2} \quad (54)$$

$$n_{n_2} = n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{N_2} \quad (55)$$

12. Мощность взрыва

Для оценки мощности взрыва используется понятие тротилового эквивалента. Известно, что при взрыве 1 кг тротила выделяется энергия, равная $Q_{ТНТ} = 4,19 \cdot 10^3$ кДж/кг. Исходя из этого, мощность любого взрыва можно условно характеризовать количеством тротила, которое может произвести во взрыве выделение такого же количества энергии.

Количество тротила или тротиловый эквивалент взрыва будет равен

$$M_{ТНТ} = \frac{Q_{взр} \cdot m \cdot \gamma}{Q_{ТНТ}}, \quad (56)$$

где $Q_{взр}$ – количество теплоты (энергии), выделяющейся при взрыве в кДж/кг; m – масса горючего вещества, участвующего во взрыве; γ – доля потенциальной энергии, перешедшей в кинетическую энергию взрыва.

При взрыве парогазовой смеси углеводородных топлив в ограниченном объеме (оборудование, помещение) коэффициент γ принимают равным 1, при взрыве в неограниченном объеме (взрыв облака парогазовой смеси) коэффициент γ , как правило, принимают равным 0,4.

Учитывая, что $Q_{взр} \approx Q_u$, уравнение (40) можно записать в виде

$$M_{THT} = \frac{Q_n \cdot m \cdot \gamma}{Q_{THT}}, \quad (57)$$

Величину η_{THT} называют тротильным эквивалентом вещества

$$\eta_{THT} = \frac{Q_n}{Q_{THT}} \quad (58)$$

Размер безопасной зоны по действию давления ударной воздушной волны взрыва $R_{\text{без}}$, м, рассчитывают по формуле

$$R_{\text{без}} = 15 \cdot \sqrt[3]{M_{THT}} \quad (59)$$

IV. Методические указания по проведению расчетов в курсовой работе

Часть 1. Расчет параметров горения и взрыва

1.1. Для определения адиабатической температуры горения необходимо знать объем продуктов горения и количество теплоты, выделившееся при сгорании вещества. Объем продуктов горения находят из уравнения материального баланса (см. раздел 1 и 2), а теплоту сгорания вещества Q_n по закону Гесса (см. раздел 3). Расчет адиабатической температуры горения T_c^{ad} проводят методом последовательных приближений, используя зависимость теплосодержания продуктов горения от температуры (см. раздел 4).

1.2. Температуру взрыва находят тем же методом последовательных приближений, только в этом случае используют зависимость внутренней энергии продуктов горения (взрыва) от температуры (см. раздел 5).

1.3. Расчет концентрационных пределов распространения пламени (КПР) рекомендуется провести по аппроксимационной формуле 23 (см. раздел 6).

1.4. Для расчета минимальной флегматизирующей концентрации (МФК) азота в паровоздушной смеси используют уравнение теплового баланса и понятие предельной адиабатической температуры горения (см. раздел 7).

1.5. Концентрацию горючего в точке флегматизации находят по формуле 29 или 30 (см. там же, раздел 7).

1.6. По полученным расчетным значениям КПР, МФК и концентрации горючего в точке флегматизации строят графическую зависимость концентрационных пределов распространения пламени от концентрации флегматизатора (см. там же, раздел 8).

1.7. Минимальное взрывоопасное содержание кислорода (МВСК) рассчитывают по формуле 31 или 32 (раздел 9).

1.8. Температурные пределы распространения пламени (ТПР) определяют по расчетным значениям концентрационных пределов. Для установления зависимости давления паров жидкости от температуры необходимо использовать уравнение Антуана (см. раз-

дел 8). Значения констант в уравнении Антуана приведены в табл. 11 приложения настоящих методических указаний. Обратите внимание, что в этой таблице коэффициенты A , B и C приведены для случая, когда давление (P) выражено в кПа, а температура (t) в $^{\circ}C$.

1.9. Температуру самовоспламенения веществ (T_{cv}) определяют по средней длине углеродной цепи (см. раздел 10). Структурные формулы веществ приводятся в табл. 14 приложения.

1.10. Максимальное давление взрыва $P_{взр}^{max}$ рассчитывают по формуле (37) (см. раздел 11), в которой используют полученное ранее значение температуры взрыва.

1.11. Тротильный эквивалент вещества ($\eta_{ТНТ}$) определяют по формуле 42 (см. раздел 12).

Часть 2. Сравнение полученных расчетных значений со справочными данными

2.1. Все рассчитанные параметры горения и взрыва вещества A заносят в табл. 6.

