

Московский Институт Энергобезопасности и Энергосбережения  
кафедра «Энергетики и энергосбережения»

## Курс «ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА»

---

### Лекция «ОРГАНИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО»

Денисов-Винский Никита Дмитриевич  
E-mail: [denisov.vinskiy@yandex.ru](mailto:denisov.vinskiy@yandex.ru)

НОУ ВПО «МИЭЭ»

Москва 2010 год

Н.Д. Денисов-Винский®  
E-mail: [denisov.vinskiy@yandex.ru](mailto:denisov.vinskiy@yandex.ru)  
Курс «Общая энергетика», НОУ ВПО МИЭЭ, 2010 год

## [ 1. ТОПЛИВО ]

### [ 1.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ ]

Тепловую энергию получают за счёт сжигания топлива, то есть за счёт внутренней химической энергии горючих веществ.

Топливом называется горючее вещество, сжигаемое для получения тепла и используемое в качестве источника энергии.

Топливо в зависимости от способа получения подразделяется на естественное и искусственное. К естественному относятся ископаемые угли, дрова, торф, сырая нефть, природные газы и др. Искусственное топливо получают в результате процесса переработки углей (каменноугольный кокс, брикеты, древесный уголь и пр.), сырой нефти (мазут, солярка, бензин, керосин и пр.) природных газов, горючих сланцев и др.

В зависимости от физического состояния топливо бывает твёрдым, жидким и газообразным.

Топливо состоит из горючих веществ: углерода, водорода, их соединений (углеводородов) и соединений с другими химическими элементами, а также негорючих (балластных): влаги, золы.

Влага затрудняет воспламенение топлива, потребляя значительное количество тепла на своё испарение. Большая часть тепла, затрачиваемая на испарение влаги, выбрасывается в атмосферу с дымовыми газами. Часть водяных паров конденсируется на поверхности нагрева котельного агрегата и вызывает их коррозию.

Зола загрязняет поверхности нагрева котла и затрудняет передачу тепла элементами котла, а также увеличивается эксплуатационные расходы на удаление шлаков и зола из котельной.

Качество топлива определяется его теплотворной способностью, теплоценностью или теплотой сгорания.

Теплотворной способностью топлива называется количество тепла, выделяемого при полном сжигании 1 кг твёрдого или жидкого топлива, а также 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива.

Если теплотворная способность определена без учёта конденсации всех водяных паров, образовавшихся при сгорании, её называют низшей теплотворной способностью и обозначают через

$$Q_n^p$$

Индекс  $p$  говорит о том, что теплотворная способность определена на рабочую массу топлива. Все ископаемые топлива – как угли, так и нефть, сланцы и природный газ – являются остатками растений или животных организмов. Чем древнее твёрдое топливо, тем, как правило, меньше в нём характерных для растений смолистых веществ и тем больше углерода. Продукты распада растений и низших животных организмов образуют в твёрдом топливе его горючую массу, состав которой, несколько разнящийся для отдельных его месторождений, определяется, в основном, содержанием в нём летучих веществ.

## [ 2. СОСТАВ ТОПЛИВА ]

Особенностью твёрдых и жидких топлив является сложность химического состава их органического вещества, что предопределило оценку их состава по процентному содержанию в нём химических элементов.

Газообразное топливо, представляющее собой механическую смесь достаточно простых углеводородов и других известных соединений, оценивается по доле этих соединений в топливе. В общем случае состав органического топлива можно разделить на горючую и негорючую части.

