

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Казанский государственный аграрный университет»

Кафедра «Биотехнология, животноводство и химия»

**ПРАКТИКУМ**

**ПО КУРСУ «ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА»**

Для студентов Института механизации и технического сервиса  
очной и заочной форм обучения  
(издание второе, дополненное)

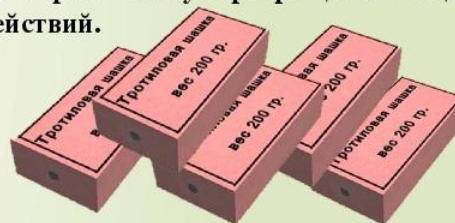
**ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗРЫВЧАТЫХ  
ВЕЩЕСТВ**

**Скорость детонации** - это скорость распространения фронта детонационной волны относительно исходного неподвижного вещества.



**Чувствительностью ВВ** - называется большая или меньшая способность к взрывчатому превращению под влиянием внешних воздействий.

**Энергия взрывчатого превращения** - это количество тепла, которое выделяется при взрыве 1 кг тротила.



**Бризантность** – это возможность ВВ дробить предметы, находящиеся рядом с ним. Бризантные ВВ подходят для снаряжения мин, бомб, снарядов, т.к. дают осколкам наибольшую скорость и ударную волну.

**Фугасность** – это способность разрушить и выбросить с заданной территории взрыва, находящиеся рядом материалы (кирпич, бетон и т.д.).



УДК 662.61  
ББК 24.54  
Г 77

Составитель:       доцент, к.х.н. Халиуллина З.М.

Рецензенты:   Заведующий кафедрой пищевой биотехнологии ФГБОУ ВО  
                  «КНИТУ», д.х.н. Сысоева М.А.  
                  Заведующий кафедрой техносферной безопасности  
                  Казанского ГАУ, к.т.н. Гаязиев И.Н.

Практикум по курсу «Теория горения и взрыва» утвержден и рекомендован к печати на заседании кафедры «Биотехнология, животноводство и химия» Казанского ГАУ 05 апреля 2021г. протокол № 10.

Практикум по курсу «Теория горения и взрыва» (издание второе, дополненное) обсужден, одобрен и рекомендован к печати на заседании методической комиссии агрономического факультета Казанского ГАУ 14 апреля 2021 г. протокол № 7. Он предназначен для студентов 3 курса Института механизации и технического сервиса направления подготовки: 20.03.01. «Техносферная безопасность» очной и заочной форм обучения.

Содержит основные разделы дисциплины «Теории горения и взрыва». В нем имеются справочные исходные данные для расчета материального и теплового баланса, содержатся вопросы теоретического и практического характера, приведены примеры решения задач по теории горения и взрыва и задачи для выполнения контрольных заданий для студентов очной и заочной формы обучения.

Халиуллина З.М. Практикум по курсу «Теория горения и взрыва» издание второе дополненное – Казань: Изд-во Казанского ГАУ, 2021. – 60с.

УДК 662.61  
ББК 24.54  
Г 77

Г.

## Содержание

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Материальный баланс процессов горения</b>   | <b>4</b>  |
| 1.1. Общие сведения о процессах горения   | 4         |
| 1.2. Материальный баланс процессов горения  | 6         |
| 1.2.1 Составление уравнений реакции горения   | 6         |
| 1.2.2. Расчет объема воздуха и объема продуктов горения                                 | 6         |
| <b>Контрольная работа 1</b>   | <b>11</b> |
| <b>2. Тепловой баланс процессов горения</b>   | <b>13</b> |
| 2.1. Расчет теплоты сгорания вещества   | 13        |
| 2.2. Расчет температуры горения   | 14        |
| 2.3. Расчет температуры взрыва  | 20        |
| <b>Контрольная работа 2</b>   | <b>23</b> |
| <b>3. Расчет концентрационных пределов распространения пламени</b>                      | <b>26</b> |
| 3.1. Газовоздушные горючие смеси  | 26        |
| 3.2. Расчет КПП по аппроксимационной формуле  | 26        |
| 3.3. Зависимость КПП от концентрации флегматизатора                                     | 28        |
| <b>4. Температурные параметры пожарной опасности</b>                                    | <b>32</b> |
| 4.1. Температурные пределы распространения пламени (ТПР)                                | 32        |
| 4.2. Температура самовоспламенения  | 33        |
| <b>5. Параметры взрыва газо- и паровоздушных смесей</b>                                 | <b>37</b> |
| 5.1. Расчет максимального давления взрыва   | 37        |
| 5.2. Расчет мощности взрыва и безопасного расстояния по действию воздушных ударных волн | 38        |
| <b>6. Контрольная работа для студентов заочной формы обучения</b>                       | <b>43</b> |
| <b>7. Рекомендуемая литература</b>  | <b>46</b> |
| <b>8. Приложения</b>  | <b>46</b> |

## **Раздел 1. Материальный баланс процессов горения**

### **1.1. Общие сведения о процессах горения**

**Горение** — это химическая реакция окисления при взаимодействии горючего вещества и окислителя, которая сопровождается физическими процессами (выделением большого количества теплоты и излучением света. Необходимыми условиями возникновения горения являются три основных фактора:

1. наличие горючего вещества,
2. окислителя (это обычно оксиды азота, кислород воздуха, хлор, бром и т.д.
3. источника воспламенения (пламя, раскаленные предметы, электрическая или механическая искра или др. импульсы).

**Различают два главных вида горения: полное и неполное.** Полное горение всегда обусловлено достаточным или избыточным количеством кислорода и в основном сопровождается образованием паров воды и оксида углерода (IV) (углекислого газа). Неполное горение характеризуется недостаточным количеством кислорода и оно более опасное, так как при горении образуется токсичный оксид углерода (II) (угарный газ) и другие газы. Максимальная скорость горения наблюдается в чистом кислороде, а наименьшая — при содержании в воздухе менее 14% кислорода, горение полностью прекращается (для большинства веществ) при содержании кислорода в воздухе менее 10 %.

**Горение бывает гомогенным и гетерогенным.** Гомогенное горение — когда все взаимодействующие вещества имеют одно и то же агрегатное состояние, например, жидкое или газообразное. При гетерогенном горении все реагирующие вещества состоят в различных агрегатных состояниях и фазы горючей системы имеют границы раздела. В природе существует несколько видов процесса возникновения горения.

**Самовозгорание** — явление резкого увеличения скорости экзотермических реакций, приводящих к появлению горения горючего вещества (материала, смеси) **без источника зажигания.** Различают химическое, тепловое и микробиологическое самовозгорание. Самовозгорание происходит из-за отвода тепла, выделяющегося в ходе реакции, в окружающую среду.

**Самовоспламенение** — самовозникновение горения, сопровождающееся возникновением пламени. Процессы самовозгорания и самовоспламенения аналогичны, форма горения разная (самовозгорание происходит без источника) зажигания.

**Возгорание** — появление горения при помощи источника зажигания.

**Воспламенение** — возгорание, когда появляется пламя.

**Вспышка** — резкое сгорание горючей смеси, при горении появление сжатых газов не наблюдается

**Взрыв** — чрезвычайно быстрое химическое (взрывчатое вещество) или физическое превращение, сопровождающееся образованием сжатых газов и выделением энергии, способных производить разрушение объектов. Взрыв

бывает **химический** и **физический**. При химическом взрыве горючие вещества (твердые, жидкие и газообразные) взаимодействуют с окислителем, происходит лавинообразная, цепная реакция. При химическом взрыве происходит неконтролируемое высвобождение потенциальной энергии паров, сжатых газов и жидкостей замкнутых объемах сосудов, аппаратов и машин.

**Взрывчатое вещество (ВВ)** – химическое вещество или смесь веществ, способных под влиянием внешних воздействий к взрыву с выделением большого количества тепла и газообразных продуктов. По взрывчатым свойствам и по значению все ВВ подразделяются на три группы:

- 1) **инициирующие (первичные)** – гремучая ртуть, азид свинца, тетразен, тринитрорезорцинат свинца)
- 2) **бризантные (вторичные)** – тротил, нитрометан, тетрил, гексоген, октоген, нитроглицерин
- 3) **метательные** – пороха и пиросоставы

**Пожароопасность** материалов определяется вероятностью горения и зажигания веществ в равных условиях. Основными показателями пожарной опасности являются температура самовоспламенения и взрывной предел.

**Температура самовоспламенения** – это минимальная температура реагирующей среды, при которой происходит самоускорение реакции.

**Температура вспышки** - самая низкая температура конденсированного летучего вещества, при которой пары над поверхностью вещества могут вспыхнуть в воздухе под влиянием источника зажигания, однако, устойчивое горение после удаления источника зажигания не происходит.

Горение это система связанных между собой химических и физических процессов. Главные процессы при горении – это **массоперенос и теплоперенос** (перенос теплоты и вещества). Важным свойством горения является возможность возникшего очага пламени передвигаться по всей горючей смеси путем передачи тепла или путем диффузионного переноса нагретых частиц из зоны горения в свежую смесь. В первом случае механизм распространения пламени называется **тепловым**, во втором – **диффузионным**. Обычно горение происходит по комбинированному механизму, включающему как теплообмен, так и диффузию горючих компонентов и продуктов горения. По скорости перемещение пламени горение делится на детонацию и дефлаграцию.

**Дефлаграционное горение** – это такой вид горения, при котором пламя перемещается с дозвуковой скоростью (скорость звука при температуре 20°С 343 м/с). При детонации пламя распространяется со сверхзвуковой скоростью, например, в воздухе – со скоростью более 300 м/с. Дозвуковое горение бывает двух видов: турбулентное и ламинарное. Скорость **ламинарного горения** зависит от начальных значений температуры и давления, состава смеси, а также от скорости химических преобразований в пламени. Скорость перемещения **турбулентного** пламени зависит не только от указанных факторов, но и от скорости потока, степени и масштаба турбулентности.

## 1.2. Материальный баланс процессов горения

### 1.2.1 Составление уравнений реакции горения

В уравнение материального баланса процесса горения включают азот, содержащийся в воздухе (содержание азота в воздухе составляет 79%, кислорода 21%, поэтому на один моль кислорода приходится 3,76 молей азота ( $\frac{79}{21}$ ) и перед азотом ставится коэффициент 3,76. Например, уравнение материального баланса для горения толуола ( $C_6H_5CH_3$ ) будет следующим

$$C_7H_8 + 9O_2 + 9 \cdot 3,76N_2 = 7CO_2 + 4H_2O + 9 \cdot 3,76N_2.$$

Коэффициент, который записывают перед  $O_2$  (в данном случае 9) необходимо повторить и перед  $N_2$ , поскольку азот воздуха в реакции горения не участвует, он выделяется из зоны горения вместе с продуктами горения.

**Коэффициент горючести индивидуального вещества** – это безразмерная величина, используемая для приближенного вычисления температуры вспышки вещества и нижнего концентрационного коэффициента распространения пламени. Если значение коэффициента  $K$  меньше 1 ( $K < 1$ ), то вещество не горючее, если  $K$  больше или равно 1 ( $K \geq 1$ ), то вещество является горючим.

Для проведения расчетов используется следующая формула (1):

$$K = 4 n(C) + 4 n(S) + n(H) + n(N) - 2 n(O) + 2 n(Cl) - 3 n(F) - 5 n(Br) \quad (1)$$

где  $n(Эл)$  – число атомов соответственно углерода, серы, водорода, азота, кислорода, хлора, фтора и брома.

### 1.2.2. Расчет объема воздуха и объема продуктов горения

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

Минимальное количество воздуха, нужное для полного сгорания единицы количества (кг, кмоль,  $m^3$ ) горючего вещества, называется **теоретическим количеством воздуха**  $V_v^0$ .

Для удобства расчетов горючие вещества разделяют на 4 группы (табл.1): индивидуальные химические соединения (в газообразном и конденсированном состоянии); вещества сложного состава (древесина, торф, нефть и т.п.); смесь газов (генераторный, попутный газы и т.п.).

Расчётные формулы для определения теоретического количества воздуха, необходимого для сгорания веществ приведены в таблице 1.

Таблица 1.Расчётные формулы для определения теоретического количества воздуха, необходимого для сгорания веществ

| №<br>п/п | Группа горючих<br>веществ  | Расчётные формулы   | Размер<br>ность                |
|----------|--|---|--------------------------------|
| 1        | Индивидуальные<br>горючее вещество в<br>газообразном<br>состоянии        | $V_B^{\text{теор}} = \frac{n_{O_2} + n_{N_2}}{n_{\Gamma}} \quad (2)$                      | м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> |
| 2        | Смесь газов  | $V_B^{\text{теор}} = \frac{\sum \beta \cdot \varphi_i - \varphi_{O_2}}{21} \quad (3)$     | м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> |
| 3        | Вещество сложного<br>состава<br>в<br>конденсированном<br>состоянии       | $V_B^{\text{теор}} = 0,269 \left( \frac{C}{3} + H + \frac{S-O}{8} \right) \quad (4)$      | м <sup>3</sup> /кг             |
| 4        | Индивидуальное<br>горючее вещество<br>в<br>конденсированном<br>состоянии | $V_B^{\text{теор}} = \frac{(n_{O_2} + n_{N_2}) V_t}{n_{\Gamma B} M_{\Gamma B}} \quad (5)$ | м <sup>3</sup> /кг             |

Примечание:

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

$M_{\Gamma B}$  – молекулярная масса горючего вещества;

$V_t$  – молекулярный объем газа при заданных условиях, м<sup>3</sup>/кмоль;

C, H, S, O – весовое содержание соответствующих элементов в составе горючего вещества, % масс.;

$\sum \beta \cdot \varphi$  – сумма произведений стехиометрического коэффициента реакций горения каждого компонента горючей смеси ( $\beta$ ) на процентное содержание этого компонента ( $\varphi$ ) в смеси;

$\varphi_{O_2}$  – процентное содержание кислорода в сложном горючем газе.

Для газообразных горючих веществ расчет объемов воздуха и продуктов горения проводят в м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Так как 1 моль любого газа в одинаковых условиях занимает один и тот же объем (при нормальных условиях 22,4 м<sup>3</sup>), то объем рассчитанный в м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, численно будет таким же, как и в кмоль/кмоль.

Если горючее вещество находится в конденсированном состоянии (жидком или твердом), то расчеты объемов воздуха и продуктов горения проводят в м<sup>3</sup>/кг. А для расчета объема продуктов горения пользуются формулами, приведенными в таблице 2:



Таблица 2.Расчётные формулы для определения объема продуктов горения

| №<br>п<br>/<br>п | Группа<br>горючих<br>веществ                                | Расчётные формулы   | Размер<br>ность                |
|------------------|---|---|--------------------------------|
| 1                | Индивидуальное горючее вещество в газообразном состоянии    | $V_{\text{ПГ}}^{\text{теор}} = \frac{\sum n_{\text{ПГ}}}{n_{\text{ГВ}}} \quad (6)$  | м <sup>3</sup> /м              |
| 2                | Смесь газов   | $V_{\text{ПГ}}^{\text{теор}} = \sum \frac{\sum n_{\text{ПГ}_i} \cdot \varphi - \varphi_{\text{O}_2}}{n_{\text{ГВ}_i} \cdot 100} + \frac{\varphi_{\text{негор.г}}}{100} \quad (7)$   | м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> |
| 3                | Вещество сложного состава в конденсированном состоянии      | $V_{\text{ПГ}}^{\text{теор}} = 1,86 \cdot \frac{C}{100} + \left( 11,2 \cdot \frac{H}{100} + 1,24 \cdot \frac{W}{100} \right) + 0,7 \frac{S}{100} + \frac{1}{100} \cdot \left[ 7C + 21 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2,63S + 0,8N \right] + \frac{\varphi_{\text{негор.г}}}{100} \quad (8)$ | м <sup>3</sup> /кг             |
| 4                | Индивидуально горючее вещество в конденсированном состоянии | $V_{\text{ПГ}}^{\text{теор}} = \frac{\sum n_{\text{ПГ}} \cdot V_t}{n_{\text{ГВ}} \cdot M_{\text{ГВ}}} \quad (9)$  | м <sup>3</sup> /кг             |

Расчётные формулы для определения теоретического объёма продуктов горения:

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{n_{\text{CO}_2}}{n_{\text{Г}}} \quad (10) \quad V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{Г}}} \quad (11) \quad V_{\text{N}_2}^0 = \frac{n_{\text{N}_2}}{n_{\text{Г}}}, \quad (12)$$

где  $n_{\text{CO}_2}$ ,  $n_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $n_{\text{N}_2}$  - количество кмоль  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$  в правой части уравнения материального баланса. Общий объем продуктов горения равен сумме объемов углекислого газа, паров воды и азота:

$$V_{\text{ПГ}}^{\text{теор}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}^{\text{теор}} \quad (13)$$

Горючая газозоудшная 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 толуола (пары в конденсированном состоянии), 9 объемов кислорода и 9 -3,76 объемов азота. При сгорании такой смеси в продуктах горения будет только  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$  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**

$$\alpha = \frac{V_B}{V_B^0} \quad (14)$$

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

$$\Delta V = V_B - V_B^0 \quad (15) \text{ или } \Delta V_B = V_B^0 (\alpha - 1) \quad (16)$$

Для стехиометрической смеси  $\alpha = 1$  и  $\Delta V_g = 0$ .