Таблица 6

Расчетные значения параметров горения и взрыва вещества A

Параметр горения и взрыва	Значение параметра
Адиабатическая тем-ра горения, $T_{ад}$	
Тем-ра взрыва, $T_{взр}$	
КПР	
МФК (N_2)	
МВСК	
ТПР	
Тем-ра самовоспламенения, T_{cv}	
Максимальное давление взрыва, P_{max}	
Тротильный эквивалент вещества, $\eta_{ТНТ}$	

В справочной литературе или в Интернете для вещества A находят известные показатели пожарной опасности вещества и также составляют таблицу справочных значений. Причем здесь необходимо указать, из каких источников взяты эти величины.

Справочные значения показателей пожарной опасности вещества А

Показатель пожарной опасности						
Значения показателя						

2.2. На основании анализа параметров горения и взрыва вещества А и сравнения расчетных и экспериментальных значений делают вывод о пожарной опасности вещества и погрешности расчетных методик

Часть 3. Определение параметров взрыва паровоздушной смеси в помещении

3.1. Количество вещества A (в кг), которое должно испариться в помещении размерами $a \times b \times h$ чтобы в тем создалась наиболее взрывоопасная паровоздушная смесь, находят из условия образования в помещении паровоздушной смеси стехиометрического состава. Для этого из уравнения материального баланса горения находят стехиометрическую концентрацию вещества A (см. пример расчета стехиометрической концентрации метана в разделе 6). По рассчитанной концентрации вещества и известному объему помещения находят объем паров вещества A . Зная объем паров, рассчитывают их массу, воспользовавшись понятием киломоля вещества (см. раздел 1).

3.2. Тритиловый эквивалент взрыва ($M_{ТНТ}$) парогазовой смеси в помещении рассчитывают по формуле 40 (см. раздел 12), принимая, что теплота взрыва приблизительно равна низшей теплоте сгорания вещества, а доля потенциальной энергии перешедшей в кинетическую энергию взрыва (γ) при взрыве паровоздушной смеси в помещении равна 1.

3.3. Размер безопасной зоны ($R_{без}$) по действию давления воздушной ударной волны находят по формуле 43 (см. там же, раздел 12).

3.4. Для определения количества диоксида углерода (M_{CO_2} в кг), необходимого для предотвращения взрыва в помещении, находят его минимальную флегматизирующую концентрацию как в пункте 1.4, затем его объем и массу как в пункте 3.1.

3.5. Результаты расчетов, выполненных по пунктам 3.1-3.4, оформляются в виде таблицы (табл. 8).

Таблица 8

Параметры взрыва паровоздушной смеси вещества А в помещении объемом V , m^3

Расчетные параметры	Численные значения параметра
Наиболее взрывоопасная концентрация вещества А в паровоздушной смеси, $\varphi_{стех}$, % (об.)	
Количество вещества, создающее наиболее взрывоопасную паровоздушную смесь в помещении m , кг	
Троилловый эквивалент взрыва $M_{ТНТ}$, кг	
Безопасное расстояние по действию воздушной ударной волны $R_{без}$, м	
Количество необходимого CO_2 для предотвращения взрыва M_{CO} , кг	

В конце работы формулируются общие выводы по курсовой работе и указывается использованная литература.

V. Приложение

Таблица 9

Атомные массы некоторых элементов

Название	Химический знак	Порядковый номер	Атомная масса
Азот	N	7	14,00
Водород	H	1	1,01
Кислород	O	8	16,00
Сера	S	16	32,06
Углерод	C	6	12,01

Таблица 10

Основные физические константы некоторых газов

Название или химическая формула	M , кг/кмоль	θ , кг/м ³	$T_{пл}$, К	$T_{кип}$, К	OH_f^0 , кДж/моль
Воздух	28,98	1,293	60	81	0
CO	28,01	1,250	68	81	112,7
CO ₂	44,01	1,977	216,4	194,5	396,9
CH ₄	16,04	0,717	90,5	112,4	75
C ₂ H ₆	30,06	1,357	90,5	184,4	88,4
C ₃ H ₈	44,10	2,019	85,6	230,9	109,4
H ₂	2,02	0,090	13,8	20,3	0
H ₂ O (пар)	18,02	0,768	273	373,0	242,2
N ₂	28,01	1,251	63	77,2	0
O ₂	32,00	1,429	54,6	90,1	0

Примечание. M – молекулярная масса газа; θ – плотность при нормальных условиях; $T_{пл}$ и $T_{кип}$ – температуры плавления и кипения при давлении 101,325 кПа; OH_f^0 – теплота образования.