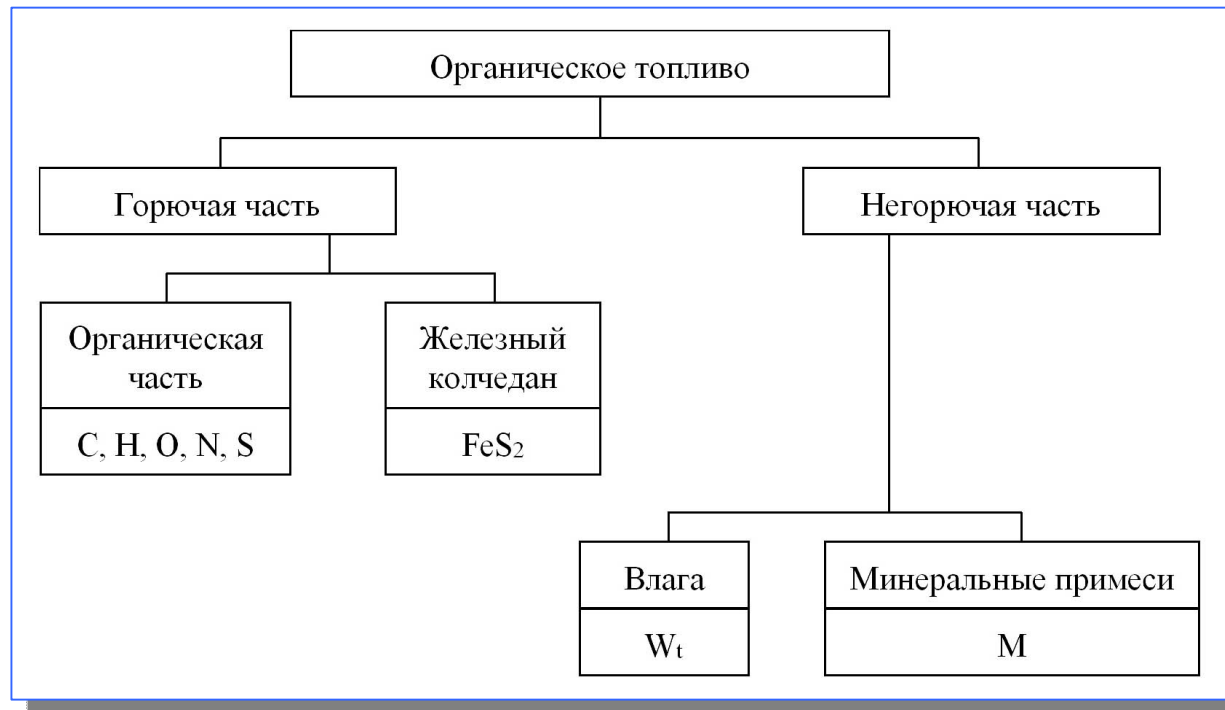


Рис. 1. Схема составляющих органического топлива

Горючая часть топлива (твёрдого и жидкого) представляет собой в основном органическое соединение, образованные пятью химическими элементами, а именно:

углерод ( C )  
водород ( H )  
сера ( S )  
кислород ( O )  
азот ( N )

При этом кислород и азот не участвуют в экзотермических реакциях и поэтому являются как бы «внутренним балластом» топлива. Горючая часть топлива также включает некоторые минеральные соединения (например **бисульфит железа  $FeS_2$** ), которые взаимодействуют с кислородом воздуха при высокой температуре также со значительным тепловыделением.

Присутствие серы в топливе в значительной степени определяет его склонность к образованию вредных выбросов при сжигании и коррозионную активность продуктов сгорания.

Сера заключается как в горючей части, так и в минеральной части топлива. Поэтому общее содержание серы в топливе  $S$  представляет собой сумму трёх слагаемых:

серы в органическом веществе топлива (органическая сера  $S_0$ ),  
серы в сульфитах топлива (пиритная и сульфитная сера  $S_s$ ) и  
серы в негорючей части топлива (сульфатная сера  $S_{SO_4}$ )

$$S = S_0 + S_s + S_{SO_4} \quad (1)$$

Негорючая часть топлива (см. рис.1) состоит из влаги  $W_t$  и минеральной части  $M$ , образующей при сгорании золу. Состав твёрдого и жидкого топлива обычно выражают в % по массе. При этом могут быть приняты:

рабочая масса – состояние топлива с содержанием влаги и золы, с которыми оно добывается и отгружается потребителю:

$$C^r + H^r + O^r + N^r + S_c^r + A^r + W^r = 100\% \quad (2)$$

аналитическая масса – топливо, подготовленное к проведению его анализа, измельченное и приведённое в равновесие с условиями лабораторного помещения:

$$C^a + H^a + O^a + N^a + S_c^a + A^a + W^a = 100\% \quad (3)$$

сухая масса – состояние топлива без содержания общей влаги (кроме гидратной):

$$C^d + H^d + O^d + N^d + S_c^d + A^d = 100\% \quad (4)$$

сухая беззольная (горючая) масса – условное состояние топлива, не содержащего общей влаги и золы:

$$C^{daf} + H^{daf} + O^{daf} + N^{daf} + S_c^{daf} = 100\% \quad (5)$$

органическая масса – горючая масса топлива без колчеданной и сульфатной серы:

$$C^o + H^o + O^o + N^o + S_c^o = 100\% \quad (6)$$

Пересчеты содержания компонентов, выраженные в процентах одного состояния, в проценты другого его состояния производятся на основе уравнения его состава для каждого состояния.