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

$$V_{\text{N}_2} = V_{\text{N}_2}^0 + 0,79 \Delta V_B \quad (17)$$

и в продуктах горения появится кислород

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \Delta V_B \quad (18)$$

Полный объем продуктов горения в этом случае будет

$$V_{\text{ПГ}} = V_{\text{ПГ}}^0 + \Delta V_B \quad (19) \text{ или } V_{\text{ПГ}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} \quad (20)$$

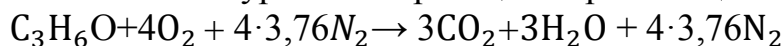
### Решение задач

**Задача 1.** Определить объем продуктов горения и воздуха при сжигании 11 кг ацетона. Процесс горения протекал при температуре 30 °С и давлении

720 мм.рт. ст. Температуру продуктов горения принять равной 1300 К.

**Решение.**

1. Составляем уравнение реакции горения ацетона:



$$M(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}) = 12 \cdot 3 + 1 \cdot 6 + 16 = 58 \text{ г/моль}$$

2. Находим теоретический объем воздуха по формуле (5) табл. 1

$$V_B^0 = \frac{n(\text{O}_2) + n(\text{N}_2) \cdot 22,4}{n_{\text{г.в}} \cdot M_{\text{в}}} = \frac{(4 + 4 \cdot 3,76) \cdot 22,4}{1 \cdot 58} = 7,353 \text{ м}^3/\text{кг}$$

3. Находим теоретический объем продуктов горения по формуле (9) табл 2

$$V_{\text{п.г}} = \frac{(n(\text{CO}_2) + n(\text{H}_2\text{O}) + n(\text{N}_2)) \cdot 22,4}{n_{\text{г.в}} \cdot M_{\text{в}}} = \frac{(3 + 3 + 4 \cdot 3,76) \cdot 22,4}{1 \cdot 58} = 8,12 \text{ м}^3/\text{кг}$$

4. Объем воздуха при заданных условиях

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{PV}{T} \rightarrow V_B = \frac{P_0 V_0 T}{T_0 P} = \frac{101,325 \cdot 7,353 \cdot 303}{273 \cdot 95,992} = 8,61 \text{ м}^3$$

5. Объем продуктов горения при заданных условиях:

$$V_{\text{п.г}} = \frac{P_0 V_0 T}{T_0 P} = \frac{101,325 \cdot 8,12 \cdot 1300}{303 \cdot 95,992} = 36,77 \text{ м}^3/\text{кг}$$

6. При сгорании 11 кг ацетона:

$$V_B = 8,61 \cdot 11 = 94,71 \text{ м}^3$$

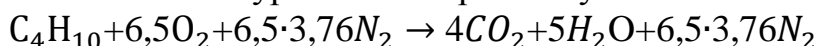
$$V_{\text{п.г}} = 36,77 \cdot 11 = 404,47 \text{ м}^3$$

**Ответ:** При сгорании 11 кг ацетона объем продуктов горения составил 404,47 м<sup>3</sup>, объем воздуха 94,71 м<sup>3</sup>.

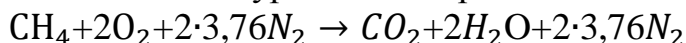
**Задача 2.** Рассчитать объём газовой смеси, состоящей из 45% бутана, 30% метана, 20% ацетилен и 5% кислорода, если на её сгорание при нормальных условиях израсходовано 80 м<sup>3</sup> воздуха. Коэффициент избытка воздуха равен 1,6

**Решение:**

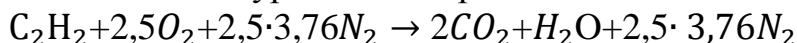
1. Записываем уравнение горения бутана.



2. Записываем уравнение горения метана



3. Записываем уравнение горения ацетилен



4. Находим теоретический объём воздуха по формуле (3):

$$V_B^{\text{теор}} = \frac{\sum_{n=1}^{n_2} \varphi_1 - \varphi_2}{21} = \frac{(6,5 \cdot 45 + 2 \cdot 30 + 2,5 \cdot 20) - 5}{21} = 18,92 \text{ м}^3/\text{кг}$$

5. Находим действительный объём воздуха по формуле (14):

$$V_B^{\text{дейст}} = V_B^{\text{теор}} \cdot \alpha = 1,6 \cdot 18,9 = 30,24 \text{ м}^3/\text{кг}$$

6. Находим объём газовой смеси

$$1 \text{ м}^3 \text{ смеси} - 30,24 \text{ м}^3 \text{ воздуха}$$

$$x - 80 \text{ м}^3$$

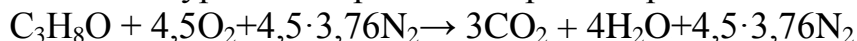
$$x = \frac{80}{30,24} = 2,6 \text{ м}^3$$

**Ответ:** Объём газовой смеси составляет 2,6 м<sup>3</sup>

**Задача 3.** Рассчитать концентрации пропанола сгоревшего в закрытом помещении объемом 150 м<sup>3</sup>, если горение прекратилось при остаточном содержании кислорода 9%. Начальная температура в помещении 21 °С, давление 99 кПа.

**Решение:**

1. Составляем уравнение реакции горения пропанола в воздухе :



2. Рассчитываем теоретический объем воздуха:

$$V_{\text{в теор.}} = \frac{[n(\text{O}_2) + n(\text{N}_2)] \cdot 22,4}{n_{\text{гв}} \cdot M} = \frac{(4,5 + 4,5 \cdot 3,76) \cdot 22,4}{1 \cdot 60} = 8,00 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$M(\text{C}_3\text{H}_8\text{O}) = 3 \cdot 12 + 1 \cdot 8 + 16 = 60 \text{ г/моль}$$

3. Поскольку в воздухе содержится 21% кислорода при сгорании вещества, находим коэффициент при остаточном содержании кислорода 9%, то

$$\alpha = \frac{21}{21-9} = 1,75$$

4. Рассчитываем расход воздуха на единицу горючего вещества по формуле :

$$V_{\text{в действ.}} = \alpha \cdot V_{\text{в теор.}} = 1,75 \cdot 8,00 = 14,0 \text{ м}^3/\text{кг}$$

5. Находим объем воздуха после горения, т.е. при остаточном содержании кислорода 9% :

$$150 \text{ м}^3 - 21\%$$

$$X - 9\%$$

$$X = \frac{150 \cdot 9}{21} = 64,29 \text{ м}^3$$

6. Находим объем воздуха, который ушел на горение :

$$V = V_{\text{н}} - V_{\text{к}} = 150 \text{ м}^3 - 64,29 \text{ м}^3 = 85,71 \text{ м}^3$$

7. Рассчитываем концентрацию пропанола сгоревшего в закрытом помещении :

$$1 \text{ кг} - 85,71 \text{ м}^3$$

$$X - 64,29 \text{ м}^3$$

$$X = \frac{64,29 \cdot 1}{85,71} = 0,75 \text{ кг}$$

**Ответ:** Концентрация пропанола (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O) сгоревшего в закрытом помещении при остаточном содержании кислорода 9% равна 0,75 кг .

### Контрольные задания 1

1. Какой теоретический объем воздуха необходим для полного сгорания 17 кг амилбензола при температуре 40 °С, давление 1,6 атм.

2. Какой объем воздуха необходим для полного сгорания 61 кг диэтилового эфира (температура 30 °С, и давление 105 кПа, если горение протекало с коэффициентом избытка воздуха 1,7

3. Рассчитайте коэффициент горючести уксусной кислоты и этанола.

4. Рассчитать объём и состав (%) продуктов горения, образующих при сгорании 18 кг этилацетата, если горение протекало при 80 °С и давлении 96

кПа. Коэффициент избытка воздуха составил 1,6.

5. Рассчитать количество угля, состоящего из 67% углерода, 25% водорода и 18% серы и объем образовавшихся при этом продуктов горения, если на сгорание угля при нормальных условиях израсходовано  $300\text{ м}^3$  воздуха.

6. Сгорает 13 кг кумола при температуре  $70^\circ\text{C}$  и давлении 110 кПа. Рассчитать объем воздуха, объем в продуктов горения, и процентное содержание в них воды, если горение протекает с избытком воздуха (коэффициент избытка воздуха равен 1,3).

7. Рассчитать объем воздуха и объем продуктов горения при полном сгорании 23 кг целлюлозы, состоящей из 78% углерода, 15% водорода и 7% кислорода, если горение протекает при температуре  $60^\circ\text{C}$  и давлении 105 кПа. Коэффициент избытка воздуха равен 1,4.

8. Определить объем продуктов горения и воздуха при сжигании 23 кг пропанола. Процесс горения протекал при температуре  $50^\circ\text{C}$  и давлении 775 мм. рт. ст. Температуру продуктов горения принять равной 1500 К.

9. Рассчитать объем воздуха, объем продуктов горения и процентное содержание в них углекислого газа при полном сгорании  $10\text{ м}^3$  ацетилена, если горение протекает с избытком воздуха (коэффициент избытка воздуха 1,3).

10. Рассчитать количество сгоревшего аллилового спирта и процентное содержание воды в продуктах горения, если на его сгорание при температуре  $90^\circ\text{C}$  и давлении 100 кПа израсходовано  $300\text{ м}^3$  воздуха.

11. Какой теоретический объем воздуха необходим для полного сгорания 1 кг диэтилового эфира  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OC}_2\text{H}_5$ ? Температура  $10^\circ\text{C}$ , давление 1,2 атм.

12. Какой объем воздуха необходим для полного сгорания 50 кг ацетона  $\text{CH}_3\text{COCH}_3$  при температуре  $23^\circ\text{C}$  и давлении 95 кПа, если горение протекало с коэффициентом избытка воздуха 1,2?

13. Рассчитайте коэффициент горючести стеариновой кислоты  $\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$ .

14. Составьте уравнения реакции горения в кислороде и в воздухе данного вещества, и определите, сколько молей исходных веществ участвовало в реакции и сколько молей продуктов горения образовалось при полном сгорании этилового эфира уксусной кислоты.

15. Рассчитать объем воздуха и объем продуктов горения при полном сгорании 14 кг целлюлозы, состоящей из 75% углерода, 16% водорода и 9% кислорода, если горение протекает при температуре  $90^\circ\text{C}$  и давлении 115 кПа. Коэффициент избытка воздуха равен 1,8

16. Рассчитать объем воздуха и объем продуктов горения при полном сгорании 74 кг бензола, если горение протекает при температуре  $120^\circ\text{C}$  и давлении 125 кПа. Коэффициент избытка воздуха равен 1,2.

17.. Рассчитать объем воздуха и объем продуктов горения при полном сгорании 13 кг этанола, если горение протекает при температуре  $86^\circ\text{C}$  и давлении 125 кПа. Коэффициент избытка воздуха равен 1,4.

## Раздел 2. Тепловой баланс процессов горения

### 2.1. Расчет теплоты 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 м<sup>3</sup>), называют **низшей теплотой сгорания  $Q_n$** .

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, затраченной на парообразование. Тогда:

$$Q_B = Q_H + r \quad (21)$$

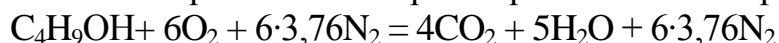
где  $Q_B$  – **высшая теплота сгорания** вещества, а  $r$  – удельная теплота парообразования воды.

При расчетах температуры горения пользуются величиной  $Q_n$ , так как при температуре горения вода находится в газообразном состоянии. Значения низшей теплоты сгорания вещества (тепловой эффект химической реакции) приводятся 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:

$$Q_H = \left( \sum \Delta H_{fi}^0 n_i \right)_{\text{прод}} - \left( \sum \Delta H_{fi}^0 n_i \right)_{\text{исх}} \quad (22)$$

где  $\Delta H_{fi}^0$  – 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<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, S, C...) принимается равной нулю. Теплота образования некоторых горючих веществ приведена в табл. II и III приложения. При сгорании 2-метилпропанола-1



низшая теплота сгорания, согласно закону Гесса (22), равна

$$Q_H = \Delta H_{f\text{CO}_2}^0 n_{\text{CO}_2} + \Delta H_{f\text{H}_2\text{O}}^0 n_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta H_{f\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}}^0 n_{\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}} - \Delta H_{f\text{O}_2}^0 n_{\text{O}_2} \quad (23)$$

Учитывая, что кислород - простое вещество и для него  $\Delta H_{f_{O_2}}^{\circ} = 0$ ,

$$Q_H = \Delta H_{f_{CO_2}}^0 n_{CO_2} + \Delta H_{f_{H_2O}}^0 n_{H_2O} - \Delta H_{f_{CH_4}}^0 n_{CH_4} \quad (24)$$

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

$$Q_H = 4 \cdot (-396,9) + 5(-242,2) - (-283,2) = 2515,4 \text{ кПа}$$

Низшая теплота сгорания определяется экспериментально для каждого вещества и является справочной величиной. Также её можно определить для твердых и жидких материалов, при известном элементарном составе, расчётным способом в соответствии с **формулой Д. И. Менделеева**, кДж/кг:

$$Q_H = 339,4 \cdot C + 1257 \cdot H - 108,9 (O + N - S) - 25(9 \cdot H + W),$$

где C, H, O, N, S, W - процентное содержание углерода, водорода, кислорода, азота, серы, воды соответственно.

## 2.2. Расчет температуры 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 теплотери.

При расчете температуры горения составляется уравнение теплового баланса, при этом учитывается, что выделившееся в результате сгорания тепло нагревает продукты горения ( $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2...$ ) от начальной температуры  $T_0$  до температуры  $T_r$ , увеличивая их теплосодержание.

$$Q_H (1 - \eta) = \sum [H_{\text{пр}i}(T_r) - H_{\text{пр}i}(T_0)] \cdot V_{\text{пр}i} \quad (25)$$

где  $\eta$  - коэффициент теплотери (доля потерь тепла на излучение);  $(T_{\text{пр}i})$  и  $H_{\text{пр}i}(T_0)$  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  $T = 273 \text{ К}$  принять равным нулю, то

$$Q_H (1 - \eta) = \sum H_{\text{пр}i}(T_r) \cdot V_{\text{пр}i} \quad (26)$$

Далее необходимо по известной зависимости теплосодержания газов от температуры методом последовательных приближений найти температуру, при которой будет справедливо это равенство.

Для адиабатического процесса (при условии отсутствия теплопотерь ( $\eta = 0$ )) низшая теплота сгорания определяется по формуле (27):

$$Q_H = \sum H_{\text{пр}i} \cdot T_r \cdot V_{\text{пр}i} \quad (27)$$

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

Используя зависимость теплосодержания газов от температуры (табл. III приложения), можно установить, какой температуре соответствует такое теплосодержание. В продуктах горения больше всего азота, поэтому ориентируются на азот.

Средние значения теплоемкости продуктов горения при постоянном давлении в температурном интервале 273- 1500K приведены в таблице 3.

Таблица 3. Удельные теплоемкости продуктов горения

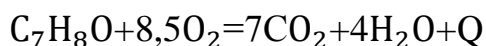
| №<br>п/п | Вещество            | Химическая формула                  | Удельная теплоемкость<br>,<br>кДж/м <sup>3</sup> ·К | $C_{p,i}$<br>кДж/ моль<br>· К |
|----------|---------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------|
| 1        | Азот                | N <sub>2</sub>                      | 1,41  | $3,18 \cdot 10^{-2}$          |
| 2        | Вода( пар)          | H <sub>2</sub> O                    | 1,78  | $3,98 \cdot 10^{-2}$          |
| 3        | Воздух              | O <sub>2</sub> + 3,76N <sub>2</sub> | 1,44  | $3,23 \cdot 10^{-2}$          |
| 4        | Диоксид<br>серы     | SO <sub>2</sub>                     | 2,28  | $5,11 \cdot 10^{-2}$          |
| 5        | Диоксид<br>углерода | CO <sub>2</sub>                     | 2,27  | $5,08 \cdot 10^{-2}$          |
| 6        | Оксид<br>углерода   | CO                                  | 1,50  | $3,37 \cdot 10^{-2}$          |

**Задача 1.** Определить теплоту сгорания бензилового спирта (C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>O), если теплота его образования составляет 875,4 кДж/моль

**Решение:**

1. Составим уравнение реакции горения бензилового спирта:





2. Рассчитаем по закону Гесса теплоту сгорания:

$$\Delta H_{\text{реак}} = \sum \Delta H_{\text{пр}}^0 - \sum \Delta H_{\text{исх}}^0 = [7 \cdot (-396,9) + 4 \cdot (-242,2)] -$$

$$\Delta H(C_7H_8O) = (-2778,3 - 968,8) -$$

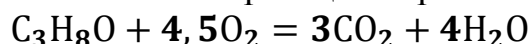
$$(-875,4) = -3741,1 + 875,4 = -2871,7 \text{ кДж/моль}$$

**Ответ:** Теплота сгорания бензилового спирта  $Q = 2871,7 \text{ кДж/моль}$

**Задача 2.** Теплота образования ацетона составляет  $-248,28 \text{ кДж/моль}$ . Определить количество тепла, которое выделится при сгорании 30 г вещества.