Таблица 11

Теплота образования веществ, температура кипения и значения коэффициентов А, В, С

№	Вещество	Теплота образования ΔH_f , кДж/моль	Температура кипения, °С	Коэффициенты уравнения Антуана		
				А	В	С
1	амилбензол	34,4	202,0	6,68328	2069,48	210,431
2	трет-амиловый спирт	330,0	102,3	6,44711	1252,21	180,301
3	трет-бутилбензол	22,68	168,0	6,68934	1911,89	239,664
4	2,2-диметилбутан	177,8	49,7	5,93476	1127,18	228,9
5	2,4-диметилгексан	219,4	109,4	5,97799	1287,87	214,79
6	3,3-диметилгептан	241,6	137,0	6,21073	1509,58	221,989
7	2,6-диметил-4-гептанол	412,1	176,5	5,66299	1144,81	135,0
8	4,5-диметилотоктан	253,4	162,1	6,31873	1645,43	219,378
9	2,2-диметилпентан	206,1	79,2	5,93972	1190,03	223,303
10	2,4-диметил-3-пентанол	370,5	138,7	5,61923	1029,6	146,1
11	2,4-диметил-3-этилпентан	235,0	136,7	6,16233	1490,02	221,908
12	1,4-диэтилбензол	22,2	183,8	6,41434	1820,63	230,413
13	3,5-диэтилтолуол	56,0	201,0	6,50299	1926,65	229,367
14	втор-изоамиловый спирт	314,2	112,0	6,9421	1090,9	157,2
15	изобутиловый спирт	283,2	107,8	7,83005	2058,39	245,642
16	изогексильный спирт	325,7	151,6	7,05114	1273,35	153,56
17	4-изопропилгептан	251,1	158,0	6,31693	1628,49	219,75
18	п-ксилол	24,4	138,3	6,25485	1537,08	223,608
19	2-метил-1-бутанол	305,8	128,0	6,29693	1258,33	109,165
20	3-метилгексан	194,9	92,0	5,99812	1236,02	219,545
21	2-метилгептан	215,5	117,6	6,0423	1337,46	213,693
22	4-метилоктан	233,3	142,4	6,27293	1553,08	221,45
23	3-метилпентан	171,6	63,3	5,97380	1152,36	227,129
24	4-метил-2-пентанол	344,2	133,0	7,59199	2174,86	257,78

Продолжение табл. 11

№	Вещество	Теплота образования ΔH_f , кДж/моль	Температура кипения, $^{\circ}\text{C}$	Коэффициенты уравнения Антуана		
				<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
25	3-метил-4-этилгексан	229,9	140,6	6,21413	1524,09	221,543
26	2-метил-3-этилпентан	211,2	115,6	5,98851	1318,12	215,306
27	4-метил-2-этилпентанол	385,0	177,3	5,70756	1134,59	129,195
28	пентаметилбензол	73,5	232,0	6,68333	2069,48	210,431
29	пропилбензол	7,9	159,0	6,29713	1627,82	220,499
30	1,2,3,4-тетраметилбензол	41,9	204,5	6,24188	1693,15	195,234
31	2,2,3,3-тетраметилгептан	276,2	184,0	6,28723	1715,27	216,609
32	2,3,3,4-тетраметилпентан	236,2	141,5	5,98454	1417,47	214,705
33	1,2,3-триметилбензол	9,46	176,1	6,44298	1791,16	227,844
34	2,2,3-триметилбутан	204,8	80,8	5,91723	1200,56	226,05
35	3,3,4-триметилгексан	235,9	140,4	6,15073	1499,42	221,333
36	2,5,5-триметилгептан	269,0	152,8	6,24873	1587,25	220,119
37	2,2,3-триметилпентан	220,0	109,8	5,95039	1294,87	218,42
38	этилбензол	29,9	136,2	6,35879	1590,66	229,581
39	3-этилоктан	251,1	166,4	6,38063	1686,45	219,039
40	метаэтилтолуол	1,8	161,3	6,35228	1676,53	224,676
41	3,3-диэтилпентан	231,9	146,0	6,01755	1451,24	215,575
42	втор-октиловый спирт	380,5	178,5	6,02004	1335,88	151,798
43	изобутан	134,5	11,7	5,95318	916,054	243,783
44	изобутилбензол	21,5	172,8	6,72744	1977,89	246,029
45	изогексан	174,3	60,3	5,96403	1135,41	226,572

Окончание табл. 11

№	Вещество	Теплота образования ΔH_f , кДж/моль	Температура кипения, $^{\circ}\text{C}$	Коэффициенты уравнения Антуана		
				<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
46	кумол (изопропилбензол)	21,5	152,4	6,06756	1461,64	207,56
47	цимол (1-изопропил-4-метилбензол)	-28,8	177,0	6,64988	1893,38	232,655
48	м-ксилол (1,3-диметилбензол)	28,4	139,0	6,58807	1906,79	234,917
49	2-метилнонан	256,8	167,0	6,12003	1521,3	202,75
50	3-пентанол	316,0	116,0	6,57423	1354,42	183,41