Для получения, например, коэффициента пересчета состава топлива с аналитической масса на рабочую составим отношение

$$\frac{C^r + H^r + O^r + N^r + S_c^r + A^r}{C^a + H^a + O^a + N^a + S_c^a + A^a} = \frac{100 - W^r}{100 - A^r} \quad (7)$$

### [ 3. ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА ]

Горение топлива – процесс химического соединения его горючих элементов с кислородом воздуха, сопровождающийся резким повышением температуры и выделением значительного количества тепла.

В результате процесса горения топлива образуются газообразные продукты (дымовые газы) и очаговые остатки в виде золы.

Для обеспечения устойчивого горения топлива кроме подачи достаточного количества воздуха требуется предварительный его нагрев до определённой температуры, называемой **температурой воспламенения**.

Процесс горения топлива можно условно разбить на несколько стадий.  
При горении твердого топлива можно выделить три стадии:

**воспламенение (зажигание)** – в начале топливо подогревается, потом подсушивается, теряет влагу, потом начинает разлагаться на летучие вещества и твёрдый остаток – кокс;

**активное горение** – характеризуется высокой температурой, наибольшим потреблением воздуха и максимальным выделением тепла;

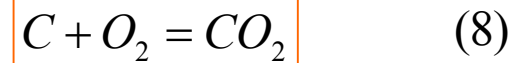
**догорание** – догорают несгоревшие частицы топлива, при этом уменьшается тепловыделение и снижается потребность в воздухе.



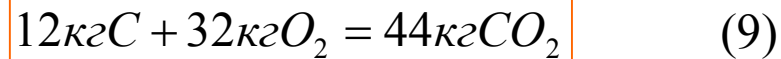
### [ 3.1. Горение углерода ]

Основной горючей частью топлива является углерод. В зависимости от условий сжигания топлива в процессе соединения углерода с кислородом образуется **углекислый газ  $CO_2$**  (при полном сгорании) или **окись углерода  $CO$**  (при неполном сгорании). В последнем случае процесс горения (окисления) углерода является незаконченным (неполным), так как окись углерода может дополнительно сгореть и в результате образуется углекислый газ.

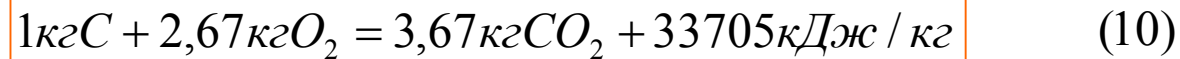
При полном сгорании углерода химическая реакция протекает в соответствии с уравнением:



т.е.

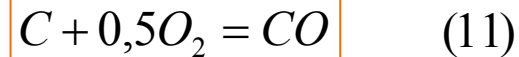


при пересчёте на 1 кг углерода С:

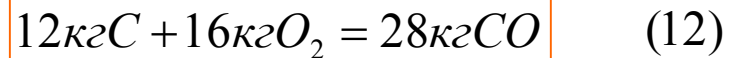


Из этого равенства следует, что для сжигания 1 кг углерода требуется 2,67 кг кислорода, при этом выделяется 3,67 кг углекислого газа и 33705 кДж/кг тепла.

При неполном сгорании углерода реакция его окисления выражается уравнением:



т.е.



при пересчёте на 1 кг углерода:

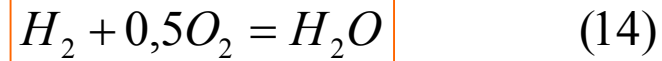


Как видно, при неполном сгорании 1 кг углерода потребляется 1,33 кг кислорода и образуется 2,33 кг окиси углерода, а выделяется только 9520 кДж/кг тепла, т.к. примерно в 3,4 раза меньше, чем при полном его сгорании. Поэтому очень важно при сжигании топлива не допускать образования окиси углерода, так как наличие её в продуктах сгорания приводит к потере тепла, так называемой **потере тепла от химической неполноты сгорания**.

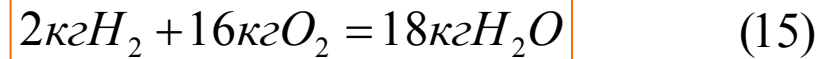
### [ 3.2. Горение водорода ]

Водород – один из цепных горючих элементов топлива. При его горении выделяется значительно больше тепла, чем при горении углерода.