**Решение:**

1. Составляем уравнение химической реакции горения ацетона:



2. Находим тепловой эффект реакции по закону Гесса:

$$\Delta H_p = [3 \cdot (-396,9) + 4 \cdot (-242,2)] - (-248,28) = [-1190,7 - 968,8] + 248,28 = -2159,5 + 248,8 = -1910,7 \text{ кДж/моль}$$

3. Находим молекулярную массу ацетона:

$$M(C_3H_8O) = 3 \cdot 12 + 8 + 16 = 36 + 24 = 60 \text{ г/моль}$$

4. Находим количество тепла при сгорании 30 г ацетона:

$$60 \text{ г} - 1910,7 \text{ кДж} \quad x = 955,35 \text{ кДж.}$$

$$30 \text{ г} - x$$

**Ответ:** При сгорании 30 г ацетона выделяется 955,35 кДж тепла.

**Задача 3.** Определить теплоту сгорания 4,6 – диметилгексагидро -1, 3,5 – триазинтиона-2 ( $C_5H_9N_3S$ ) по формулам Д.И. Менделеева

**Решение:**

1. Уравнение Менделеева

$$Q_H = 339,4 \cdot C + 1257 \cdot H - 108,9 (O + N - S) - 25(9 \cdot H + W)$$

$$M(C_5H_9N_3S) = 5 \cdot 12 + 9 + 3 \cdot 14 + 32 = 143 \text{ г/моль}$$

2. Рассчитываем содержание углерода, %.

$$143 - 100\%$$

$$60 - X$$

$$x = \frac{60 \cdot 100}{143} = 41,96\%$$

3. Рассчитываем содержание водорода, %.

$$143 - 100\%$$

$$9 - X$$

$$x = \frac{9 \cdot 100}{143} = 6,29\%$$

4. Рассчитываем содержание азота, %.

$$143 - 100\%$$

$$42 - X$$

$$x = \frac{42 \cdot 100}{143} = 29,37\%$$

5. Рассчитываем содержание S, %.

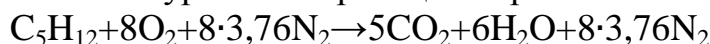
$$\begin{aligned}
 &143 - 100\% \\
 &32 - X \\
 &32 \cdot 100 \\
 x = \frac{143}{143} &= 22,38\% \\
 6.Q_H &= 339,4 \cdot 41,96 + 1257 \cdot 6,29 - 108,9(0 + 29,37 - 22,38) = 14241,22 + 7906,53 \\
 &- (108,9 \cdot 6,99) = \\
 &= 22147,75 - 761,21 = 21386,54 \text{ кДж /кг} \\
 7.1 \text{ кг} &- 21386,54 \\
 143 \text{ г/моль} &- X \\
 x = \frac{143 \cdot 21386,54}{1000} &= 3058,3 \text{ кДж/моль.}
 \end{aligned}$$

**Ответ:** Низшая теплота сгорания 4,6 – диметилгексагидро -1, 3,5 – триазинтиона-2 составляет 3058,3 кДж/моль.

**Задача 4.** Определить теоретическую температуру горения пентана с использованием средних значений теплоемкости.

**Решение:**

1. Составляем уравнение реакции горения пентана в воздухе:



2. Находим низшую теплоту сгорания

$$\begin{aligned}
 \Delta H_p &= \Sigma \Delta H_{пр}^0 - \Sigma \Delta H_{сх}^0 = [5\Delta H^0(CO_2) + 6\Delta H^0(H_2O) + 8 \cdot \\
 3,76\Delta H^0(N_2)] &- -[\Delta H^0(C_5H_{12}) + 8\Delta H^0(O_2) + 8 \cdot 3,76\Delta H^0(N_2)] = \\
 [5 \cdot (-396,9) + 6 \cdot (-242,2) + 0] &- [(-173,33) + 0 + 0] = \\
 -3264,37 \text{ кДж/моль}
 \end{aligned}$$

$$\Delta H_p = -Q_H \quad Q_{H2} = 3264,37 \text{ кДж/моль}$$

3. Находим объем продуктов горения:

$$\begin{aligned}
 M(C_5H_{12}) &= 12 \cdot 5 + 12 \cdot 1 = 72 \text{ г/моль} \\
 V(CO_2) &= \frac{n(CO_2) \cdot 22,4}{M_{гв} \cdot M} = \frac{5 \cdot 22,4}{72} = 1,55 \text{ м}^3/\text{кг} \\
 V(H_2O) &= \frac{n(H_2O) \cdot 22,4}{M_{гв} \cdot M} = \frac{6 \cdot 22,4}{72} = 1,87 \text{ м}^3/\text{кг} \\
 V(N_2) &= \frac{n \cdot 3,76(N_2) \cdot 22,4}{M_{гв} \cdot M} = \frac{8 \cdot 3,76 \cdot 22,4}{72} = 9,35 \text{ м}^3/\text{кг} \\
 C_{CO_2} &= 2,27 \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{К} \\
 C_{H_2O} &= 1,78 \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{К} \\
 C_{N_2} &= 1,41 \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{К}
 \end{aligned}$$

4.Находим теоретическую температуру горения пентана:

$$Q_H(1 - \eta) = \Sigma_{српгi} \cdot V_{пгi}(T_r - T_0)$$

$$T_r = \frac{Q_H(1 - \eta)}{\Sigma_{српгi} \cdot V_{пгi}} + T_0 = \frac{3264,37}{1,55 \cdot 2,27 + 1,87 \cdot 1,78 + 9,35 \cdot 1,41} + 273$$

$$= 435,97\text{K}$$

**Ответ:** теоретическая температура горения пентана составляет 436K, 163°C

**Задача 5** Вычислить действительную температуру горения горючего сланца следующего состава: С – 35 %, Н – 5 %, О – 10 %, S – 4 %, N – 1 %, W – 15 %, зола – 30 %. Потери тепла излучением составляют 10 %, а горение протекает с коэффициентом избытка воздуха 1,2. Условия нормальные.

1. По формулам (2.9) – (2.12) определяем объем каждого компонента продуктов горения 1 кг горючего сланца.

$$V(\text{CO}_2) = \frac{1,86 \cdot 35}{100} = 0,651 \text{ м}^3$$

$$V(\text{H}_2\text{O}) = \frac{11,2 \cdot 5}{100} + \frac{1,24 \cdot 15}{100} = 0,746 \text{ м}^3$$

$$V(\text{SO}_2) = \frac{0,7 \cdot 4}{100} = 0,028 \text{ м}^3$$

$$V(\text{N}_2) = \frac{7 \cdot 35}{100} + \frac{21 \cdot 5}{100} + \frac{2,63 \cdot 4}{100} + \frac{0,8 \cdot 1}{100} - \frac{2,63 \cdot 10}{100} = 3,455 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{пг}} = 0,651 + 0,746 + 0,028 + 3,455 = 4,88 \text{ м}^3$$

2. Горение протекает с коэффициентом избытка воздуха 1,2, следовательно, в состав продуктов горения будет входить избыточный воздух.

По формуле (3.8) определяем теоретический объем воздуха, необходимый для горения данной массы образца угля:

$$V_{\text{в}}^{\text{теор}} = 0,267 \left( \frac{35}{3} + 5 + \frac{4}{8} - \frac{10}{8} \right) = 4,28 \text{ м}^3$$

Избыток воздуха определим по формуле (2.4):

$$\Delta V_{\text{в}} = V_{\text{в}}^{\text{теор}}(\alpha - 1) = 4,28 \cdot (1,2 - 1) = 0,856 \text{ м}^3$$

С учетом избытка воздуха практический объем продуктов горения составит:

$$V_{\text{пг}}^* = V_{\text{пг}} + \Delta V_{\text{в}} = 4,88 + 0,856 = 5,736 \text{ м}^3$$

3. Рассчитываем  $Q_{\text{н}}$  по формуле Д.И. Менделеева.

$$Q_{\text{н}} = 339,4 \cdot 35 + 1257 \cdot 5 - 108,9 \cdot (10 + 1 - 4) - 25,1 \cdot (9 \cdot 5 + 15) = 15881,7 \text{ кДж/кг}$$

4. С учетом теплотерь определяем теплосодержание продуктов горения:

$$Q_{\text{пг}} = 15881,7 (1,1 - 1) = 14293,53 \text{ кДж/кг}$$

5. Определяем среднее теплосодержание продуктов горения:

$$Q_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{пг}}}{V_{\text{пг}}^*} = \frac{14293,53}{5,736} = 2480,22 \text{ кДж/м}^3$$

По таблице приложения 4, ориентируясь на азот, определяем  $T_1 =$

1500<sup>0</sup>С.

6. Определяем теплосодержание продуктов горения при 1500<sup>0</sup>С:

$$Q_{\text{ПГ}}^{1500} = 3505,7 \cdot 0,651 + 2781,3 \cdot 0,746 + 2176,7 \cdot 3,455 + 3488,2 \cdot 0,028 + 2194,7 \cdot 0,856 = 13853,889 \text{ кДж}$$

7.  $Q_{\text{ПГ}}^{1500} = 13853,889 < Q_{\text{ПГ}} = 14293,53$ , следовательно, выбираем  $T_2 = 1600^0\text{С}$ .

8. Определяем теплосодержание продуктов горения при 1600<sup>0</sup>С:

$$Q_{\text{ПГ}}^{1600} = 3771,4 \cdot 0,651 + 3004,2 \cdot 0,746 + 2335,5 \cdot 3,455 + 3747,5 \cdot 0,028 + 2355,2 \cdot 0,856 = 14886,44 \text{ кДж}$$

9.  $Q_{\text{ПГ}}^{1600} = 14886,44 > Q_{\text{ПГ}} = 14293,53$ , следовательно, температура горения вещества находится в интервале от 1500 до 1600<sup>0</sup>С.

10. Определяем температуру горения:

$$T_{\Gamma} = 1500 + \frac{14293,53 - 13853,889}{14886,44 - 13853,889} \cdot (1600 - 1500) = 1556^0\text{С} = 1829 \text{ К}$$

**Задача 6.** Определить теоретическую температуру горения резины состава: С= 80%, Н=15%, S=2%, О=1%, N=2%

**Решение:**

1. Рассчитаем низшую теплоту сгорания горючего вещества, используя формулу Д. И. Менделеева

$$Q_H = 339,4 \cdot C + 1257 \cdot H - 108,9(O + N - S) - 25(9H + W) = 393,4 \cdot 80 + 1257 \cdot 15 - 108,9(1 + 2) - 25(9 \cdot 15) = 27152 + 18855 - 326,7 - 3375 = 42305,3 \text{ кДж/моль}$$

2. Рассчитаем объемы продуктов горения при полном сгорании 1 кг горючего веществасложного состава

$$V_{CO_2} = 1,86 \cdot \frac{C}{100} = 1,86 \cdot \frac{80}{100} = 1,488 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$
$$V_{H_2O} = 11,2 \cdot \frac{H}{100} = 11,2 \cdot \frac{15}{100} = 1,68 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

$$V_{N_2} = \frac{1}{100} \left[ 7C + 21 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2,6 \cdot S + 0,8 \cdot N \right] =$$
$$= \frac{1}{100} \left[ 7 \cdot 80 + 21 \left( 15 - \frac{1}{8} \right) + 0,8 \cdot 2 \right] = 5,64 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

3. Рассчитаем температуру горения при нормальных условиях

$$T_{\Gamma} = 273 + \frac{42305,3}{2,27 \cdot 1,488 + 1,78 \cdot 1,68 + 1,42 \cdot 5,64} = 3217 \text{ К}$$

**Ответ:** Теоретическая температура горения составляет 3217К (так как нет избытка воздуха).

**Задача 7.** Определить действительную температуру горения бензина состава: С= 85%, Н=14,9%, S=0,05%, О=0,02%, N=0,03%, W=0,5%  $\eta=30\%$

Коэффициент избытка воздуха=1.2 методом последовательных приближений.

**Решение:**

3.Находим объем продуктов горения:

$$V(CO_2) = \frac{1,86 * 85}{100} = 1,58 \text{ м}^3$$

$$V(H_2O) = \frac{11,2 * 14,9}{100} + \frac{1,24 * 0,5}{100} = 1,67 \text{ м}^3$$

$$V(N_2) = \frac{7 * 85}{100} + \frac{21 * 14,9}{100} + \frac{2,63 * 0,15}{100} + \frac{0,8 * 0,03}{100} + \frac{2,63 * 0,02}{100} = 9,09 \text{ м}^3$$

$$V(SO_2) = \frac{0,7 * 0,05}{100} = 0,00035 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{пг}}^0 = 1,58 + 1,67 + 0,00035 + 9,09 = 12,34 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{возд.}}^{\text{теор}} = 0,267 \left( \frac{85}{3} + 14,9 + \frac{0,15}{8} + \frac{0,02}{8} \right) = 11,55 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{возд.}}^{\text{дейст}} = 11,55 * 1,2 = 13,86 \text{ м}^3$$

$$\Delta V = 13,86 - 11,55 = 2,31 \text{ м}^3$$

|   |      |         |         |
|---|------|---------|---------|
| С | учёт | избытка | воздуха |
| С | учёт | избытка | воздуха |

$$V_{\text{пг}} = V_{\text{пг}}^0 + \Delta V = 12,34 + 2,31 = 14,65 \text{ м}^3$$

$$Q_{\text{н}} = 339,4 * 85 + 1257 * 14,9 - 108,9(0,02 + 0,03 - 0,15) \quad -$$

$$25,1(9 * 14,9 + 0,5) = 44210,73 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$$

$$Q_{\text{пг}} = Q_{\text{н}}(1 - \eta) = 44210,73 * (1 - 0,3) = 30947,51 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$$

$$Q_{\text{ср}} = \frac{30947,51}{14,65} = 2112,45$$

$$T_1 = 1300 \text{ К}$$

$$Q^{1300} = 2979,1 * 1,58 + 2345,5 * 1,67 + 2979,5 * 0,00035 + 1861,2 * 9,09 + 1877,5 * 2,31 = 29882,42$$

$$T_2 = 1400 \text{ К}$$

$$Q^{1400} = 3241,4 * 1,58 + 2560,9 * 1,67 + 3238 * 0,00035 + 2010 * 9,09 + 2035,5 * 2,31 = 32374,42$$

$$T_{\text{гор}}^{\text{теор}} = \frac{44210,73 * (1 - 0,3)}{2,27 * 1,58 + 1,78 * 1,67 + 1,41 * 9,09 + 2,28 * 0,00035 + 1,44 * 2,31} = 1873 \text{ К}$$

$$T_{\text{гор}}^{\text{дейст}} = 1300 + \frac{1400 - 1300}{32374,42 - 29882,42} * (44210,73 - 29882,42) = 1636 \text{ К}$$

### 2.3. Расчет температуры 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  $Q_{\text{взр}} \approx Q_{\text{н}}$ . Температура 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  $Q_{\text{взр}} \approx Q_{\text{н}}$ , а изменение энтальпии (теплосодержания) продуктов реакции происходит лишь в результате изменения внутренней энергии ( $dH = dU + p dV = dU$  при  $dV=0$ ), уравнение теплового баланса для взрыва можно записать в следующем виде

$$Q_H = \sum [U_{\text{пг}i}(T_{\text{взр}}) - U_{\text{пг}i}(T_0)] \cdot V_{\text{пг}i} \quad (28)$$

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

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

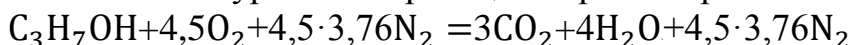
$$Q_H = \sum U_{\text{пг}i}(T_{\text{взр}}) \cdot V_{\text{пг}i} \quad (29)$$

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

**Задача 1.** Определить температуру взрыва пропанола-1 методом последовательных приближений

**Решение:**

1. Составляем уравнение реакции горения пропанола-1:



2. Определяем низшую теплоту сгорания по закону Гесса:

$$\Delta H_{\text{р}} = \sum \Delta H_{\text{пр}}^0 - \sum \Delta H_{\text{исх}}^0 = [3 \cdot \Delta H^0(\text{CO}_2) + 4 \Delta H^0(\text{H}_2\text{O})] -$$

$$\Delta H^0(\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}) = [3 \cdot (-396,9) + 4 \cdot (-242,2)] - (-257,7) = -1901,8 \text{ кДж/моль}$$

$$Q_{\text{н}} = 1901,8 \text{ кДж/моль}$$

3. Объем горения продуктов составляет:

$$V(\text{CO}_2) = 3 \text{ кмоль}$$

$$V(\text{H}_2\text{O}) = 4 \text{ кмоль}$$

$$V(\text{N}_2) = 4,5 \cdot 3,76 = 16,92 \text{ кмоль}$$

$$V_{\text{пр}} = 3 + 4 + 16,92 = 23,92 \text{ кмоль}$$

3. Так как теплотери отсутствуют, то все выделившееся тепло идет на нагрев продуктов горения. Среднее теплосодержание 1 моля продуктов горения будет составлять:

$$U_{\text{ср}} = \frac{1901,8}{23,92} = 79,5 \text{ кДж/моль}$$

4. Воспользовавшись зависимостью теплосодержания газов от температуры, можем установить к какой температуре соответствует такое теплосодержание. Лучше всего это сделать, ориентируясь на азот, так как его больше всего в продуктах горения. При температуре  $3000^\circ\text{C}$  теплосодержание азота  $78,9 \text{ кДж/моль}$ . Уточним сколько потребовалось бы тепла, чтобы нагреть продукты горения до такой температуры.