Таблица 12

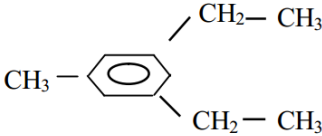
Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении

Температура, $T, ^\circ\text{C}$	H, кДж/моль					
	O ₂	N ₂	Воздух	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
0	0	0	0	0	0	0
100	3,0	2,9	2,9	3,8	3,3	4,1
200	6,0	5,8	5,8	8,0	6,8	8,5
300	9,1	8,8	8,9	12,5	10,4	13,2
400	12,4	11,8	11,9	17,3	14,0	18,2
500	15,7	14,9	15,1	22,3	17,8	23,3
600	19,1	18,1	18,3	27,5	21,7	28,5
700	22,5	21,3	21,5	32,8	25,8	33,9
800	26,0	24,6	24,8	38,2	29,9	39,3
900	29,6	28,0	28,2	43,8	34,2	44,8
1000	33,1	31,3	31,6	49,4	38,6	50,3
1100	36,8	34,8	35,1	55,1	43,2	55,9
1200	40,4	38,2	38,6	60,9	47,8	61,5
1300	44,0	41,7	42,1	66,8	52,6	67,2
1400	47,7	45,3	45,6	72,7	57,4	72,3
1500	51,5	48,8	49,2	78,6	62,3	78,4
1600	55,2	52,4	52,8	84,6	67,3	84,1
1700	59,0	55,9	56,4	90,5	72,4	89,8
1800	62,8	59,5	60,0	96,6	77,6	95,6
1900	66,6	63,1	63,6	102,6	82,8	101,2
2000	70,4	66,8	67,3	108,6	88,1	107,1
2100	74,2	70,4	71,0	114,7	93,4	112,7
2200	78,1	74,1	74,7	120,8	98,8	118,5
2300	82,0	77,8	78,4	126,9	104,2	124,2
2400	85,9	81,5	82,1	133,0	109,6	130,0
2500	89,9	85,1	85,9	139,1	115,1	135,8
2600	94,0	89,0	89,3	145,3	119,4	141,5
2700	97,9	92,6	93,1	151,5	124,8	147,3
2800	101,8	96,4	96,8	157,6	130,3	153,0
2900	105,1	100,5	100,5	163,8	135,8	158,8
3000	110,1	103,8	104,2	169,9	141,2	164,7

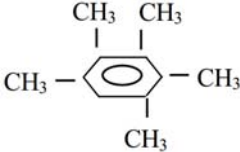

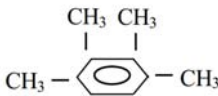
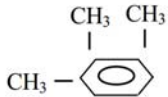
Таблица 13

Внутренняя энергия газов

Температура $T, ^\circ\text{C}$	$U, \text{кДж/моль}$						Температура $T, ^\circ\text{C}$
	O_2	N_2	Воз- дух	CO_2	H_2O	SO_2	
0	0	0	0	0	0	0	0
100	2,2	2,1	2,1	2,9	2,5	3,3	100
200	4,1	4,1	4,1	6,3	5,1	6,8	200
300	6,6	6,3	6,4	10,0	7	10,7	300
400	9,1	8,5	8,6	14,6	10,7	14,9	400
500	11,5	10,7	10,9	18,1	13,6	19,1	500
600	14,1	13,1	13,3	22,5	16,7	23,5	600
700	16,7	15,5	15,7	27,0	20	28,1	700
800	19,4	18	18,1	31,6	23,3	32,7	800
900	22,1	20,5	20,7	36,3	27,7	37,3	900
1000	24,8	23	23,3	41,1	30,3	42	1000
1100	27,7	25,7	26,0	46,0	34,1	46,8	1100
1200	30,4	28,2	28,6	50,9	37,8	51,5	1200
1300	33,2	30,9	31,3	56	41,8	56,4	1300
1400	35,1	33,7	34,0	61,1	45,8	61,2	1400
1500	39,0	36,3	36,7	66,1	49,8	65,9	1500
1600	41,9	39,1	39,5	71,3	54,0	70,8	1600
1700	44,9	41,8	42,3	76,4	58,3	75,7	1700
1800	47,8	44,5	45,0	81,6	62,6	80,6	1800
1900	50,8	47,3	47,8	86,8	67,0	85,4	190
2000	53,8	50,2	50,7	92,0	71,5	90,5	2000
2100	56,7	52,9	53,5	97,2	75,9	95,2	2100
2200	59,8	55,8	56,4	102,5	80,5	100,2	2200
2300	62,9	58,7	59,3	107,8	85,1	105,1	2300
2400	65,9	61,6	62,2	113,0	89,7	110,0	2400
2500	69,1	64,3	65,1	118,3	94,3	115	2500
2600	72,4	67,4	67,7	123,7	97,8	120,0	2600
2700	75,5	70,2	70,7	128,9	102,4	124,9	2700
2800	78,5	73,1	73,5	134,2	107,0	130,0	2800
2900	81,0	76,4	76,9	139,7	111,7	134,7	2900
3000	85,2	78,9	79,3	145,0	116,3	139,8	3000