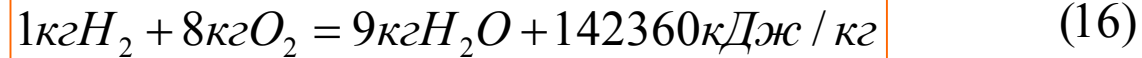
Процесс горения водорода протекает по уравнению:



т.е.



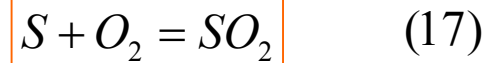
при расчете на 1 кг водорода:



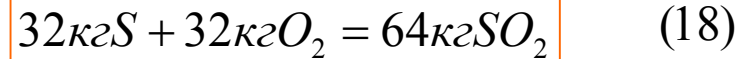
Таким образом, для окисления 1 кг водорода требуется 8 кг кислорода, при этом получается 9 кг воды и выделяется приблизительно 142 360 кДж/кг тепла.

### [ 3.3. Горение серы ]

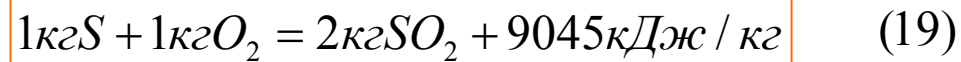
При сгорании серы образуется сернистый газ  $SO_2$ , а химическая реакция протекает по уравнению:



т.е.



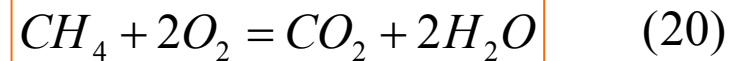
при пересчете на единицу массы



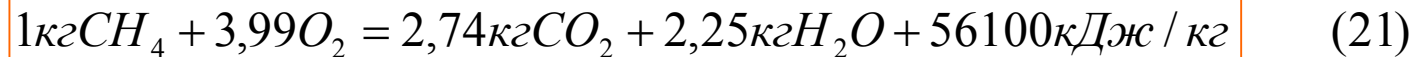
Таким образом, для сжигания 1 кг серы требуется 1 кг кислорода, в результате образуется 2 кг сернистого газа и выделяется примерно 9045 кДж/кг теплоты.

### [ 3.4. Горение метана ]

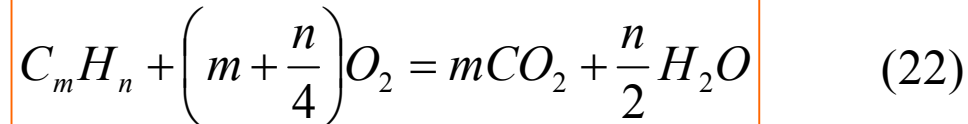
Метан – основное горючее вещество природных газов. Уравнение горения метана в конечной стадии можно представить в виде:



или



В общем виде для любого углеводорода:



Приведённые уравнения реакций горения по существу выражают конечные результаты сгорания горючих элементов, входящих в состав топлива, и не отражают полностью механизма горения. В действительности процессы горения протекают значительно сложнее и сопровождаются рядом промежуточных химических превращений.

### [ 3.5. Теоретический расход кислорода для твёрдого топлива ]

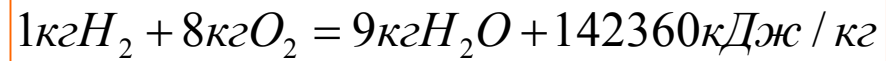
Определим теоретический объём кислорода м<sup>3</sup>/кг необходимо для полного сгорания 1 кг твёрдого или жидкого топлива конкретного состава.

Запишем известные нам уравнения для горения различных химических элементов топлива:

для углерода:



для водорода:



для серы:



Тогда необходимое количество кислорода, будет записано в следующем виде:

$$V_{O_2}^0 = 2,67 \cdot \frac{C^p}{100} + 8 \cdot \frac{H^p}{100} + 1 \cdot \frac{S^p}{100} \quad \left[ \frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right]$$

Примем во внимание, что в любом топливе содержится кислород, тогда выражение (99) примет следующий вид:

$$V_{O_2}^0 = 2,67 \cdot \frac{C^p}{100} + 8 \cdot \frac{H^p}{100} + 1 \cdot \frac{S^p}{100} - \frac{O^p}{100} \quad \left[ \frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right]$$