При  $T_1 = 3000^\circ\text{C}$ .

$$Q_1 = U_{\text{CO}_2} \cdot V_{\text{CO}_2} + U_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} + U_{\text{N}_2} \cdot V_{\text{N}_2} = 3 \cdot 145 + 4 \cdot 116,3 + 16,92 \cdot 78,9 = 2235,19 \text{ кДж/моль}$$

Но это больше, чем выделилось тепла в результате реакции горения.

5. Определим, сколько потребуется тепла для нагревания продуктов горения до  $T_2 = 2700^\circ\text{C}$

$$Q_2 = 3 \cdot 128,9 + 4 \cdot 102,4 + 16,92 \cdot 70,2 = 1984,08 \text{ кДж/моль}$$

Но и  $Q_2 < Q_H$ , значит  $T_{\text{взрыва}} < 2700^\circ\text{C}$ .

При температуре  $T_3 = 2600^\circ\text{C}$

$$Q_3 = 3 \cdot 123,7 + 4 \cdot 97,8 + 16,92 \cdot 67,4 = 1902,708 \text{ кДж/моль}$$

$Q_3 < Q_H$ , значит  $T_{\text{взрыва}} < 2600^\circ\text{C}$ .

При температуре  $T_4 = 2500^\circ\text{C}$

$$Q_4 = 3 \cdot 118,3 + 4 \cdot 94,3 + 16,92 \cdot 64,3 = 1820,056 \text{ кДж/моль}$$

$Q_4$  уже меньше, чем  $Q_H$ , из этого можно сделать вывод, что температура горения пропанола-1 имеет значение между  $2500$  и  $2600^\circ\text{C}$

6. Уточним искомую температуру линейной интерполяцией между двумя этими ближайшими значениями

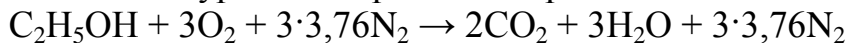
$$T_{\text{взр}} = T_4 + \frac{T_3 - T_4}{Q_3 - Q_4} (Q_H - Q_4) = 2500 + \frac{2600 - 2500}{1902,708 - 1820,056} \cdot 1901,8 - 1820,056 = 2981^\circ\text{C}$$

**Ответ:** температура взрыва пропанола-1 составляет  $3254 \text{ K}$ .

**Задача 2.** Определить температуру взрыва этанола методом последовательных приближений.

**Решение:**

1. Составляем уравнение реакции горения этанола:



2. Определить низшую теплоту сгорания по закону Гесса:

$$Q_H = \sum_{\Delta} H^{\circ}_{\text{пр}} - \sum_{\Delta} H^{\circ}_{\text{исх}} = [2H^{\circ}(\text{CO}_2) + 3H^{\circ}(\text{H}_2\text{O})] - [H^{\circ}(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH})] = [2 \cdot (-396,9) + 3 \cdot (-242,2)] - (-278,2) = -1520,4 + 278,2 = -1242,2 \text{ кДж/моль}$$

3. Находим объём продуктов горения:

$$V_{\text{CO}_2} = 2 \text{ кмоль}$$

$$V_{H_2O} = 3 \text{ кмоль}$$

$$V_{N_2} = 3 \cdot 3,76 = 11,28 \text{ кмоль}$$

$$V_{\text{ИГ}} = 2 + 3 + 11,28 = 16,28 \text{ кмоль}$$

$$\Delta U_{\text{CP}} = \frac{Q}{\sum V} = \frac{1242,2}{16,28} = 76,3 \text{ кДж/моль}$$

$$4. \text{ При } T_1 = 2900 \text{ C}^\circ$$

$$Q_1 = U_{CO_2} \cdot V_{CO_2} + U_{H_2O} \cdot V_{H_2O} + U_{N_2} \cdot V_{N_2} = 139,7 \cdot 2 + 111,7 \cdot 3 + 76,4 \cdot 16,28 =$$

$$+ 335,1 + 1243,792 =$$

$$1858,29 \text{ кДж/моль}$$

$$\text{При } T_2 = 2500 \text{ C}^\circ$$

$$Q_2 = 118,3 \cdot 2 + 94,3 \cdot 3 + 64,3 \cdot 16,28 = 236,6 + 282,9 +$$

$$+ 1046,804 = 1566,304 \text{ кДж/моль}$$

$$\text{При } T_3 = 2300 \text{ C}^\circ$$

$$Q_3 = 107,8 \cdot 2 + 85,1 \cdot 3 + 58,7 \cdot 16,28 = 1426,54 \text{ кДж/моль}$$

$$\text{При } T_4 = 2100 \text{ C}^\circ$$

$$Q_4 = 97,2 \cdot 2 + 75,9 \cdot 3 + 52,9 \cdot 16,28 = 1283,312 \text{ кДж/моль}$$

$$\text{При } T_5 = 2000 \text{ C}^\circ$$

$$Q_5 = 92 \cdot 2 + 71,5 \cdot 3 + 50,2 \cdot 16,28 = 1215,76 \text{ кДж/моль}$$

$$T_{\text{ВЗР}} = T_5 + \frac{T_4 - T_5}{Q_4 - Q_5} \cdot Q_4 - Q_5 = 2000 + \frac{2100 - 2000}{1283,312 - 1215,76} \cdot (1283,312 -$$

$$- 1215,76) = 2000 + 1,48 \cdot 26,44 = 2039 \text{ C}^\circ = 2312 \text{ K}$$

**Ответ:** Температура взрыва этанола составляет 2312K

## Контрольные задания 2

1. В каком случае при горении гексана выделится больше тепла: при не полном горении или полном. Ответ необходимо подтвердить расчётом с использованием закона Гесса.

2. Определить теплоту образования циклогексана кислоты, если теплота её сгорания составляет 1800 кДж/моль.

3. Определить теплоту сгорания 15 кг толуола, если теплота его образования составляет 50,02 кДж/моль, теплота образования углекислого газа 396,9 кДж/моль, теплота образования водяного пара 242,2 кДж/моль.

4. Вычислить теплоту образования ацетона из элементов, если его теплота горения равна 2824 кДж/моль.

5. Определить теплоту сгорания 4,4-диаминодифенилсульфона ( $C_{12}H_{12}O_2N_2S$ ) без учёта потерь на испарение влаги.

6. Вычислить теплоту образования метана, если при сжигании 10 г его в стандартных условиях выделяется 556,482 кДж тепла.

7. Определить теплоту сгорания бензилового спирта ( $C_7H_8O$ ), если теплота его образования составляет 845,6 кДж/моль.

8. Определить теплоту сгорания сульфобензилгидразина ( $C_6H_8O_3N_2S$ ) с учётом потерь на испарение воды. Содержание влаги в веществе 20 %.

9. При образовании октана из элементов выделяется 224,65 кДж/моль тепла. Рассчитать его теплоту горения.



10.Теплота образования ацетона составляет -268,38 кДж/моль. Определить его теплоту горения и количество тепла, которое выделится при сгорании 30 г вещества.

11.Определить теоретическую температуру горения бензола с использованием средних значений теплоёмкостей.

12.Определить теплоту сгорания диаминоезитилен-6-сульфокислоты ( $C_9H_{14}O_3N_2S$ ), если содержание влаги в веществе 45 %.

13. Определить теплоты сгорания 4, 6-диметилгексагидро-1,3,5-триазинтиона-2( $C_5H_9N_3S$ ) по формулам Д. И. Менделеева.

14.Рассчитать теплоту сгорания сульфациридазина ( $C_{11}H_{12}O_3N_4S$ ) без учёта потерь на испарение влаги.

15.Определить теоретическую температуру горения октана и использованием средних значений теплоёмкостей.

16.Определить теплоту сгорания салициловой кислоты, если теплота её образования составляет 569, 5 кДж/моль.

17. Определить теоретическую температуру горения пентана с использованием средних значений теплоёмкостей.

18.Определить низшую теплоту горения древесины состава: С – 41,5%; Н – 6%; О– 43 %; N – 2%; W– 7,5%.

19.Методом последовательных приближений рассчитать адиабатическую температуру горения пропанола.

20.Определить теоретическую температуру горения ацетона с использованием средних значений теплоёмкостей.

21. Рассчитайте температуру горения для стехиометрической смеси горючего вещества с воздухом (таблица4).

Таблица 4. Задачи для расчета температуры горения стехиметрической смеси горючего вещества с воздухом

| № задания | Горючее вещество | Химическая формула |
|-----------|------------------|--------------------|
| 21.1      | Толуол           | $C_7H_8$           |
| 21.2      | Анилин           | $C_6H_5NH_2$       |
| 21.3      | Глицерин         | $C_3H_5(OH)_3$     |
| 21.4      | Этиленгликоль    | $C_2H_4(OH)_2$     |
| 21.5      | Ацетон           | $C_3H_6O$          |
| 21.6      | Диэтиловый эфир  | $C_4H_{10}O$       |
| 21.7      | Пропилацетат     | $C_5H_{10}O_2$     |
| 21.8      | Этанол           | $C_2H_6O$          |
| 21.9      | Пропанол-1       | $C_3H_8O$          |
| 21.10     | Бутанол-1        | $C_4H_{10}O$       |

22. Методом последовательных приближений рассчитать действительную температуру горения горючего вещества (таблица 5), если горение протекает при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha$ , а доля потерь тепла излучением составляет  $\eta$ .

Таблица 5. Задачи для расчета действительной температуры горения горючего вещества

| № задания | Название вещества | Элементный состав вещества, масс. % |      |     |     |     |    |      | $\alpha$ | $\eta$ |
|-----------|-------------------|-------------------------------------|------|-----|-----|-----|----|------|----------|--------|
|           |                   | C                                   | H    | O   | S   | N   | W  | зола |          |        |
| 22.1      | Антрацит          | 67                                  | 3    | 4   | 0,5 | 1,0 | 3  | 21,5 | 1,1      | 0,2    |
| 22.2      | Горючий сланец    | 24,2                                | 1,8  | 4,5 | 3,0 | 2,0 | 25 | 39,5 | 1,2      | 0,3    |
| 22.3      | Керосин           | 80                                  | 13,7 | 0,3 | -   | -   | 6  | -    | 1,3      | 0,4    |
| 22.4      | Бензин            | 85                                  | 8,0  | 5,0 | -   | 2,0 |    |      | 1,4      | 0,3    |
| 22.5      | Соляровое масло   | 86,0                                | 12,0 | 1,2 | 0,8 | -   | -  | -    | 1,5      | 0,2    |
| 22.6      | Мазут             | 84                                  | 10   | 2   | 3   | -   | 1  | -    | 1,6      | 0,3    |
| 22.7      | Древесина         | 46                                  | 6    | 37  | -   | 2   | 9  | -    | 1,7      | 0,4    |
| 22.8      | Уголь             | 72                                  | 6    | 4   | 2   | 3   | 13 | -    | 1,8      | 0,3    |
| 22.9      | Церезин           | 85                                  | 14   | 1   | -   | -   | -  | -    | 1,7      | 0,2    |
| 22.10     | Горючий сланец    | 30                                  | 5    | 12  | 5   | 2   | 10 | 36   | 1,6      | 0,3    |

23. Определить теоретическую температуру горения резины состава: C = 80 %, H

= 15 %, S = 2 %, O = 1 %, N = 2 %.

24. Определить действительную температуру горения бумаги состава: C = 55 %, H

= 25 %, N = 3 %, O = 15 %, H<sub>2</sub>O = 2 %, если потери тепла за счёт недожога составили  $\eta_x=0,15$ , за счёт излучения  $\eta_{изл}=0,20$ .

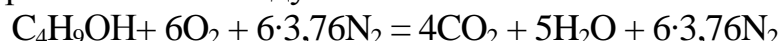
25. Определить действительную температуру горения пластмассы состава: С = 70 %, Н = 20 %, N = 5 %, О = 2 %, негорючие компоненты (наполнители) составили 3 %/, если потери тепла за счёт недожога составили  $\eta_x=0,20$ , за счёт излучения  $\eta_{изл}=0,25$ . Коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,4$ .

### 3. Расчет концентрационных пределов распространения пламени

#### 3.1. Газовоздушные горючие смеси

Газовая смесь горючего с окислителем способна воспламеняться и распространять пламя только при определенных концентрациях горючего. Минимальная концентрация горючего, при которой смесь способна воспламеняться 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 не горючи. Например, для метана  $CH_4$  концентрационные пределы распространения пламени составляют НКПР - 5 об. %, а ВКПР - 15 об. % (см. табл. XII 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

2-метилпропанола-1 с воздухом



содержит 1 моль 2-метилпропанола-1, 6 молей кислорода и  $6 \cdot 3,76$  молей азота. Концентрация горючего в такой смеси

$$\varphi_{стех} = \frac{n_{28} \cdot 100}{n_{28} + n_{O_2} + n_{N_2}} = \frac{1 \cdot 100}{1 + 6 + 22,56} = 3,38\% \quad (30)$$

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

#### 3.2. Расчет КПР по аппроксимационной формуле

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

аппроксимационной формуле(31).

Таблица 6. Величины а и b для расчета КПП

| Область применения              | a     | b     |
|---------------------------------|-------|-------|
| Для вычисления нижнего предела  | 8,684 | 4,679 |
| Для вычисления верхнего предела |       |       |
| При n<7,5                       | 1,550 | 0,560 |
| При n>7,5                       | 0,768 | 6,554 |

$$\varphi_{H(B)} = \frac{100}{an+b} \quad (31)$$

$$\varphi_H = \frac{100}{8,684 \cdot 6 + 4,679} = 1,76\% \quad (32)$$

Аналогично находим верхний концентрационный предел, учитывая, что  $n < 7,5$  (табл. 3).

$$\varphi_B = \frac{100}{an+b} = \frac{100}{1,550 \cdot 6 + 0,560} = 10,14\% \quad (33)$$

Экспериментальные значения КПП, приводимые в справочной литературе, составляют 1,86 и 8,41 %. Сравнивая их с расчетными, убеждаемся, что для бутана расхождение расчетных и экспериментальных данных небольшое.

**Задача 1.** Определить концентрационные пределы воспламенения насыщенных паров метанола в воздухе, если известно, что его температурные пределы составляют 280 – 312 К. Атмосферное давление нормальное.

**Решение.** Для расчета по формуле необходимо определить давление насыщенных паров, соответствующее нижнему (7 °С) и верхнему (39 °С) пределам воспламенения.