№	Название	Химическая формула	Структурная формула
9	2,2-диметилпентан	C_7H_{16}	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 - \text{C} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$
10	2,4-диметил-3-пентанол	$C_7H_{16}O$	$\begin{array}{c} \text{OH} \\ \\ \text{CH}_3 - \text{CH} - \text{CH} - \text{CH} - \text{CH}_3 \\ \qquad \qquad \\ \text{CH}_3 \qquad \qquad \text{CH}_3 \end{array}$
11	2,4-диметил-3-этилпентан	C_9H_{20}	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 - \text{CH} - \text{CH} - \text{CH} - \text{CH}_3 \\ \qquad \qquad \\ \text{CH}_3 \quad \text{CH}_2 \quad \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$
12	1,4-диэтилбензол	$C_{10}H_{14}$	$\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{CH}_2 - \text{CH}_3$
13	3,5-диэтилтолуол	$C_{11}H_{16}$	
14	втор-изоамиловый спирт (3-метил-2-бутанол)	$C_5H_{12}O$	$\begin{array}{c} \text{OH} \quad \text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{CH}_3 - \text{CH} - \text{CH} - \text{CH}_3 \end{array}$
15	изобутиловый спирт (2-метил-1-пропанол)	$C_4H_{10}O$	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{OH} - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_3 \end{array}$
16	изогексиловый спирт (4-метил-1-пентанол)	$C_6H_{14}O$	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{OH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_3 \end{array}$

№	Название	Химическая формула	Структурная формула
17	4-изопропилгептан	$C_{10}H_{22}$	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 - \text{CH} - \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \end{array}$
18	п-ксилол (1,4-диметилбензол)	C_8H_{10}	$\text{CH}_3 - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{CH}_3$
19	2-метил-1-бутанол	$C_5H_{12}O$	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{OH} - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \end{array}$
20	3-метилгексан (изогептан)	C_7H_{16}	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \end{array}$
21	2-метилгептан (изооктан)	C_8H_{18}	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \end{array}$
22	4-метилоктан	C_9H_{20}	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 \\ \qquad \qquad \qquad \\ \text{CH}_3 \qquad \qquad \qquad \text{CH}_3 \end{array}$
23	3-метилпентан (2-этилбутан)	C_6H_{14}	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \end{array}$
24	4-метил-2-пентанол (метиламиловый спирт)	$C_6H_{14}O$	$\begin{array}{c} \text{OH} \qquad \qquad \text{CH}_3 \\ \qquad \qquad \qquad \\ \text{CH}_3 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_3 \end{array}$
25	3-метил-4-этилгексан	C_9H_{20}	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \end{array}$

№	Название	Химическая формула	Структурная формула
26	2-метил-3-этилпентан	C_8H_{18}	$ \begin{array}{c} CH_3 \\ \\ CH_3 - CH - CH - CH_2 - CH_3 \\ \\ CH_2 - CH_3 \end{array} $
27	4-метил-2-этилпентанол (2-этилизогексанол)	$C_8H_{18}O$	$ \begin{array}{c} CH_2 - CH_3 \\ \\ OH - CH_2 - CH - CH_2 - CH - CH_3 \\ \\ CH_3 \end{array} $
28	пентаметилбензол	$C_{11}H_{16}$	
29	пропилбензол (фенилпропан)	C_9H_{12}	$CH_3 - CH_2 - CH_2 - $ 
30	1,2,3,4-тетраметилбензол	$C_{10}H_{14}$	
31	2,2,3,3-тетраметилгептан	$C_{11}H_{24}$	$ \begin{array}{c} CH_3 \quad CH_3 \\ \quad \\ CH_3 - C - C - CH_2 - CH_2 - CH_2 \\ \quad \quad \\ CH_3 \quad CH_3 \quad CH_3 \end{array} $
32	2,3,3,4-тетраметилпентан	C_9H_{20}	$ \begin{array}{c} CH_3 \quad CH_3 \quad CH_3 \\ \quad \quad \\ CH_3 - CH - C - CH - CH_3 \\ \\ CH_3 \end{array} $
33	1,2,3-триметилбензол	C_9H_{12}	