Если принять во внимание плотность кислорода при нормальных условиях, то получим:

$$V_{O_2}^0 = 1,866 \cdot \frac{C^p}{100} + 5,56 \cdot \frac{H^p}{100} + 0,7 \cdot \frac{S^p}{100} - \frac{O^p}{100 \cdot \rho_{O_2}} \quad \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right]$$

Где плотность кислорода при нормальных условиях:

$$\rho_{O_2} = 1,428 \quad \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]$$

Тогда формулу (99) можно записать в таком виде:

$$V_{O_2}^0 = 1,866 \cdot \frac{C^p}{100} + 5,56 \cdot \frac{H^p}{100} + 0,7 \cdot \frac{S^p}{100} - 0,7 \cdot \frac{O^p}{100} \quad \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right]$$

В качестве окислителя при сжигании топлива в котельных агрегатах используется атмосферный воздух, который представляет собой смесь газообразных веществ. В состав воздуха входит кислород – 21%, азот – 78%, углекислый газ, инертные газы и др. – 1%. Для технических расчетов обычно принимают условный состав воздуха, содержащий два компонента (кислород 21% и азот 79%).

Если учесть, что в качестве окислителя используется не чистый кислород, а воздух, то его теоретический расход необходимый для полного сгорания твёрдого топлива равен:

$$V_B^0 = V_{O_2}^0 \cdot \frac{100}{21} = 4,76 \cdot V_{O_2}^0$$

$$\left[ \frac{M^3}{Kг} \right]$$

Таким образом, с (99), (99) и (99), получаем:

$$V_B^0 = 0,088 \cdot (C^p + 0,265 \cdot H^p + 0,375 \cdot S^p - 0,0333 \cdot O^p)$$

$$\left[ \frac{M^3}{Kг} \right]$$

Где  $S^p$   $H^p$   $O^p$   $C^p$  - доля рабочей массы топлива в %.

Рабочие массы топлива обычно приводятся в справочных данных, где также приводятся другие характеристики по топливу.

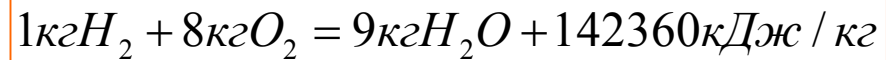


### [ 3.6. Теоретический расход кислорода для газообразного топлива ]

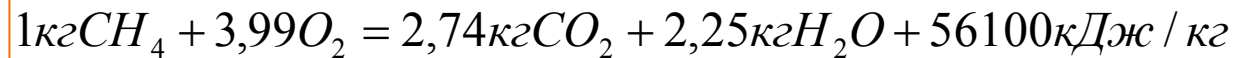
Определим теоретический объём кислорода  $\text{м}^3/\text{м}^3$ , необходимого для полного сгорания  $1 \text{ м}^3$  газообразного топлива.

Запишем известные нам уравнения для горения различных химических элементов топлива:

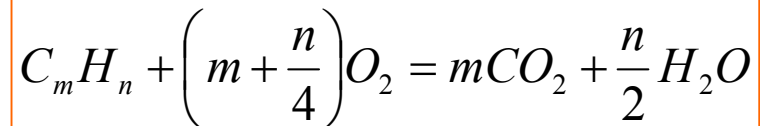
для водорода



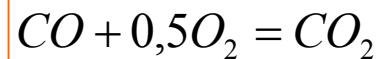
для метана



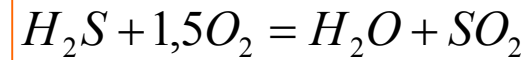
для углеводородов в общем виде



для монооксида углерода



для сероводорода



Тогда теоретическое количество кислорода, необходимое для полного сжигания топлива находится согласно следующей зависимости:

$$V_{O_2}^0 = 0,01 \cdot \left[ 0,5 \cdot CO + 1,5 \cdot H_2S + 0,5 \cdot H_2 + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right] \quad \left[ \frac{M^3}{M^3} \right]$$

Принимая во внимание долю кислорода в воздухе, получаем следующее соотношение:

$$V_B^0 = 0,0476 \cdot \left[ 0,5 \cdot CO + 1,5 \cdot H_2S + 0,5 \cdot H_2 + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right] \quad \left[ \frac{M^3}{M^3} \right]$$

В реальных условиях полностью сжечь топливо при теоретически необходимом количестве воздуха невозможно, так как топливо и воздух не удаётся идеально перемешать, и процесс горения оказывается незавершённым. Поэтому для полного сгорания приходится подавать воздуха больше.