По уравнению Антуана находим давление насыщенного пара, воспользовавшись данными из таблицы III приложения:

$$\lg P = A - \frac{B}{C + t} = 8,22777 - \frac{1660,454}{245,818 + 7} = 1,65999$$

$$P_H = 45,7 \text{ мм. рт. ст.} = 45,7 \cdot 133,2 = 6092,8 \text{ Па}$$

$$\lg P = A - \frac{B}{C + t} = 8,22777 - \frac{1660,454}{245,818 + 39} = 2,39789$$

$$P_r = 250 \text{ мм. рт. ст.} = 250 \cdot 133,2 = 33300 \text{ Па}$$

По формуле определим НКПВ:

$$\varphi_{H(B)} = \frac{p_{H(B)} \cdot 100}{p^0}$$

$$\varphi_H = \frac{6092,8 \cdot 100}{101325} = 6\%$$

$$\varphi_B = \frac{33300 \cdot 100}{101325} = 32,9\%$$

### 3.3. Зависимость КПР 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.

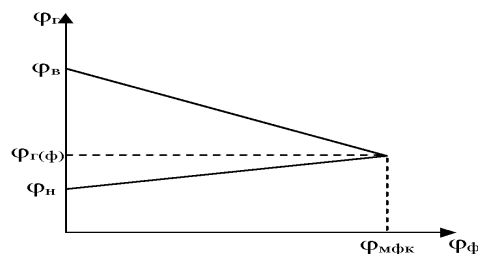


Рис.1 Зависимость концентрационных пределов распространения пламени от концентрации флегматизатора в газовой смеси

Чаще всего в качестве флегматизаторов используют нейтральные газы (нереагирующие в пламени), такие, как углекислый газ  $\text{CO}_2$ , азот  $\text{N}_2$ , водяной пар  $\text{H}_2\text{O}$ . 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 количество 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 (28), которое для этого случая запишется так

$$T_r = T_0 + \frac{Q_H}{\sum C_{p_i} V_{пгi} + C_{p_\phi} V_\phi} \quad (34)$$

где  $C_{p_\phi}$  – среднее значение теплоемкости флегматизатора при постоянном давлении для температурного интервала 273-1500 К,  $V_\phi$  – количество флегматизатора в исходной горючей смеси. Тогда из (34) получим

$$V_\phi = \frac{Q_H - (T_r - T_0) \sum C_{p_{пгi}} V_{пгi}}{(T_r - T_0) C_{p_\phi}} \quad (35)$$

Если в уравнение (35) подставить значение  $T_r = 1500$  К, то получим количество флегматизатора в исходной горючей смеси, при котором достигается эта предельная температура горения.

$$V_{МФК} = \frac{Q_H - (1500 - T_0) \sum C_{p_{пгi}} V_{пгi}}{(1500 - T_0) C_{p_\phi}} \quad (36)$$

Где  $T_0 = 273$  К

А минимальная флегматизирующая концентрация в % об. составит:

$$\varphi_{МФК} = \frac{V_\phi 100}{V_r + V_{O_2} + V_{N_2} + V_\phi} \quad (37)$$

$$\text{или } \varphi_{МФК} = \frac{n_\phi 100}{n_r + n_{O_2} + n_{N_2} + n_\phi} \quad (38)$$

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.

$$\varphi_{\Gamma(\phi)} = \frac{V_{\Gamma} 100}{V_{\Gamma} + V_{O_2} + V_{N_2} + V_{\phi}} \quad (39)$$

$$\text{или} \quad \varphi_{\Gamma(\phi)} = \frac{n_{\Gamma} 100}{n_{\Gamma} + n_{O_2} + n_{N_2} + n_{\phi}} \quad (40)$$

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

$$\varphi_{O_2(\phi)} = \frac{V_{O_2} 100}{V_{\Gamma} + V_{O_2} + V_{N_2} + V_{\phi}} \quad (41)$$

$$\text{или} \quad \varphi_{O_2(\phi)} = \frac{n_{O_2} 100}{n_{\Gamma} + n_{O_2} + n_{N_2} + n_{\phi}} \quad (42)$$

*Примечание.* Значения МВСК, полученные экспериментально для некоторых газовоздушных смесей при разбавлении их  $CO_2$ , приведены в табл. X приложения.

**Пример 2.** Рассчитать значение МФК и МВСК при разбавлении метановоздушной смеси водяным паром. Построить зависимость КПР от концентрации флегматизатора.

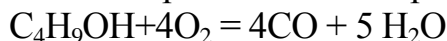
**Решение:**

МФК найдем из условия предельной адиабатической температуры горения стехиометрической метановоздушной смеси, формула(35), где  $T_c = 1500$  К:

$$V_{\phi} = \frac{Q_H - (T_{\Gamma} - T_0) \sum C_{p_i} V_{\Pi i}}{(T_{\Gamma} - T_0) C_{p_{\phi}}} \quad (43)$$

Поскольку при этих условиях сгорание идет в основном с образованием  $CO$ , определим низшую теплоту сгорания метана для такого случая.

Запишем химическое уравнение горения 2-метилпропанола-1



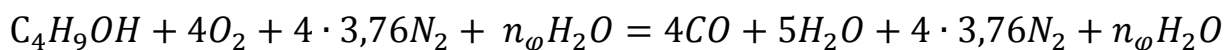
Низшая теплота сгорания 2-метилпропанола-1 в этом случае по закону Гесса

$$Q_H = 4\Delta H_{CO}^0 + 5 \cdot \Delta H_{H_2O}^0 - \Delta H_{C_4H_9OH}$$

Подставляя значения теплот образования, взятых из табл. II приложения, получим

$$Q_H = 4 \cdot (-112,7) + 5 \cdot (242,2) - (283,2) = 1378,6 \text{ кДж/моль}$$

Теперь составим уравнение материального баланса процесса горения 2-метилпропанола-1, включив в него и флегматизатор ( $H_2O$ )



где  $n_{\phi}$  - число молей флегматизатора.

Уравнение (35) для данного случая примет вид:

$$V_{\phi} = \frac{Q_H - (T_r - T_0)[Cp_{CO} \cdot V_{CO} + Cp_{H_2O} \cdot V_{H_2O} + Cp_{N_2} \cdot V_{N_2}^0]}{(T_r - T_0)Cp_{H_2O}} \quad (44)$$

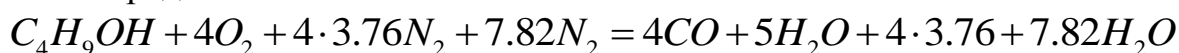
Из правой части уравнения материального баланса видно, что объем продуктов горения

$$V_{CO} = 4 \frac{\text{моль}}{\text{моль}}; \quad V_{H_2O} = 5 \frac{\text{моль}}{\text{моль}}; \quad V_{N_2}^0 = 4 \cdot 3,76 = 15,04 \frac{\text{моль}}{\text{моль}}$$

Подставляя значения  $Q_H$ ,  $T_r = 1500$  К,  $Cp_{\text{пр}}$  взятые из табл. 1 на стр. 16, получим, что объем флегматизатора, соответствующий МФК

$$V_{\phi} = \frac{1378,6 - (1500 - 273)[(3,98 \cdot 5 + 3,18 \cdot 15,04 + 3,37 \cdot 4) \cdot 10^{-2}]}{(1500 - 273) \cdot 3,98 \cdot 10^{-2}} = 7,82 \text{ моль/моль}$$

Перепишем уравнение материального баланса для сгорания смеси предельного состава



В исходной горючей смеси (левая часть уравнения) на 1 моль 2-метилпропанола-1 приходится  $n_{O_2} = 4$  моль кислорода,  $n_{O_2} = 4 \cdot 3,76$  моль азота и  $n_{\phi(H_2O)} = 3,34$  моль флегматизатора.

Минимальная флегматизирующая концентрация паров воды будет равна

$$\varphi_{\text{МФК}} = \frac{n_{\phi} 100}{n_r + n_{O_2} + n_{N_2} + n_{\phi}} = \frac{7,82 \cdot 100}{7,82 + 4 + 4 \cdot 3,76 + 1} = 28,06\%$$

а концентрация горючего в точке флегматизации

$$\varphi_{r(\phi)} = \frac{n_r 100}{n_r + n_{O_2} + n_{N_2} + n_{\phi}} = \frac{1 \cdot 100}{1 + 4 + 4 \cdot 3,76 + 7,82} = 3,58\%$$

Концентрационные пределы распространения пламени для 2-метилпропанола-1 в воздухе составляют 5 и 15 % (об.). Этих данных достаточно для построения зависимости КПР от концентрации флегматизатора (рис. 2).



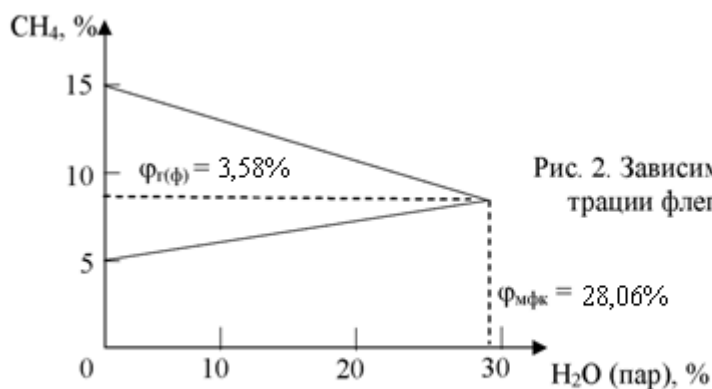


Рис. 2. Зависимость КПР метана от концентрации флегматизатора (водяной пар)

Минимальное взрывоопасное содержание кислорода (концентрация кислорода в точке флегматизации)

$$\varphi_{O_2\phi} = \frac{n_{O_2} 100}{n_{\Gamma} + n_{O_2} + n_{N_2} + n_{\phi}} = \frac{1,5}{1 + 1,5 + 1,5 \cdot 3,76 + 3,34} = 13,0\%$$

#### 4. Температурные параметры пожарной опасности

##### 4.1. 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  $\varphi_n$  (значение НКПР) можно найти парциальное давление насыщенных паров

$$P_n = \frac{\varphi_n P_0}{100} \quad (45)$$

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. III приложения).

**Пример 3.** Определить значение НТПР метилового спирта по нижнему концентрационному пределу распространения пламени. Принять, что атмосферное давление равно нормальному ( $P_0 = 101,3$  кПа).

Решение. 1. По справочнику или расчетом находим, что НКПР метилового спирта равен 6 % об. Затем определяем, какому давлению насыщенного пара соответствует значение нижнего концентрационного предела:

$$P_H = \frac{\varphi_H P_0}{100} = \frac{1,76 \cdot 101,3}{100} = 1,78 \text{ кПа}$$

Для нахождения значения НТПР ( $T_H$ ) по известной величине  $P_H$  можно, воспользоваться уравнением Антуана, выражающим зависимость давления насыщенного пара от температуры жидкости.

$$\lg P = A - \frac{B}{C + t} \quad (46)$$

где  $P$  выражено в кПа, а  $t$  в  $^{\circ}\text{C}$ .

Константы уравнения Антуана приведены в табл. II приложения. Решая уравнение относительно  $t$ , получим

$$t = \frac{B}{A - \lg P} - C \quad (47)$$

Для метилового спирта  $A = 7,83005$ ,  $B = 2058,392$ ,  $C = 245,642$ . Подставляя численные значения в уравнение (47), получим:

$$t_H = \frac{2058,392}{7,83005 - \lg 1,78} - 245,818 = 26,63^{\circ}\text{C} \text{ или } 299 \text{ К}$$

В табл. XIII приложения приведены показатели пожарной опасности некоторых жидкостей, из которой видно, что для метанола справочное значение НТПР составляет 280 К.

#### 4.2. 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  $T_{св}$  основан на эмпирической зависимости  $T_{св}$  от средней длины углеродной цепи.

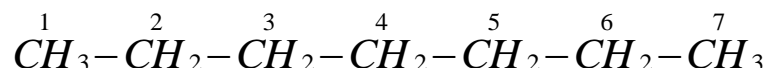
Метод пригоден для расчета  $T_{св}$  алифатических углеводородов, алифатических спиртов и ароматических углеводородов.

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.

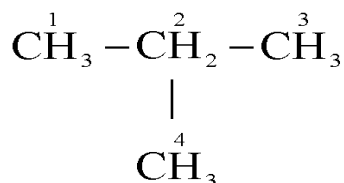
*Длина цепи* – это число атомов углерода в такой цепи.

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. IX-XI приложения находят  $T_{св}$ .

Например, для *n*-гептана  $T_{св} = 496$  К, а для изобутана  $T_{св} = 743$  К (табл. XI 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 (48):

$$m = \frac{M_p(M_p - 1)}{2} = \frac{4(4 - 1)}{2} = 6 \quad (48)$$

где  $M_p$  - число концевых функциональных групп, таких как: метил ( $-CH_3$ ), гидроксил ( $-OH$ ) и фенил ( $-C_6H_5$ ).

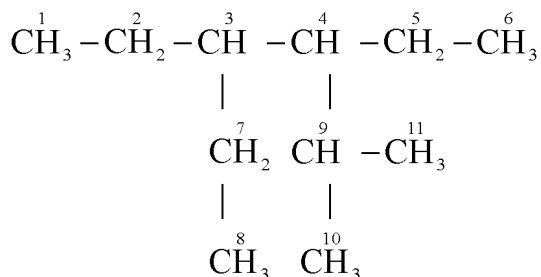
Например, в *n*-гептане две группы  $CH_3$ , т. е.  $M_p = 2$ , из формулы (32) следует, что число цепей равно 1. В изобутане  $M_p = 3$ , подставляя это значение в формулу (&), получим  $m = 3$ .

**Пример 4.** Вычислить температуру самовоспламенения 3-этил-4-изо-

пропилгексана

**Решение:**

1. Записываем структурную формулу соединения, нумеруем все атомы углерода:



2. В молекуле соединения пять концевых метильных групп  $\text{CH}_3$ , т. е.  $M_p = 5$ . Определяем число цепей:

3. Найдем эти цепи и установим их длину. Для удобства составим следующую таблицу

| Углеродная цепь $m_i$ | 1-6 | 1-8 | 1-10 | 1-11 | 6-8 | 6-10 | 6-11 | 8-10 | 8-11 | 10-11 |
|-----------------------|-----|-----|------|------|-----|------|------|------|------|-------|
| Длина цепи $\ell_i$   | 6   | 5   | 6    | 6    | 6   | 5    | 5    | 6    | 6    | 3     |

4. Определим среднее арифметическое значение длины углеродных цепей

5. По табл. VII приложения находим температуру самовоспламенения

$$l_{cp} = \frac{6 \cdot 6 + 5 \cdot 3 + 3}{10} = 5,4$$

2-метилпропанол-1 по значению средней длины цепи в молекуле соединения:  $T_{св} = 522 \text{ K} = 249^\circ \text{C}$

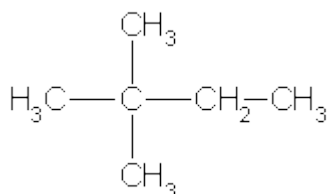
**Особенности расчета  $T_{св}$  алифатических спиртов**

При определении длины углеродных цепей в молекуле алифатического спирта необходимо учитывать следующее правило. Гидроксильная группа в углеродной цепи увеличивает ее длину на единицу.

**Пример 5.** Вычислить температуру самовоспламенения 2,2-диметилбутан

**Решение:**

1. Запишем структурную формулу соединения и пронумеруем все атомы углерода.



2. В молекуле пять концевых групп: четыре метильных (-CH<sub>3</sub>) и одна гидроксильная (-OH), т. е.  $M_p = 5$ . Тогда число цепей

$$M = \frac{M_p(M_p - 1)}{2} = \frac{4 \cdot (4 - 1)}{2} = 6$$

3. Составим таблицу, в которую внесем цепи и их длину.

|                        |     |     |     |     |     |     |
|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Углеродная цепь, $m_i$ | 1-6 | 1-5 | 1-4 | 5-6 | 4-6 | 4-5 |
| Длина цепи $l_i$       | 3   | 3   | 4   | 3   | 4   | 4   |

Длина первых четырех цепей, содержащих гидроксильную группу -OH на единицу больше, чем число атомов углерода в цепи.

4. Рассчитываем среднюю длину углеродных цепей

$$\ell_{cp} = \frac{3 \cdot 3 + 4 \cdot 3}{6} = 3,5$$

5. По табл. X прил. находим соответствующую температуру самовоспламенения  $T_0 = 717 \text{ K} = 444 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Особенности расчета $T_{св}$ ароматических соединений

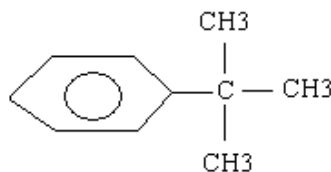
При определении числа цепей и их длины в молекуле ароматического соединения следует иметь в виду следующие правила:

1. Фенил (бензольное кольцо), находящийся внутри углеродной цепи, считается и как концевой.
2. При определении углеродной цепи атомы углерода в бензольном кольце в расчет не принимаются.
3. Фенил, находящийся в углеродной цепи, укорачивает ее на единицу.

**Пример.** Вычислить температуру самовоспламенения 2-метил-2-фенилпропана.

**Решение:**

1. Записываем структурную формулу соединения:



2. В молекуле соединения три концевые метильные группы-CH<sub>3</sub> и одна – фенил, т.е. M<sub>p</sub>=4

$$m = \frac{M_p (M_p - 1)}{2} = \frac{4(4-1)}{2} = 6$$

3. Составим таблицу, в которую внесем данные

|                                 |     |     |     |     |     |     |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Углеродная цепь, m <sub>i</sub> | 1-5 | 1-4 | 4-3 | 1-Ф | 3-Ф | Ф-4 |
| Длина цепи l <sub>i</sub>       | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   |

4. Рассчитаем среднюю длину углеродных цепей

$$\ell_{cp} = \frac{3 \cdot 6}{6} = 3$$

5. По табл. XI приложения находим соответствующую температуру самовоспламенения T<sub>0</sub> = 697 = 424 °С.