№	Название	Химическая формула	Структурная формула
34	2,2,3-триметилбутан	C_7H_{16}	$ \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 - \text{C} - \text{CH} - \text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \end{array} $
35	3,3,4-триметилгексан	C_9H_{20}	$ \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{C} - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \end{array} $
36	2,5,5-триметилгептан	$C_{10}H_{22}$	$ \begin{array}{c} \text{CH}_3 \qquad \qquad \qquad \text{CH}_3 \\ \qquad \qquad \qquad \\ \text{CH}_3 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{C} - \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} $
37	2,2,3-триметилпентан	C_8H_{18}	$ \begin{array}{c} \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{CH}_3 - \text{C} - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} $
38	этилбензол	C_8H_{10}	$ \text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{C}_6\text{H}_5 $
39	3-этилоктан	$C_{10}H_{22}$	$ \begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \qquad \qquad \qquad \text{CH}_3 \\ \qquad \qquad \qquad \\ \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} $
40	метаэтилтолуол (1-метил-3-этилбензол)	C_9H_{12}	$ \begin{array}{c} \qquad \qquad \qquad \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \\ \qquad \qquad \qquad / \\ \text{CH}_3 - \text{C}_6\text{H}_4 \end{array} $
41	3,3-диэтилпентан	C_9H_{20}	$ \begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{C} - \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \end{array} $

Таблица 15

Температура самовоспламенения некоторых предельных углеводородов в зависимости от средней длины углеродной цепи

A_{cp}	T_{cb}, K	A_{cp}	T_{cb}, K	A_{cp}	T_{cb}, K	A_{cp}	T_{cb}, K
3,0	743	6,0	507	9,0	482	12,0	477
3,1	738	6,1	505	9,1	481	12,1	477
3,2	733	6,2	504	9,2	481	12,2	477
3,3	728	6,3	503	9,3	481	12,3	477
3,4	723	6,4	502	9,4	480	12,4	477
3,5	717	6,5	501	9,5	480	12,5	477
3,6	712	6,6	500	9,6	480	12,6	477
3,7	706	6,7	499	9,7	480	12,7	477
3,8	699	6,8	498	9,8	479	12,8	477
3,9	693	6,9	497	9,9	479	12,9	477
4,0	686	7,0	496	10,0	479	13,0	477
4,1	680	7,1	495	10,1	479	13,1	477
4,2	673	7,2	494	10,2	479	13,2	477
4,3	665	7,3	494	10,3	479	13,3	477
4,4	654	7,4	493	10,4	478	13,4	477
4,5	643	7,5	492	10,5	478	13,5	476
4,6	631	7,6	491	10,6	478	13,6	476
4,7	617	7,7	490	10,7	478	13,7	476
4,8	601	7,8	489	10,8	478	13,8	476
4,9	581	7,9	489	10,9	478	13,9	476
5,0	560	8,0	488	11,0	478	14,0	476
5,1	547	8,1	487	11,1	478	14,1	476
5,2	535	8,2	486	11,2	478	14,2	476
5,3	528	8,3	486	11,3	478	14,3	476
5,4	522	8,4	485	11,4	478	14,4	476
5,5	517	8,5	484	11,5	478	14,5	476
5,6	513	8,6	484	11,6	477	14,6	476
5,7	511	8,7	483	11,7	477	14,7	476
5,8	509	8,8	483	11,8	477	14,8	476
5,9	508	8,9	482	11,9	477	14,9	476
—	—	—	—	—	—	15,0	475

Таблица 16

Температура самовоспламенения некоторых предельных одноатомных спиртов в зависимости от средней длины углеродной цепи

A_{cp}	T_{cb}, K	A_{cp}	T_{cb}, K	A_{cp}	T_{cb}, K	A_{cp}	T_{cb}, K
2,0	737	4,4	610	6,8	545	9,2	518
2,1	736	4,5	606	6,9	543	9,3	517
2,2	734	4,6	602	7,0	542	9,4	516
2,3	732	4,7	599	7,1	540	9,5	516
2,4	730	4,8	595	7,2	539	9,6	515
2,5	728	4,9	592	7,3	537	9,7	514
2,6	725	5,0	588	7,4	536	9,8	513
2,7	721	5,1	585	7,5	535	9,9	513
2,8	716	5,2	582	7,6	534	10,0	512
2,9	711	5,3	579	7,7	533	10,5	509
3,0	706	5,4	577	7,8	531	11,0	507
3,1	696	5,5	574	7,9	530	11,5	506
3,2	693	5,6	572	8,0	529	12,0	505
3,3	636	5,7	569	8,1	528	12,5	505
3,4	678	5,8	567	8,2	527	13,0	504
3,5	669	5,9	564	8,3	526	13,5	504
3,6	658	6,0	562	8,4	525	14,0	503
3,7	649	6,1	560	8,5	524	14,5	503
3,8	642	6,2	557	8,6	523	15,0	502
3,9	634	6,3	555	8,7	522	15,5	502
4,0	628	6,4	553	8,8	521	16,0	501
4,1	623	6,5	551	8,9	520	16,5	501
4,2	619	6,6	549	9,0	519	17,0	500
4,3	614	6,7	547	9,1	519	17,5	500