Отношение действительного количества воздуха, подаваемого для организации процесса горения, к теоретическому необходимому количеству называют коэффициентом избытка воздуха:

$$\alpha = \frac{V_B^D}{V_B^0}$$

Значение коэффициента избытка воздуха зависит от вида сжигаемого топлива, конструкции горелочного и топочного устройства и обычно находится в пределах 1,05 ... 1,5. Эффективность сжигания топлива зависит от правильного выбора значения коэффициента избытка воздуха. Эта величина во многом определяет экономичность процесса горения.

## [ 4. ПРОДУКТЫ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА ]

В процессе горения топлива образуются газообразные продукты сгорания – **дымовые газы**, в состав которых при полном сгорании входят:

углекислый газ  $\text{CO}_2$   
сернистый газ  $\text{SO}_2$   
кислород  $\text{O}_2$   
азот  $\text{N}_2$   
водяные пары  $\text{H}_2\text{O}$

При неполном сгорании топлива, происходящем главным образом при недостатках воздуха и плохом перемешивании топлива с воздухом, в дымовых газах, кроме указанных составляющих, могут ещё горючие газы:

окись углерода  $\text{CO}$   
водород  $\text{H}_2$   
метан  $\text{CH}_4$

При нормальном процессе горения топлива в топке в продуктах сгорания содержится только сравнительно небольшие количества окиси углерода, а водород и метан отсутствуют.

В общем случае для всех видов топлива теоретический суммарный выход продуктов полного сгорания, м<sup>3</sup>/кг или м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, можно представить в следующем виде:

$$V_{n.z.} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0$$

Объём сухих трехатомных газов определяется согласно соотношению:

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2}$$

#### [ 4.1. Продукты сгорания для твёрдых топлив ]

Для твёрдых и жидких топлив теоретический объём азота в продуктах сгорания находится согласно следующей зависимости:

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot V_B^0 + \frac{N^p}{100} \cdot \frac{1}{\rho_{N_2}} \quad \frac{нм^3}{кг}$$

Где плотность азота равна:

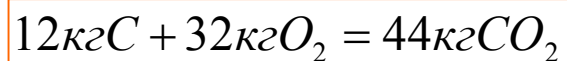
$$\rho_{N_2} = 1,25 \quad \frac{кг}{нм^3}$$

Тогда формула (99) примет следующий вид:

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot V_B^0 + 0,008 \cdot N^p$$

$$\left[ \frac{\text{нм}^3}{\text{кг}} \right]$$

Химическая реакция для углерода:



Согласно формуле (99) при полном сгорании 1 кг углерода получается  $44:12 = 3,66$  кг углекислого газа. Тогда объём углекислого газа будет находится согласно соотношению:

$$V_{CO_2} = 3,66 \cdot \frac{C^p}{100} \cdot \frac{1}{\rho_{CO_2}}$$

$$\left[ \frac{\text{нм}^3}{\text{кг}} \right]$$

С учётом плотности углекислого газа получим соотношение:

$$V_{CO_2} = 0,01 \cdot 1,866 \cdot C^p$$

$$\left[ \frac{\text{нм}^3}{\text{кг}} \right]$$

Химическая реакция для серы:



Аналогичные расчеты позволяют определить объём сернистого газа:

$$V_{SO_2} = 2 \cdot \frac{S^p}{100} \cdot \frac{1}{\rho_{SO_2}} \quad \left[ \frac{\text{нм}^3}{\text{кг}} \right]$$

С учётом плотности сернистого газа:

$$V_{SO_2} = 0,01 \cdot 0,7 \cdot S^p \quad \left[ \frac{\text{нм}^3}{\text{кг}} \right]$$

Тогда объём выхода трёхатомных газов будет равен:

$$V_{RO_2} = 0,01 \cdot 1,866 \cdot C^p + 0,01 \cdot 0,7 \cdot S^p \quad \left[ \frac{\text{нм}^3}{\text{кг}} \right]$$

Вы дымовых газах всегда содержатся водные пары. Они попадают в продукты сгорания следующими путями:

1) в результате окисления водорода топлива (при сгорании 1 кг водорода получается около 9 кг воды):

$$8,94 \cdot \frac{H^p}{100} \cdot \frac{1}{\rho_{H_2O}}$$

2) за счёт влаги топлива:

$$\frac{W^p}{100} \cdot \frac{1}{\rho_{H_2O}}$$

3) с атмосферным воздухом:

$$\frac{d \cdot V_B^0 \cdot \rho_B}{100} \cdot \frac{1}{\rho_{H_2O}}$$

где  $d$  – содержание влаги в топливе, г/кг (обычно в расчетах принимается  $d = 10$  г/кг).  
Плотность воздуха принимают:

$$\rho_B = 1,293$$

$$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

4) с паром, иногда используемым для распыления жидкого топлива через форсунки:

$$\frac{W_\phi}{\rho_{H_2O}}$$

где  $W_\phi$  – расход пара на распыление 1 кг мазута.