## Раздел 5. Параметры взрыва газо- и паровоздушных смесей

### 5.1. Расчет максимального давления 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

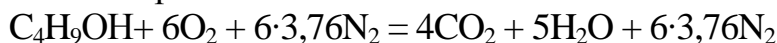
$$P_{взр}^{max} = P_0 \frac{T_{взр} n_{пг}}{T_0 n_c} \quad (49)$$

где P<sub>0</sub>, T<sub>0</sub>, n<sub>c</sub>- давление, температура и количество молей горючей смеси до взрыва; T<sub>взр</sub> и n<sub>пг</sub>- температура взрыва и количество молей продуктов горения.

**Пример 6.** Рассчитать максимальное давление взрыва газовой этановоздушной смеси стехиометрического состава. Считать, что исходная смесь до взрыва находилась при нормальных условиях (T<sub>0</sub> = 273 К, P<sub>0</sub> = 101,3 кПа). Оценить возможность разрушения технологического оборуду-

дования, рассчитанного на давление  $P_{\text{пред}} = 1,5 \cdot 10^3$  кПа при взрыве этановоздушной смеси. В этом соединении шесть

**Решение:** Запишем уравнение материального баланса процесса горения 2-метилпропанола-1



По уравнению определим количество молей газовой смеси до взрыва  $n_c$  и после взрыва  $n_{\text{пг}}$

$$n_c = n_{\tilde{A}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} = 1 + 6 + 6 \cdot 3,76 = 29,56 \text{ моль}$$

$$n_{i\tilde{A}} = n_{\tilde{\text{N}}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{N}_2} = 4 + 5 + 6 \cdot 3,76 = 31,56 \text{ моль}$$

Температуру взрыва можно определить методом последовательных приближений (пример 6). Воспользуемся расчетами, проведенными в примере 6, где было получено значение температуры взрыва для стехиометрической этановоздушной смеси  $T_{\text{взр}} = 2875$  К. Подставляя значения величин в формулу (49), получим

$$P_{\text{взр}}^{\text{max}} = 101,3 \cdot \frac{2883 \cdot 31,56}{273 \cdot 29,56} = 1142,15 \text{ кПа}$$

Избыточное давление взрыва

$$\Delta P_{\text{взр}} = P_{\text{взр}}^{\text{max}} - P_0 = 1142,15 - 101,3 = 1040,85 \text{ кПа}$$

так как  $P_{\text{взр}}^{\text{max}} < P_{\text{пред}}$ , можно сделать вывод, что технологическое оборудование не разрушится.

## 5.2. Расчет мощности взрыва и безопасного расстояния по действию воздушных ударных волн

Для оценки мощности взрыва используется понятие тротилового эквивалента. Известно, что при взрыве 1 кг тротила (тринитротолуола - ТНТ) выделяется энергия, равная  $Q_{\text{ТНТ}} = 4,19 \cdot 10^3$  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

$$M_{\text{ТНТ}} = \frac{Q_{\text{взр}} m \gamma}{Q_{\text{ТНТ}}} \quad (50)$$

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

При взрыве парогазовой смеси углеводородных топлив в ограниченном объеме (оборудование, помещение) коэффициент  $\gamma$  принимают равным 1, при взрыве в неограниченном объеме (взрыв облака парогазовой смеси)

коэффициент  $\gamma$ , как правило, принимают равным 0,4.  
Учитывая, что  $Q_{\text{взр}} \approx Q_n$ , уравнение можно записать в виде

$$M_{\text{ТНТ}} = \frac{Q_{\text{взр}} m \gamma}{Q_{\text{ТНТ}}} \quad (51)$$

Величину

$$\eta_{\text{ТНТ}} = \frac{Q_n}{Q_{\text{ТНТ}}} = \frac{34 \cdot 10^{-3}}{4,19 \cdot 10^{-3}} = 8,11 \quad (52)$$

называют тротиловым эквивалентом вещества.

Размер безопасной зоны по действию давления ударной воздушной волны взрыва  $R_{\text{без}}$ , м, рассчитывают по формуле (53):

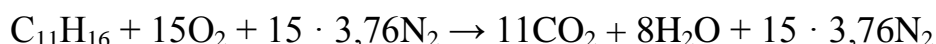
$$R_{\text{без}} = 15 \sqrt[3]{M_{\text{ТНТ}}} \quad (53)$$

### Решение задач

**Задача 1.** Рассчитать максимальное давление взрыва, мощность взрыва и безопасное расстояние для амилбензола. Считать что исходное вещество до взрыва находилось при нормальных условиях ( $T_0 = 273 \text{ K}$ ,  $P_0 = 101,3 \text{ кПа}$ ).

**Решение:**

1. Запишем уравнение материального баланса процесса горения амилбензола.



2. По уравнению определим количество молей до взрыва  $n_c$  и после взрыва  $n_{\text{пр}}$

$$n_c = n_{\text{Г}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} = 1 + 15 + 15 \cdot 3,76$$

$$n_{\text{пр}} = n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{N}_2} = 11 + 8 + 15 \cdot 3,76$$

3. Температуру взрыва определяем методом последовательных приближений.

$$\begin{aligned} \Delta H_p &= \sum H_{\text{пр}}^0 - \sum H_{\text{исх}}^0 = [11\Delta H^0(\text{CO}_2) + 8\Delta H^0(\text{H}_2\text{O})] - \Delta H^0(\text{C}_{11}\text{H}_{16}) = \\ &= [11 \cdot (-396,9) + 8 \cdot (-242,2)] - 34,4 = [-4365,9 + (-1937,6)] - 34,4 = \\ &= -6303,5 - 34,4 = -6337,9 \text{ кДж/моль} \end{aligned}$$

$$Q_n = 6337,9 \text{ кДж/моль}$$

При  $T_1 = 3000 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} Q_1 &= V_{\text{CO}_2} \cdot U_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot U_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} \cdot U_{\text{N}_2} = 11 \cdot 145 + 8 \cdot 116,3 + \\ &+ 56,4 \cdot 78,9 = 1595 + 930,4 + 4449,96 = 6975,36 \text{ кДж/моль} \end{aligned}$$

При  $T_2 = 2800 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} Q_2 &= 11 \cdot 134,2 + 8 \cdot 107 + 56,4 \cdot 73,1 = 1476,2 + 856 + 4122,84 = \\ &= 6455,04 \text{ кДж/моль} \end{aligned}$$



При  $T_3 = 2700^\circ\text{C}$

$$Q_3 = 11 \cdot 128,9 + 8 \cdot 102,4 + 56,4 \cdot 70,2 = 1417,9 + 819,2 + 3959,28 = 6196,38 \text{ кДж/моль}$$

$$T_{\text{взр}} = T_3 + \frac{T_2 - T_3}{Q_2 - Q_3} \cdot (Q_n - Q_3) = 2700 + \frac{2800 - 2700}{6455,04 - 6196,38} \cdot (6337,9 - 6196,38) = 2700 + 0,39 \cdot 141,52 = 2755^\circ\text{C} = 3028 \text{ К}$$

4. Определяем мощность взрыва и избыточное давление взрыва

$$P_{\text{взр}}^{\text{max}} = P_0 \cdot \frac{T_{\text{взр}} \cdot n_{\text{пг}}}{T_0 \cdot n_c} = 101,3 \cdot \frac{3028 \cdot 75,4}{273 \cdot 72,4} = 1170,13 \text{ кПа}$$

Избыточное давление взрыва

$$\Delta P_{\text{взр}} = P_{\text{взр}}^{\text{max}} - P_0 = 1170,13 - 101,3 = 1068,83 \text{ кПа}$$

5. Рассчитываем тротильный эквивалент и размер безопасной зоны.

Для того, чтобы рассчитать тротильный эквивалент необходимо перевести низшую теплоту сгорания  $Q_n = 6337,9 \text{ кДж/моль}$ , в  $\text{кДж/кг}$ , разделив на молярную массу амилбензола ( $M = 149 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ )

$$Q_n = \frac{6337,9}{149 \cdot 10^{-3}} = 42,5 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$$

Энергия взрыва 1 кг тротила  $Q_{\text{тнт}} = 4,19 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$

6. Количество тротила для 1 кг амилбензола будет равно:

$$M_{\text{тнт}} = \frac{Q_{\text{взр}} m_{\gamma}}{Q_{\text{тнт}}} = \frac{42,5 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 0,4}{4,19 \cdot 10^3} = 4,06 \text{ кг}$$

Подставляя эти значения в формулу (52) получим тротильный эквивалент амилбензола:

$$\eta_{\text{тнт}} = \frac{Q_n}{Q_{\text{тнт}}} = \frac{42,5 \cdot 10^3}{4,19 \cdot 10^3} = 10,1$$

7. Размер безопасной зоны равен

$$R_{\text{без}} = 15 \sqrt[3]{4,06} \approx 23,93 \text{ м}$$

**Ответ:**

Мощность взрыва равен 1170,13 кПа;

Количество тротила равно 4,06 кг;

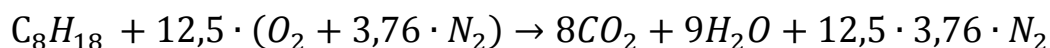
Тротильный эквивалент вещества равен 10,1;

Размер безопасной зоны составляет 23,93 м

**Задача 2.** Рассчитать максимальное давление взрыва, мощность взрыва и безопасное расстояние для 2,4 – диметилгексана. Считать что исходное вещество до взрыва находилось при нормальных условиях ( $T_0 = 273 \text{ К}$ ,  $P_0 = 101,3 \text{ кПа}$ )

**Решение:**

1. Запишем уравнение материального баланса процесса горения 2,4 – диметилгексана



2. По уравнению определим количество молей до взрыва  $n_c$  и после взрыва  $n_{\Pi}$

$$n_c = n_T + n_{O_2} + n_{N_2} = 1 + 12,5 + 12,5 \cdot 3,76 = 60,5 \text{ моль}$$

$$n_{\Pi} = n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{N_2} = 8 + 9 + 12,5 \cdot 3,76 = 64 \text{ моль}$$

3. Температуру взрыва определяем методом последовательных приближений.

$$\Delta H = \sum \Delta H_{\text{пр}}^0 - \sum \Delta H_{\text{исх}}^0 = [8 \cdot \Delta H^0(CO_2) + 9 \cdot \Delta H^0(H_2O)] - \Delta H^0(C_8H_{18})$$

$$\Delta H = [8 \cdot (-396,9) + 9 \cdot (-242,2)] - (-249,95) = -5105,05 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$$

$$Q_H = 5105,05 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$$

$$Q = U_{CO_2} \cdot V_{CO_2} + U_{H_2O} \cdot V_{H_2O} + U_{N_2} \cdot V_{N_2}^0$$

При  $T_1 = 2800^\circ\text{C}$

$$Q_1 = 8 \cdot 134,2 + 9 \cdot 107 + 47 \cdot 73,1 = 1073,6 + 963 + 3435 = 5472,3 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$$

При  $T_2 = 2700^\circ\text{C}$

$$Q_2 = 8 \cdot 128,9 + 9 \cdot 102,4 + 47 \cdot 70,2 = 5252,2 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$$

При  $T_3 = 2600^\circ\text{C}$

$$Q_3 = 8 \cdot 123,7 + 9 \cdot 97,8 + 47 \cdot 67,4 = 989,6 + 880,2 + 3167,8 = 5037,6 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$$

$$T_{\text{взр}} = T_3 + \frac{T_2 - T_3}{Q_2 - Q_3} \cdot Q_H - Q_3 = 2600 + \frac{2700 - 2600}{5252,2 - 5037,6} \cdot 5105,05 - 5037,6$$

$$T_{\text{взр}} = 2632^\circ\text{C} = 2905\text{K}$$

4. Определяем мощность взрыва и избыточное давление взрыва

$$p_{\text{взр}}^{\text{max}} = p_0 \cdot \frac{T_{\text{взр}} \cdot n_{\Pi}}{T_0 \cdot n_c} = 101,3 \cdot \frac{2905 \cdot 64}{273 \cdot 60,5} = 1140,29 \text{ кПа}$$

Избыточное давление взрыва будет равно:

$$\Delta p_{\text{взр}} = p_{\text{взр}}^{\text{max}} - p_0 = 1140,29 - 101,3 = 1038,99 \text{ кПа}$$

5. Рассчитываем тротиловый эквивалент и размер безопасной зоны.

Для того, чтобы рассчитать тротиловый эквивалент необходимо перевести низшую теплоту сгорания  $Q_H = 5105,05 \text{ кДж/моль}$ , в  $\text{кДж/кг}$ , разделив на молярную массу 2,4 – диметилгексана ( $M = 114 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ ):

$$Q_H = \frac{5105,05}{114 \cdot 10^{-3}} = 44,78 \cdot 10^{-3} \text{ кДж/кг}$$

Энергия взрыва 1 кг тротила  $Q_{\text{ТНТ}} = 4,19 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$

6. Количество тротила для 1 кг тротила 2,4 – диметилгексана будет равно:

$$M_{\text{ТНТ}} = \frac{Q_{\text{взр}} \cdot m \cdot \gamma}{Q_{\text{ТНТ}}} = \frac{44,78 \cdot 1 \cdot 0,4}{4,19 \cdot 10^3} = 4,27 \text{ кг}$$

Подставляя эти значения в формулу (52) получим тротиловый эквивалент 2,4 – диметилгексана:

$$\eta_{\text{ТНТ}} = \frac{Q_{\text{н}}}{Q_{\text{ТНТ}}} = \frac{44,78 \cdot 10^3}{4,19 \cdot 10^3} = 10,68$$

7.Размер безопасной зоны равен:

$$R_{\text{без}} = 15 \sqrt[3]{M_{\text{ТНТ}}} = 15 \sqrt[3]{4,27} = 24,3 \text{ м}$$

**Ответ:**

Мощность взрыва равна 1140,29 кПа;

Количество тротила равно 4,27 кг;

Тротиловый эквивалент вещества равен 10,68;

Размер безопасной зоны составляет 24,3 м.

## **6. Контрольная работа для студентов заочной формы обучения**

### **Часть 1. Расчет параметров горения и взрыва**

Для вещества  $A$  (выбрать в табл. 7 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 ( $P_{max}$ );
- тротильный эквивалент вещества ( $\eta_{ТНТ}$ ).

### **Часть 2. Сравнение полученных расчетных значений со справочными данными**

Найти в справочной литературе или в Интернете пожаровзрывоопасные характеристики вещества  $A$  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. 3 в соответствии с номером варианта задания) определить:

- какое количество вещества  $A$  (кг) должно испариться в этом помещении, чтобы в нем создалась наиболее взрывоопасная паровоздушная смесь,
- тротильный 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.