Таблица 17

Температура самовоспламенения некоторых предельных одноатомных спиртов в зависимости от средней длины углеродной цепи

A_{cp}	T_c, K	A_{cp}	T_c, K	A_{cp}	T_c, K
-2	843	-	-	-	-
-1,9	842	0,1	810	2,1	702
-1,8	841	0,2	794	2,2	701
-1,7	840	0,3	774	2,3	701
-1,6	840	0,4	753	2,4	700
-1,5	839	0,5	733	2,5	700
-1,4	838	0,6	723	2,6	699
-1,3	837	0,7	718	2,7	699
-1,2	837	0,8	715	2,8	698
-1,1	836	0,9	713	2,9	698
-1	835	1	712	3	697
-0,9	835	1,1	711	3,1	697
-0,8	834	1,2	710	3,2	697
-0,7	833	1,3	709	3,3	697
-0,6	832	1,4	708	3,4	696
-0,5	831	1,5	707	3,5	696
-0,4	830	1,6	706	3,6	696
-0,3	829	1,7	705	3,7	696
-0,2	827	1,8	704	3,8	696
-0,1	824	1,9	703	3,9	696
0	819	2	703	4	695

Таблица 18

Показатели пожарной опасности некоторых газов

Название вещества	Метан	Водород	Окись углерода	Ацетилен	Аммиак
T_{sv}, K	810	783	883	608	923
$KIP, об. \%$	5-15	4-74,2	12,5-74,2	2-81	15-28
$U_{пр}, м/с$	0,37	2,67	0,42	1,35	0,23
МВСК при разбавлении CO_2	15,6	7,9	9,8	9	16,2
$E_{min}, мДж$	0,26	0,017	–	–	680
CO_2	26	62	53	57	–
N_2	39	76	69	70	–
T_{17}, K	1927	2072	2000	2307	1777
Стехиометрическая концентрация горючего	9,5	29,5	28,5	7,7	21,9
$Q_{пр}, кДж/моль$	806	242,2	283,9	1260	317,2

Показатели пожарной опасности некоторых газов

Название вещества	Сероводород	Этилен	Бутан	Пропан	Этан
Т _{св} , К	519	813	678	739	745
КПР, об. %	4,3–45,5	3,75–29,6	1,86–8,41	2,37–9,5	3,22–12,45
U _п , м/с	–	0,63	0,37	0,38	0,40
МВСК при разбавлении CO ₂	8	12,1	14,9	14,3	13,8
E _{мин} , мДж	–	0,12	0,25	0,25	0,24
Огнетушащая концентрация, об. %	62	42	29	32	34
	–	52	41	45	46
T _п , К	–	2067	2010	1987	1922
Стехиометрическая концентрация горючего	12,24	6,5	3,12	4,02	5,64
Q _п , кДж/моль	–	1326	2665	2049	1431

Показатели пожарной опасности некоторых газов

Название вещества	Доменный газ	Природный газ	Коксовый газ
Тсв, К	–	923	913
КПР, об. %	6,5–73,9	5,1-12,1	5,6-30,8
U_{12} , м/с	–	–	–
МВСК при разбавлении CO_2	–	–	–
$E_{плыв}$, м/Дж	–	–	–
CO_2	Огнетушащая концентрация, об. %	–	–
		–	–
N_2	Т _г , К	–	–
		–	–
Стехиометрическая концентрация горючего		–	–
$Q_{гв}$, кДж/моль		–	–

Примечание. Состав газовых смесей: коксовый газ CO – 6,8 %, CO_2 – 2,8 %, N_2 – 7,8 %, H_2 – 58 %, CH_4 – 22,5 %; природный газ CO – 3,3 %, CH_4 – 94 %, C_nH_m – 2,5 %; доменный газ CO – 28 %, CO_2 – 10,5 %, N_2 – 58,5 %, H_2 – 2,7 %, CH_4 – 0,3 %.