Принимая во внимание плотность водяного пара при атмосферном давлении

$$\rho_B = 0,804 \quad \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]$$

Получаем теоретический объём водяных паров в общем случае:

$$V_{H_2O}^0 = 0,111 \cdot H^p + 0,0124 \cdot W^p + 0,0161 \cdot V_B^0 + 1,24 \cdot W_\phi \quad \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right]$$

В таком случае суммарный теоретический объём продуктов сгорания равен:

$$V_{CT}^0 = V_{H_2O}^0 + V_{RO_2} + V_{N_2} \quad \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right]$$

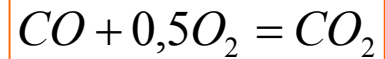
#### [ 4.2. Продукты сгорания для газообразных топлив для $\alpha = 1$ ]

Теоретический объём азота при полном сгорании топлива:

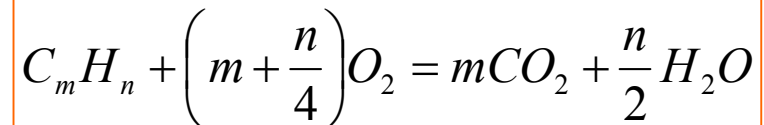
$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V_B^0 + 0,01 \cdot N_2 \quad \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3} \right]$$

Теоретический объём углекислого газа.

Реакция монооксида углерода:



Реакция для горения углеводородов:



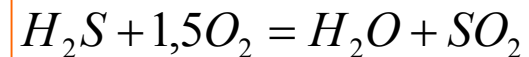
Тогда объём углекислого газа:

$$V_{CO_2}^0 = 0,01 \cdot CO_2 + 0,01 \cdot CO + 0,01 \cdot \sum m \cdot C_m H_n$$

$$\left[ \frac{M^3}{M^3} \right]$$

Теоретический объём диоксида серы:

Реакция для диоксида серы:



Объём диоксида серы:

$$V_{SO_2}^0 = 0,01 \cdot H_2S$$

$$\left[ \frac{M^3}{M^3} \right]$$

Н.Д. Денисов-Винский®

E-mail: denisov.vinskiy@yandex.ru

Курс «Общая энергетика», НОУ ВПО МИЭЭ, 2010 год

Теоретический объём водяных паров:

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 \cdot \left( H_2S + H_2 + \sum \frac{n}{2} \cdot C_m H_n + 0,124d \right) + 0,016 \cdot V_B^0 \quad \left[ \frac{M^3}{M^3} \right]$$

где  $d$  – влагосодержание топлива, отнесённое к 1 м<sup>3</sup> сухого газа, г/м<sup>3</sup>.

Тогда теоретические (минимальные) объёмы продуктов сгорания, полученные при полном сгорании газообразного топлива, с теоретически необходимым количеством воздуха определяются следующим соотношением:

$$V_{ПГ}^0 = V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 + \sum V_{CO_2}^0 \quad \left[ \frac{M^3}{M^3} \right]$$

### [ 4.3. Продукты сгорания для газообразных топлив для $\alpha > 1$ ]

Соотношения для трёхатомных газов остаются теми же самыми, так как количество воздуха на реакции не влияет:

Для углекислого газа:

$$V_{CO_2}^0 = 0,01 \cdot CO_2 + 0,01 \cdot CO + 0,01 \cdot \sum m \cdot C_m H_n \quad \left[ \frac{M^3}{M^3} \right]$$

Для диоксида серы:

$$V_{SO_2}^0 = 0,01 \cdot H_2S \quad \left[ \frac{M^3}{M^3} \right]$$

Для азота:

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V_B^0 + 0,01 \cdot N_2 + 0,79 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_B^0 \quad \left[ \frac{M^3}{M^3} \right]$$

Соотношение (99) можно записать так:

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot \alpha \cdot V_B^0 + 0,01 \cdot N_2 \quad \left[ \frac{M^3}{M^3} \right]$$

Для кислорода:

$$V_{O_2}^0 = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_B^0 \quad \left[ \frac{M^3}{M^3} \right]$$

Для паров воды:

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_B^0 \quad \left[ \frac{HM^3}{KZ} \right]$$

## [ 5. ТОКСИЧНОСТЬ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ]

Продукты сгорания оказывают определяющее влияние на энергетические и экономические показатели различных теплотехнических установок.