**Таблица 7 – Расчёт параметров взрыва парогазовых смесей**

Рассчитать максимальное избыточное давление взрыва и безопасное расстояние по действию ударной волны взрыва для парогазовоздушной смеси указанных веществ.

| №<br>п/п | Вещество                                | Исходные данные   |
|----------|---|---|
| I        | II                                      | III   |
| 1        | $C_2H_4O_{(г)}$ – ацетальдегид          | $m = 30 \text{ кг}; T_0 = 297 \text{ К}; T_{\text{взр}} = 2300 \text{ К}; P_0 = 0,2 \text{ МПа.}$   |
| 2        | $CH_4_{(г)}$ – метан                    | $m = 12 \text{ кг}; T_0 = 273 \text{ К}; T_{\text{взр}} = 2550 \text{ К}; P_0 = 0,1 \text{ МПа.}$   |
| 3        | $C_2H_2_{(г)}$ – ацетилен               | $m = 8 \text{ кг}; T_0 = 295 \text{ К}; T_{\text{взр}} = 2480 \text{ К}; P_0 = 101325 \text{ Па.}$  |
| 4        | $C_2H_4_{(г)}$ – этилен                 | $m = 15 \text{ кг}; T_0 = 278 \text{ К}; T_{\text{взр}} = 2100 \text{ К}; P_0 = 0,2 \text{ МПа.}$   |
| 5        | $C_2H_6_{(г)}$ – этан                   | $m = 40 \text{ кг}; T_0 = 285 \text{ К}; T_{\text{взр}} = 2310 \text{ К}; P_0 = 0,15 \text{ МПа.}$  |
| 6        | $C_3H_6_{(г)}$ – пропен (пропилен)      | $m = 11 \text{ кг}; T_0 = 290 \text{ К}; T_{\text{взр}} = 2287 \text{ К}; P_0 = 101300 \text{ Па.}$ |
| 7        | $C_3H_8_{(г)}$ – пропан                 | $m = 20 \text{ кг}; T_0 = 299 \text{ К}; T_{\text{взр}} = 2300 \text{ К}; P_0 = 0,2 \text{ МПа.}$   |
| 8        | $C_4H_{10(г)}$ – н-бутан                | $m = 17 \text{ кг}; T_0 = 291 \text{ К}; T_{\text{взр}} = 2400 \text{ К}; P_0 = 0,3 \text{ МПа.}$   |
| 9        | $C_5H_{12(г)}$ – пентан                 | $m = 3 \text{ кг}; T_0 = 290 \text{ К}; T_{\text{взр}} = 2100 \text{ К}; P_0 = 0,1 \text{ МПа.}$    |
| 10       | $C_6H_6_{(ж)}$ – бензол                 | $m = 16 \text{ кг}; T_0 = 271 \text{ К}; T_{\text{взр}} = 2290 \text{ К}; P_0 = 0,1 \text{ МПа.}$   |
| 11       | $C_6H_{12(г)}$ – циклогексан            | $m = 25 \text{ кг}; T_0 = 289 \text{ К}; T_{\text{взр}} = 2330 \text{ К}; P_0 = 0,2 \text{ МПа.}$   |
| 12       | $C_7H_8_{(ж)}$ – толуол                 | $m = 30 \text{ кг}; T_0 = 290 \text{ К}; T_{\text{взр}} = 2200 \text{ К}; P_0 = 0,2 \text{ МПа.}$   |
| 13       | $CH_4O_{(ж)}$ – метанол                 | $m = 19 \text{ кг}; T_0 = 287 \text{ К}; T_{\text{взр}} = 2250 \text{ К}; P_0 = 101290 \text{ Па.}$ |
| 14       | $CH_2O_{(г)}$ – метаналь (формальдегид) | $m = 45 \text{ кг}; T_0 = 300 \text{ К}; T_{\text{взр}} = 2285 \text{ К}; P_0 = 0,1 \text{ МПа.}$   |
| 15       | $C_2H_6O_{(ж)}$ – этанол                | $m = 9 \text{ кг}; T_0 = 297 \text{ К}; T_{\text{взр}} = 2200 \text{ К}; P_0 = 0,2 \text{ МПа.}$    |
| 16       | $C_3H_6O_{(ж)}$ – ацетон                | $m = 7 \text{ кг}; T_0 = 295 \text{ К}; T_{\text{взр}} = 2315 \text{ К}; P_0 = 101320 \text{ Па.}$  |
| 17       | $C_4H_{10}O_{(ж)}$ – диэтиловый эфир    | $m = 26 \text{ кг}; T_0 = 297 \text{ К}; T_{\text{взр}} = 2300 \text{ К}; P_0 = 0,3 \text{ МПа.}$   |
| 18       | $CH_3Cl_{(ж)}$ – хлорметан              | $m = 17 \text{ кг}; T_0 = 280 \text{ К}; T_{\text{взр}} = 2290 \text{ К}; P_0 = 0,1 \text{ МПа.}$   |

## Варианты заданий

| Номер<br>варианта | Вещество                                       | Химическая<br>формула | Размеры помеще-<br>ния<br>$a \times b \times h$ , м |
|-------------------|--|-----------------------|---|
| 01                | амилбензол                                     | $C_{11}H_{16}$        | $4,0 \times 3,5 \times 3,0$                         |
| 02                | трет-амиловый спирт (2-метил-2-бутанол)        | $C_5H_{12}O$          | $5,0 \times 4,0 \times 2,5$                         |
| 03                | трет-бутилбензол<br>(2-метил-2-фенилпропан)    | $C_{10}H_{14}$        | $4,5 \times 4,0 \times 3,0$                         |
| 04                | 2,2-диметилбутан                               | $C_6H_{14}$           | $5,5 \times 4,0 \times 3,0$                         |
| 05                | 2,4-диметилгексан                              | $C_8H_{18}$           | $6,0 \times 4,5 \times 3,0$                         |
| 06                | 3,3-диметилгептан                              | $C_9H_{20}$           | $7,0 \times 5,0 \times 3,5$                         |
| 07                | 2,6-диметил-4-гептанол                         | $C_9H_{20}O$          | $6,5 \times 4,0 \times 3,0$                         |
| 08                | 4,5-диметилоктан                               | $C_{10}H_{22}$        | $7,5 \times 5,0 \times 4,0$                         |
| 09                | 2,2-диметилпентан                              | $C_7H_{16}$           | $8,0 \times 5,5 \times 4,0$                         |
| 10                | 2,4-диметил-3-пентанол                         | $C_7H_{16}O$          | $8,5 \times 5,0 \times 4,0$                         |
| 11                | 2,4-диметил-<br>3-этилпентан                   | $C_9H_{20}$           | $7,5 \times 4,0 \times 4,0$                         |
| 12                | 1,4-диэтилбензол                               | $C_{10}H_{14}$        | $8,0 \times 5,0 \times 3,5$                         |
| 13                | 3,5-диэтилтолуол                               | $C_{11}H_{16}$        | $9,0 \times 5,5 \times 4,0$                         |
| 14                | втор-изоамиловый спирт<br>(3-метил-2-бутанол)  | $C_5H_{12}O$          | $9,5 \times 5,0 \times 4,0$                         |
| 15                | изобутиловый спирт<br>(2-метил-1-пропанол)     | $C_4H_{10}O$          | $6,5 \times 6,0 \times 4,0$                         |
| 16                | изогексиловый спирт<br>(4-метил-1-пентанол)    | $C_6H_{14}O$          | $10,0 \times 6,0 \times 3,5$                        |
| 17                | 4-изопропилгептан                              | $C_{10}H_{22}$        | $9,5 \times 6,0 \times 4,0$                         |
| 18                | п-ксилол<br>(1,4-диметилбензол)                | $C_8H_{10}$           | $10,0 \times 4,5 \times 3,0$                        |
| 19                | 2-метил-1-бутанол                              | $C_5H_{12}O$          | $6,0 \times 5,0 \times 2,5$                         |
| 20                | 3-метилгексан<br>(изогептан)                   | $C_7H_{16}$           | $8,5 \times 4,0 \times 3,0$                         |
| 21                | 2-метилгептан<br>(изооктан)                    | $C_8H_{18}$           | $9,0 \times 6,0 \times 5,5$                         |
| 22                | 4-метилоктан                                   | $C_9H_{20}$           | $6,53,0 \times 3,0$                                 |
| 23                | 3-метилпентан<br>(2-этильутан)                 | $C_6H_{14}$           | $8,0 \times 6,0 \times 4,5$                         |
| 24                | 4-метил-2-пентанол<br>(метиламиловый спирт)    | $C_6H_{14}O$          | $10,5 \times 6,0 \times 5,0$                        |
| 25                | 3-метил-4-этилгексан                           | $C_9H_{20}$           | $6,0 \times 4,5 \times 3,0$                         |
| 26                | 2-метил-3-этилпентан                           | $C_8H_{18}$           | $8,0 \times 5,0 \times 4,0$                         |
| 27                | 4-метил-2-этилпентанол<br>(2-этилизогексанола) | $C_8H_{18}O$          | $7,0 \times 4,0 \times 3,0$                         |

## 7. Рекомендуемая литература

1. Яблоков В.А. Теория горения и взрывов. Учебное пособие. – Нижний Новгород: Изд-во НГАСУ, 2007. – 55 с.
2. Беззапонная О. В. , Вайнтер Е.В. Основы процессов горения. Материальный и тепловой баланс процессов горения. Учебное пособие – Екатеринбург: Изд-во УГТУ 2008 – 102 с.
3. Сазонов, В. Г. Основы теории горения и взрыва: учебное пособие / В. Г. Сазонов. - Москва: МГАВТ, 2012. - 168 с. - Текст: электронный. - URL: <https://new.znaniy.com/catalog/product/420467> (дата обращения: 18.05.2020)
4. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва: практикум: Учебное пособие / Девисилов В.А., Дроздова Т.И., Тимофеева С.С., - 2-е изд., перераб. и доп - Москва :Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 384 с. (Высшее образование)ISBN 978-5-00091-006-1. - Текст: электронный. - URL: <https://new.znaniy.com/catalog/product/489498> (дата обращения: 18.05.2020)
5. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва: учебник / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, А.И. Скушников. — Москва: ИНФРА-М, 2019. — 262 с. — (Высшее образование: Бакалавриат). — DOI 10.12737/7763. - ISBN 978-5-16-102465-2. - Текст: электронный. - URL: <https://new.znaniy.com/catalog/product/1008365> (дата обращения: 18.05.2020)
6. Шапров, М. Н. Теория горения и взрыва: учебное пособие / М. Н. Шапров. — Волгоград: Волгоградский ГАУ, 2016. — 92 с. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/76691> (дата обращения: 18.05.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

## 8. Приложение

Таблица I

### Основные физические константы некоторых газов

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

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

Таблица II

Теплота образования веществ, температура кипения и значения коэффициентов  $A, B, C$

в уравнении Антуана  $\lg P = A - \frac{B}{C + t}$ , где  $P$  в кПа, а  $t$  в °C

| №  | Вещество                 | Теплота<br>обра-<br>зования<br>$\Delta H_f$ ,<br>кДж/моль | Температура<br>кипения,<br><br>°C | Коэффициенты<br>уравнения Антуана |          |         |
|----|--------------------------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|---------|
|    |                          |   |                                   | $A$                               | $B$      | $C$     |
| 1  | амилбензол               | 34,4  | 202,0                             | 6,68328                           | 2069,486 | 210,431 |
| 2  | трет-амиловый спирт      | 330,0   | 102,3                             | 6,44711                           | 1252,216 | 180,301 |
| 3  | трет-бутилбензол         | 22,68   | 168,0                             | 6,68934                           | 1911,894 | 239,664 |
| 4  | 2,2-диметилбутан         | 177,8   | 49,7                              | 5,93476                           | 1127,187 | 228,9   |
| 5  | 2,4-диметилгексан        | 219,4   | 109,4                             | 5,97799                           | 1287,876 | 214,79  |
| 6  | 3,3-диметилгептан        | 241,6   | 137,0                             | 6,21073                           | 1509,585 | 221,989 |
| 7  | 2,6-диметил-4-гептанол   | 412,1   | 176,5                             | 5,66299                           | 1144,81  | 135,0   |
| 8  | 4,5-диметиллоктан        | 253,4   | 162,1                             | 6,31873                           | 1645,436 | 219,378 |
| 9  | 2,2-диметилпентан        | 206,1   | 79,2                              | 5,93972                           | 1190,033 | 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                           | 1820,632 | 230,413 |
| 13 | 3,5-диэтилтолуол         | 56,0  | 201,0                             | 6,50299                           | 1926,654 | 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                           | 2058,392 | 245,642 |
| 16 | изогексиловый спирт      | 325,7   | 151,6                             | 7,05114                           | 1273,35  | 153,56  |
| 17 | 4-изопропилгептан        | 251,1   | 158,0                             | 6,31693                           | 1628,498 | 219,75  |
| 18 | п-ксилол                 | 24,4  | 138,3                             | 6,25485                           | 1537,082 | 223,608 |
| 19 | 2-метил-1-бутанол        | 305,8   | 128,0                             | 6,29693                           | 1258,332 | 109,165 |
| 20 | 3-метилгексан            | 194,9   | 92,0                              | 5,99812                           | 1236,026 | 219,545 |
| 21 | 2-метилгептан            | 215,5   | 117,6                             | 6,0423                            | 1337,468 | 213,693 |
| 22 | 4-метилоктан             | 233,3   | 142,4                             | 6,27293                           | 1553,088 | 221,45  |
| 23 | 3-метилпентан            | 171,6   | 63,3                              | 5,97380                           | 1152,368 | 227,129 |
| 24 | 4-метил-2-пентанол       | 344,2   | 133,0                             | 7,59199                           | 2174,869 | 257,78  |
| 25 | 3-метил-4-этилгексан     | 229,9   | 140,6                             | 6,21413                           | 1524,093 | 221,543 |
| 26 | 2-метил-3-этилпентан     | 211,2   | 115,6                             | 5,98851                           | 1318,120 | 215,306 |
| 27 | 4-метил-2-этилпентанол   | 385,0   | 177,3                             | 5,70756                           | 1134,599 | 129,195 |
| 28 | пентаметилбензол         | 73,5  | 232,0                             | 6,68333                           | 2069,486 | 210,431 |
| 29 | пропилбензол             | 7,9   | 159,0                             | 6,29713                           | 1627,827 | 220,499 |



**Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении**

| Температура<br>$t, ^\circ\text{C}$ | Теплосодержание, кДж/кмоль |                |          |                 |                  |                 |
|------------------------------------|----------------------------|----------------|----------|-----------------|------------------|-----------------|
|                                    | O <sub>2</sub>             | N <sub>2</sub> | Воздух   | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O | SO <sub>2</sub> |
| 100                                | 2956,0                     | 2917,0         | 2917,5   | 3814,1          | 1281,7           | 4081,1          |
| 200                                | 5991,7                     | 5849,3         | 5866,0   | 8019,6          | 6829,7           | 8505,7          |
| 300                                | 9125,8                     | 8819,9         | 8861,8   | 12536,5         | 10378,6          | 13223,6         |
| 400                                | 12360,5                    | 11849,3        | 11924,7  | 17313,1         | 14044,9          | 18167,8         |
| 500                                | 15678,9                    | 14945,7        | 15058,8  | 22303,4         | 17828,4          | 23275,4         |
| 600                                | 19072,9                    | 18104,9        | 18255,8  | 27473,8         | 21733,5          | 28533,9         |
| 700                                | 22521,2                    | 21331,3        | 21524,0  | 32795,1         | 25772,7          | 33876,1         |
| 800                                | 26019,9                    | 24616,2        | 24842,5  | 38237,9         | 29937,5          | 39285,5         |
| 900                                | 29564,6                    | 27955,7        | 28211,3  | 43785,5         | 34232,3          | 44799,5         |
| 1000                               | 33142,9                    | 31337,0        | 31621,9  | 49442,0         | 38648,5          | 50321,9         |
| 1100                               | 36750,5                    | 34760,2        | 35074,5  | 55140,4         | 43198,9          | 55907,2         |
| 1200                               | 40391,6                    | 38221,2        | 38560,6  | 60922,6         | 47807,9          | 61492,4         |
| 1300                               | 44036,9                    | 41719,8        | 42067,6  | 66788,6         | 52584,5          | 67161,5         |
| 1400                               | 47724,1                    | 45252,0        | 45629,1  | 72654,6         | 57403,0          | 72797,1         |
| 1500                               | 51453,2                    | 48771,6        | 49190,6  | 78562,5         | 62347,2          | 78436,8         |
| 1600                               | 55182,3                    | 52375,0        | 52794,0  | 84554,2         | 67333,3          | 84135,2         |
| 1700                               | 58953,3                    | 55936,5        | 56397,4  | 90545,9         | 72445,1          | 89821,0         |
| 1800                               | 62766,2                    | 59539,9        | 60000,8  | 96579,5         | 77598,8          | 95557,1         |
| 1900                               | 66579,1                    | 63143,3        | 63646,1  | 102613,1        | 82794,4          | 101184,3        |
| 2000                               | 70392,0                    | 66788,6        | 67333,3  | 108646,7        | 88073,8          | 107012,6        |
| 2100                               | 74246,8                    | 70433,9        | 71020,5  | 114722,2        | 93395,1          | 112715,2        |
| 2200                               | 78101,6                    | 74121,1        | 74707,7  | 120839,6        | 98758,3          | 118451,3        |
| 2300                               | 81998,3                    | 77766,4        | 78394,9  | 126915,1        | 104163,4         | 124220,9        |
| 2400                               | 85936,9                    | 81453,6        | 82124,0  | 133032,5        | 109631,3         | 130024,1        |
| 2500                               | 89875,5                    | 85140,8        | 85853,1  | 139149,9        | 115141,1         | 135756,0        |
| 2600                               | 94015,2                    | 89003,9        | 89330,8  | 145325,9        | 119398,2         | 141513,0        |
| 2700                               | 97857,4                    | 92653,5        | 93105,9  | 151481,1        | 124782,4         | 147295,2        |
| 2800                               | 101833,7                   | 96437,0        | 96789,0  | 157560,7        | 130342,5         | 152985,3        |
| 2900                               | 106124,2                   | 100488,7       | 100488,7 | 163795,5        | 135848,2         | 158813,6        |
| 3000                               | 110113,2                   | 103828,2       | 104205,3 | 169946,4        | 141161,1         | 164667,0        |

**Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении**

| Температура<br>$t, ^\circ\text{C}$ | Теплосодержание, кДж/м <sup>3</sup> |                |        |                 |                  |                 |
|------------------------------------|-------------------------------------|----------------|--------|-----------------|------------------|-----------------|
|                                    | O <sub>2</sub>                      | N <sub>2</sub> | воздух | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O | SO <sub>2</sub> |
| 100                                | 131,8                               | 130,1          | 130,1  | 170,1           | 150,6            | 181,4           |
| 200                                | 267,2                               | 260,9          | 261,6  | 357,7           | 304,7            | 377,9           |
| 300                                | 407,1                               | 393,6          | 395,4  | 559,7           | 463,0            | 587,0           |
| 400                                | 551,4                               | 528,7          | 532,1  | 772,6           | 626,8            | 824,6           |
| 500                                | 669,3                               | 666,6          | 672,0  | 925,1           | 786,2            | 1034,9          |
| 600                                | 850,6                               | 807,8          | 814,5  | 1225,6          | 969,5            | 1269,6          |
| 700                                | 1004,7                              | 951,9          | 960,3  | 1463,1          | 1149,7           | 1507,5          |
| 800                                | 1160,6                              | 1098,2         | 1108,2 | 1706,2          | 1335,3           | 1746,4          |
| 900                                | 1319,0                              | 1246,9         | 1258,7 | 1953,8          | 1527,2           | 1994,8          |
| 1000                               | 1478,6                              | 1398,2         | 1410,7 | 2205,2          | 1724,2           | 2237,4          |
| 1100                               | 1639,5                              | 1551,1         | 1564,9 | 2460,4          | 1926,5           | 2488,8          |
| 1200                               | 1802,1                              | 1705,3         | 1720,4 | 2718,5          | 2133,9           | 2735,2          |
| 1300                               | 1965,1                              | 1861,2         | 1877,5 | 2979,1          | 2345,5           | 2979,5          |
| 1400                               | 2129,8                              | 2010,0         | 2035,5 | 3241,4          | 2560,9           | 3238,0          |
| 1500                               | 2295,7                              | 2176,7         | 2194,7 | 3505,7          | 2781,3           | 3488,2          |
| 1600                               | 2462,4                              | 2335,5         | 2355,2 | 3771,4          | 3004,2           | 3747,5          |
| 1700                               | 2630,5                              | 2495,9         | 2515,7 | 4039,6          | 3231,7           | 4003,1          |
| 1800                               | 2799,7                              | 2656,4         | 2678,2 | 4307,3          | 3461,3           | 4261,2          |
| 1900                               | 2969,4                              | 2818,2         | 2840,4 | 4579,7          | 3693,5           | 4529,8          |
| 2000                               | 3140,8                              | 2979,9         | 3004,2 | 4847,8          | 3928,5           | 4667,6          |
| 2100                               | 3311,7                              | 3142,9         | 3167,6 | 5118,2          | 4166,1           | 5059,4          |
| 2200                               | 3497,8                              | 3306,3         | 3332,3 | 5392,5          | 4405,8           | 5337,2          |
| 2300                               | 3659,1                              | 3469,3         | 3497,4 | 5660,7          | 4667,1           | 5608,7          |
| 2400                               | 3834,3                              | 3633,1         | 3663,3 | 5933,0          | 4890,9           | 5892,8          |
| 2500                               | 4009,8                              | 3797,4         | 3828,8 | 6209,6          | 5136,5           | 6169,8          |
| 2600                               | 4184,9                              | 3953,9         | 3988,4 | 6487,4          | 5387,1           | 6460,1          |
| 2700                               | 4368,9                              | 4135,9         | 4156,5 | 6761,8          | 5639,3           | 6753,8          |
| 2800                               | 4546,1                              | 4304,4         | 4320,7 | 7033,3          | 5897,8           | 7050,9          |
| 2900                               | 4729,2                              | 4469,0         | 4484,9 | 7311,1          | 6159,3           | 7351,3          |
| 3000                               | 4914,9                              | 4634,5         | 4652,1 | 7589,7          | 6425,8           | 7655,1          |

**Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении**

| Температура,<br>$T, ^\circ\text{C}$ | Н, кДж/моль    |                |        |                 |                  |                 |
|-------------------------------------|----------------|----------------|--------|-----------------|------------------|-----------------|
|                                     | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | Воздух | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O | SO <sub>2</sub> |
| 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           |

## Внутренняя энергия газов

| Темпера-<br>тура $T$ , °C | $U$ , кДж/моль |                |        |                 |                  |                 | Темпера-<br>тура $T$ , °C |
|---------------------------|----------------|----------------|--------|-----------------|------------------|-----------------|---------------------------|
|                           | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | Воздух | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O | SO <sub>2</sub> |                           |
| 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            | 1900                      |
| 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                      |

## Химические и структурные формулы веществ

| №<br>п/п | Вещество                                    | Хим. формула   | Структурная формула   |
|----------|---|----------------|---|
| 1        | амилбензол                                  | $C_{11}H_{16}$ | $CH_3 - CH_2 - CH_2 - CH_2 - CH_2 - \text{C}_6\text{H}_5$   |
| 2        | трет-амиловый спирт<br>(2-метил-2-бутанол)  | $C_5H_{12}O$   | $  \begin{array}{c}  OH \\    \\  CH_3 - C - CH_2 - CH_3 \\    \\  CH_3  \end{array}  $   |
| 3        | трет-бутилбензол<br>(2-метил-2-фенилпропан) | $C_{10}H_{14}$ | $  \begin{array}{c}  CH_3 \\    \\  \text{C}_6\text{H}_5 - C - CH_3 \\    \\  CH_3  \end{array}  $  |
| 4        | 2,2-диметилбутан                            | $C_6H_{14}$    | $  \begin{array}{c}  CH_3 \\    \\  CH_3 - C - CH_2 - CH_3 \\    \\  CH_3  \end{array}  $   |
| 5        | 2,4-диметилгексан                           | $C_8H_{18}$    | $  \begin{array}{ccccccc}  CH_3 & -CH- & CH_2- & CH- & CH_2- & CH_3 \\  &   & &   & & \\  & CH_3 & & CH_3 & &   \end{array}  $  |
| 6        | 3,3-диметилгептан                           | $C_9H_{20}$    | $  \begin{array}{ccccccc}  & & CH_3 & & & & \\  & &   & & & & \\  CH_3 & -CH_2- & C- & CH_2- & CH_2- & CH_2- & CH_3 \\  & &   & & & & \\  & & CH_3 & & & &   \end{array}  $     |
| 7        | 2,6-диметил-4-гептанол                      | $C_9H_{20}O$   | $  \begin{array}{ccccccc}  & & & OH & & & \\  & & &   & & & \\  CH_3 & -CH- & -CH_2- & CH- & -CH_2- & CH- & CH_3 \\  &   & & & &   & \\  & CH_3 & & & & CH_3 &   \end{array}  $ |
| 8        | 4,5-диметилоктан                            | $C_{10}H_{22}$ | $  \begin{array}{ccccccc}  & & CH_3 & & & & \\  & &   & & & & \\  CH_2 & -CH_2- & CH- & -CH- & -CH_2- & CH_2- \\    & & &   & &   \\  CH_3 & & & CH_3 & & CH_3  \end{array}  $  |

|    |   |                 |   |
|----|---|-----------------|---|
| 9  | 2,2-диметилпентан                             | $C_7 H_{16}$    | $  \begin{array}{c}  CH_3 \\    \\  CH_3 - C - CH_2 - CH_2 - CH_3 \\    \\  CH_3  \end{array}  $  |
| 10 | 2,4-диметил-3-пентанол                        | $C_7 H_{16} O$  | $  \begin{array}{c}  OH \\    \\  CH_3 - CH - CH - CH - CH_3 \\    \quad \quad   \\  CH_3 \quad \quad CH_3  \end{array}  $  |
| 11 | 2,4-диметил-3-этилпентан                      | $C_9 H_{20}$    | $  \begin{array}{c}  CH_3 - CH - CH - CH - CH_3 \\    \quad \quad   \quad \quad   \\  CH_3 \quad CH_2 \quad CH_3 \\    \\  CH_3  \end{array}  $   |
| 12 | 1,4-диэтилбензол                              | $C_{10} H_{14}$ | $  CH_3 - CH_2 - \text{C}_6\text{H}_4 - CH_2 - CH_3  $  |
| 13 | 3,5-диэтилтолуол                              | $C_{11} H_{16}$ | $  \begin{array}{c}  \quad \quad \quad CH_2 - CH_3 \\  \quad \quad \quad / \\  CH_3 - \text{C}_6\text{H}_4 \\  \quad \quad \quad \backslash \\  \quad \quad \quad CH_2 - CH_3  \end{array}  $ |
| 14 | втор-изоамиловый спирт<br>(3-метил-2-бутанол) | $C_5 H_{12} O$  | $  \begin{array}{c}  OH \quad CH_3 \\    \quad   \\  CH_3 - CH - CH - CH_3  \end{array}  $  |
| 15 | изобутиловый спирт<br>(2-метил-1-пропанол)    | $C_4 H_{10} O$  | $  \begin{array}{c}  CH_3 \\    \\  OH - CH_2 - CH - CH_3  \end{array}  $   |
| 16 | изогексиловый спирт<br>(4-метил-1-пентанол)   | $C_6 H_{14} O$  | $  \begin{array}{c}  CH_3 \\    \\  OH - CH_2 - CH_2 - CH_2 - CH - CH_3  \end{array}  $   |
| 17 | 4-изопропилгептан                             | $C_{10} H_{22}$ | $  \begin{array}{c}  CH_3 - CH - CH_3 \\    \\  CH_3 - CH_2 - CH_2 - CH - CH_2 - CH_2 - CH_3  \end{array}  $  |

|    |   |               |   |
|----|---|---------------|---|
| 18 | п-ксилол<br>(1,4-диметилбензол)             | $C_8 H_{10}$  | $CH_3 - \text{C}_6\text{H}_4 - CH_3$  |
| 19 | 2-метил-1-бутанол                           | $C_5 H_{12}O$ | $\begin{array}{c} CH_3 \\   \\ OH - CH_2 - CH - CH_2 - CH_3 \end{array}$  |
| 20 | 3-метилгексан<br>(изогептан)                | $C_7 H_{16}$  | $\begin{array}{c} CH_3 \\   \\ CH_3 - CH_2 - CH - CH_2 - CH_2 - CH_3 \end{array}$   |
| 21 | 2-метилгептан<br>(изооктан)                 | $C_8 H_{18}$  | $\begin{array}{c} CH_3 \\   \\ CH_3 - CH - CH_2 - CH_2 - CH_2 - CH_2 - CH_3 \end{array}$  |
| 22 | 4-метилоктан                                | $C_9 H_{20}$  | $\begin{array}{c} CH_3 \\   \\ CH_2 - CH_2 - CH - CH_2 - CH_2 - CH_2 \\   \qquad \qquad \qquad   \\ CH_3 \qquad \qquad \qquad CH_3 \end{array}$ |
| 23 | 3-метилпентан<br>(2-этилбутан)              | $C_6 H_{14}$  | $\begin{array}{c} CH_3 \\   \\ CH_3 - CH_2 - CH - CH_2 - CH_3 \end{array}$  |
| 24 | 4-метил-2-пентанол<br>(метиламиловый спирт) | $C_6 H_{14}O$ | $\begin{array}{c} OH \qquad \qquad CH_3 \\   \qquad \qquad   \\ CH_3 - CH - CH_2 - CH - CH_3 \end{array}$                                       |
| 25 | 3-метил-4-этилгексан                        | $C_9 H_{20}$  | $\begin{array}{c} CH_3 \\   \\ CH_3 - CH_2 - CH - CH - CH_2 - CH_3 \\ \qquad \qquad \qquad   \\ \qquad \qquad \qquad CH_2 - CH_3 \end{array}$   |
| 26 | 2-метил-3-этилпентан                        | $C_8 H_{18}$  | $\begin{array}{c} CH_3 \\   \\ CH_3 - CH - CH - CH_2 - CH_3 \\ \qquad \qquad   \\ \qquad \qquad CH_2 - CH_3 \end{array}$                        |

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

| $\ell_{\text{ср}}$ | $T_{\text{св}}, \text{ К}$ | $\ell_{\text{ср}}$ | $T_{\text{св}}, \text{ К}$ | $\ell_{\text{ср}}$ | $T_{\text{св}}, \text{ К}$ | $\ell_{\text{ср}}$ | $T_{\text{св}}, \text{ К}$ |
|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|
| 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 X

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

| $\ell_{\text{ср}}$ | $T_{\text{св}}, \text{ К}$ | $\ell_{\text{ср}}$ | $T_{\text{св}}, \text{ К}$ | $\ell_{\text{ср}}$ | $T_{\text{св}}, \text{ К}$ | $\ell_{\text{ср}}$ | $T_{\text{св}}, \text{ К}$ |
|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|
| 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                        |

**Температура самовоспламенения некоторых ароматических углеводородов  
в зависимости от средней длины углеродной цепи**

| $\ell_{\text{ср}}$ | $T_{\text{с}}, \text{К}$ | $\ell_{\text{ср}}$ | $T_{\text{с}}, \text{К}$ | $\ell_{\text{ср}}$ | $T_{\text{с}}, \text{К}$ |
|--------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|
| -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 XII

## Показатели пожарной опасности некоторых газов

| Название вещества           | $T_{св}, K$ | КПР, об. % | $U_{л}, м/с$ | МВСК при разбавлении $CO_2$ | $E_{мин}, мДж$ | Огнегущающая концентрация, об. % |       | $T_r, K$ | Стехиометрическая концентрация горючего | $Q_{л}, кДж/моль$ |
|-----------------------------|-------------|------------|--------------|-----------------------------|----------------|----------------------------------|-------|----------|---|-------------------|
|                             |             |            |              |                             |                | $CO_2$                           | $N_2$ |          |   |                   |
| Аммиак                      | 923         | 15–28      | 0,23         | 16,2                        | 680            | –                                | –     | 1777     | 21,9                                    | 317,2             |
| Ацетилен                    | 608         | 2–81       | 1,35         | 9                           | –              | 57                               | 70    | 2307     | 7,7                                     | 1260              |
| Окись углерода              | 883         | 12,5–74,2  | 0,42         | 9,8                         | –              | 53                               | 69    | 2000     | 28,5                                    | 283,9             |
| Водород                     | 783         | 4–74,2     | 2,67         | 7,9                         | 0,017          | 62                               | 76    | 2072     | 29,5                                    | 242,2             |
| Метан                       | 810         | 5–15       | 0,37         | 15,6                        | 0,26           | 26                               | 39    | 1927     | 9,5                                     | 806               |
| Этан                        | 745         | 3,22–12,45 | 0,40         | 13,8                        | 0,24           | 34                               | 46    | 1922     | 5,64                                    | 1431              |
| Пропан                      | 739         | 2,37–9,5   | 0,38         | 14,3                        | 0,25           | 32                               | 45    | 1987     | 4,02                                    | 2049              |
| Бутан                       | 678         | 1,86–8,41  | 0,37         | 14,9                        | 0,25           | 29                               | 41    | 2010     | 3,12                                    | 2665              |
| Этилен                      | 813         | 3,75–29,6  | 0,63         | 12,1                        | 0,12           | 42                               | 52    | 2067     | 6,5                                     | 1326              |
| Сероводород                 | 519         | 4,3–45,5   | –            | 8                           | –              | 62                               | –     | –        | 12,24                                   | –                 |
| Коксовый газ                | 913         | 5,6–30,8   | –            | –                           | –              | –                                | –     | –        | –                                       | –                 |
| Природный газ (Саратовский) | 823–1023    | 5,1–12,1   | –            | –                           | –              | –                                | –     | –        | –                                       | –                 |
| Доменный газ                | –           | 6,5–73,9   | –            | –                           | –              | –                                | –     | –        | –                                       | –                 |

*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 %.

Показатели пожарной опасности некоторых горючих жидкостей

| Название 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 $\text{CO}_2$ ) |
|------------------------|-----------------------|--------------------------|---------|--------------------|------------|-------------------|---------------------------------|------------------------------|--|---------------------------|
| 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                | 1,24–7,5   | 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          | 393                   | –                        | 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***                  | –                            | –                                      | –                         |
| Трансформаторное масло | –                     | –                        | 395–396 | 573                | –          | –                 | –                               | –                            | –                                      | –                         |
| Вазелиновое масло      | 420                   | –                        | 397–463 | 563                | –          | –                 | –                               | –                            | –                                      | –                         |
| Масло подсолнечное     | 502                   | –                        | 477–502 | 643                | –          | –                 | –                               | –                            | –                                      | –                         |
| Нефть (Туймазинская)   | 252                   | –                        | 252–298 | 593                | –          | –                 | –                               | –                            | –                                      | –                         |
| Скипидар               | 307                   | –                        | 305–326 | 573                | 0,8        | –                 | –                               | –                            | –                                      | –                         |

Примечание: \* – в закрытом тигле; \*\* – в открытом тигле; \*\*\* – в кДж/кг.