Таблица 19

Показатели пожарной опасности некоторых газов

Наименование вещества	$T_{\text{всп}}, K^*$	$T_{\text{всп}}, K^{**}$	ТПР, К	$T_{\text{св}}, K$	КПР, об. %	$T_{\text{г}}, K$	$Q_{\text{г}}, \text{кДж/моль}$	$E_{\text{мин}}, \text{мДж}$	$V_{\text{вып}}, \text{см}^3/\text{ч}$	МВСК (при CO_2)
Ацетон	255	268	253-278	738	2,2-13	2160	1668	-	20	14,9
Бензол	262	-	259-286	807	1,4-7,1	2375	3141	0,22	30	14,4
Гексан	250	-	247-277	507	1,2-7,5	2238	3864	0,25	-	14,6
Глицерин 98 %	411	476	455-480	668	2,6-11,3	-	1483	-	-	-
Пентан	229	239	225-250	560	1,4-7,8	2007	-	0,22	-	14,8
Метанол	281	286	280-312	737	6-34,7	-	642	-	-	13,4
Этанол	286	-	284-314	677	3,6-19	-	1242	-	12-15	14,9
Пропанол-1	296	302	-	644	2,1-13,5	-	1852	-	-	-
Бутанол-1	307	314	307-341	618	1,7-12	-	2456	-	-	-
Амиловый спирт	300-316	-	321-353	573	1,2-10	-	3077	-	-	-
Толуол	277	-	273-303	763	1,3-6,7	2344	3741	-	20	-
Диэтиловый эфир	232	-	228-286	437	1,7-49	-	2514	0,2	-	13
Уксусноэтиловый эфир	275	-	274-304	673	3,5-16,8	-	2075	-	-	-
Этиленгликоль	939	-	385-397	663	3,8-6,4	-	1064	-	-	-
Бензин А-76	239	-	239-269	573	0,79-5,16	2375	46928**	-	-	-
Керосин тракторный	300	-	300-342	533	1,4-7,5	-	41481-46090**	-	-	-

Окончание табл. 19

Наименование вещества	$T_{всп}, K^*$	$T_{всп}, K^{**}$	ТПР, К	$T_{ср}, K$	КПР, об. %	$T_{г}, K$	$Q_{гн},$ кДж/моль	$E_{мин},$ мДж	$V_{выг},$ см ³ /ч	МВСК (при CO ₂)
Трансформаторное масло	-	-	395-396	573	-	-		-	-	-
Вазелиновое масло	420	-	397-463	563	-	-		-		
Масло подсолнечное	502	-	477-502	643	-	-		-	-	-
Нефть	252	-	252-298	593	-	-		-	-	-
Скипидар	307	-	305-326	573	0,8	-		-	-	-

РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Основной

1. *Адамян, В.Л.* Теория горения и взрыва: учебное пособие / В.Л. Адамян. СПб: Лань, 2018. 116 с.
2. *Эквист, Б.В.* Теория горения и взрыва: учебник / Б.В. Эквист. М.: МИСИС, 2018. 180 с.
3. *Лесникова Н.П.* Теория горения и взрыва: учебное пособие / Н.П. Лесникова. Кемерово: КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2015. 118 с.
4. Теория горения и взрыва / О.М. Зиновьева, Б.С. Мастрюков, А.М. Меркулова, Н.А. Смирнова. М.: МИСИС, 2014. 102 с.
5. *Керученко, Л.С.* Теория горения и взрыва: учебное пособие / Л.С. Керученко, М.С. Чекусов. Омск: Омский ГАУ, 2018. 140 с.

Дополнительный

6. *Андросов А.С.* Теория горения и взрыва: учебное пособие / А.С. Андросов, И.Р. Бегишев, Е.П. Салеев. М.: Академия ГПС МЧС России. 2007. 240 с.
7. *Андросов А.С.* Примеры и задачи по курсу «Теория горения и взрыва»: учебное пособие / А.С. Андросов, Е.П. Салеев. М.: Академия ГПС МЧС России. 2008. 80 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Расчет термодимических характеристик смеси взрывчатых веществ.....	5
Определение параметров горения и взрыва горючего вещества.....	13
Приложение.....	44
Рекомендуемый библиографический список	64

ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

*Методические указания к курсовой работе
для студентов бакалавриата направления 20.03.01
и специальности 21.05.04*

Сост.: *Ю.И. Виноградов, В.В. Должиков, С.В. Хохлов*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
взрывного дела

Ответственный за выпуск *В.В. Должиков*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 24.01.2020. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 3,8. Усл.кр.-отт. 3,8. Уч.-изд.л. 3,3. Тираж 100 экз. Заказ 31. С 10.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2