Однако помимо этих продуктов при сгорании образуется и ряд других веществ, которые вследствие их малого количества не учитываются в энергетических расчётах, но определяют экологические показатели топок, печей, тепловых двигателей и других устройств современной теплотехники.

В первую очередь к числу экологически вредных продуктов сгорания следует отнести так называемые **токсичные газы**.

Токсичными называют вещества, оказывающие негативные воздействия на организм человека и окружающую среду. Основными токсичными веществами являются **оксиды азота ( $\text{NO}_x$ )**, **оксид углерода (СО)**, **различные углеводороды (СН)**, **сажа** и **соединения, содержащие свинец и серу**.

### **Оксиды азота.**

Если температура превышает 1500 К, то азот и кислород воздуха вступают в химическое соединение по цепному механизму. При сгорании топлив образуется главным образом оксид азота  $\text{NO}$ , который затем в атмосфере окисляется до  $\text{NO}_2$ . Образование оксида азота увеличивается с ростом температур газов и концентрации кислорода и при данной температуре не зависит от углеводородного состава топлива.

Зависимость образования оксида азота от температуры создаёт определенные трудности с точки зрения увеличения термического КПД теплового двигателя.

Находящийся в атмосфере  $\text{NO}_2$  представляет собой газ красновато-бурого цвета, обладающий в больших концентрациях удушливым запахом.  $\text{NO}_2$  оказывает негативное воздействие на слизистые оболочки глаз и носа, а также на нервную систему человека.

#### Оксид углерода.

Оксид углерода образуется во время сгорания при недостатке кислорода. Основное влияние на образование  $\text{CO}$  оказывает состав смеси: чем она богаче, тем выше концентрация  $\text{CO}$ .

Оксид углерода – бесцветный и не имеющий запаха газ. При вдыхании вместе с воздухом он интенсивно соединяется с гемоглобином крови, что уменьшает её способность к снабжению организма кислородом.

#### Углеводороды (СН).

Углеводороды состоят из исходных или распавшихся молекул топлива, которые не принимали участие в сгорании. Углеводороды появляются в отработавших газах (ОГ) двигателей внутреннего сгорания вследствие гашения пламени вблизи относительно холодных стенок камеры сгорания, в «защемлённых» объёмах, находящихся в вытеснителях и в зазоре между поршнем и цилиндром над верхним компрессионным кольцом.

#### Сажа.

Сажа представляет собой твёрдый продукт, состоящий в основном из углерода. Кроме углерода в саже содержится 1 ... 3% (по массе) водорода. Сажа образуется при температуре выше 1500 К в результате объёмного процесса термического разложения (пиролиза) при сильном недостатке кислорода. Начало образования сажи имеет место при коэффициенте избытка воздуха меньше 0,3 ... 0,7 и зависит от температуры и давления газов, а также от топлива.

Наличие сажи в ОГ дизелей обуславливает чёрный дым на выпуске. Сажа представляет собой механический загрязнитель носоглотки и лёгких.

Содержание в ОГ продуктов неполного сгорания нежелательно не только из-за их токсичности, но и потому, что при неполном сгорании топлива выделяется часть теплоты, а это обуславливает ухудшение экономических показателей тепловых установок.

### Свинец и сера.

Примерно 50 ... 70% свинца, находящегося в бензине попадает вместе с ОГ в атмосферу в форме свинцовых солей, т.е. виде частиц диаметром меньше 1 мкм. Эти частицы проникают в организм человека вместе с воздухом и через кожу. Соединения свинца очень ядовиты и не выводятся из организма, накапливаясь в нём. Они негативно воздействуют на центральную нервную систему, вызывая нервные и психические расстройства.

Сера, содержащаяся в дизельном топливе, мазуте и каменном угле выбрасывается в атмосферу после сгорания этих топлив в форме диоксида серы  $SO_2$ , который очень вреден для растений и способствует возникновению «кислотный» дождей.