

Кандидат техн. наук ГОЛДАЕВ И. П.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИН, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ РАБОТУ ДВУХТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ ГАЗОВОГО АНАЛИЗА

При исследовании процесса сгорания топлива и выделения тепла в цилиндре двухтактного двигателя необходимо перестраивать снятые с двигателя экспериментальные индикаторные диаграммы в температурные и тепловые. При этом для определения ряда исходных параметров приходится производить расчет продувки цилиндра.

В настоящее время существует большое количество способов расчета продувки, причем большинство из них построено на основании теории истечения газов. Сложность процесса продувки вынудила авторов расчета продувки принять (из-за большого количества переменных) те или иные гипотезы продувки и сделать ряд допущений и упрощений, которые сказываются на точности результата просчета продувки.

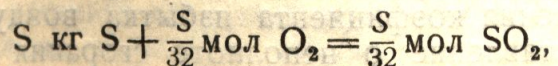
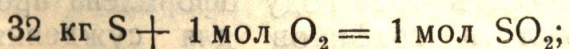
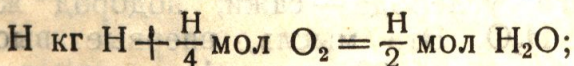
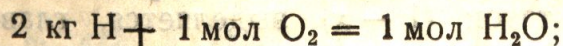
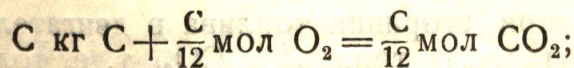
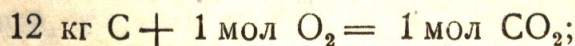
Печатаемая ниже работа рассматривает способ определения величин, характеризующих работу двухтактного двигателя методом газового анализа, который дает возможность определения ряда величин экспериментальным способом без расчета продувки цилиндра.

1. Общие сведения по сгоранию жидкого топлива

Реакции сгорания

Процесс сгорания топлива заключается в том, что элементы топлива соединяются с кислородом воздуха. Количество кислорода, необходимое для окисления элементов топлива, определяется при анализе реакции сгорания этих элементов.

Учитывая молекулярные веса ($C-12$, O_2-32 , H_2-2 , N_2-28 и $S-32$), можем представить уравнения реакции сгорания (если вести счет в молях) в следующем виде:



2. Теоретически необходимое количество воздуха при сгорании 1 кг топлива

Пользуясь уравнениями сгорания, можем определить теоретически необходимое количество воздуха при сгорании 1 кг топлива, которое будет:

$$L'_0 = \frac{1}{0,21} \left(\frac{C}{12} + \frac{S}{32} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right) \text{ мол/кг топлива}$$

или $L_0 = L'_0 V_m \text{ м}^3/\text{кг топлива}$,

где: C, S, H и O — весовые доли углерода, серы, водорода и кислорода в 1 кг топлива и

V_m — объем моля воздуха, который при температуре 15° С и давлении 735 мм ртутного столба равен 24,4.

3. Определение состава продуктов сгорания

За время продувки двигателя из общего количества поданного компрессором воздуха $L_k \frac{\text{м}^3(15^\circ \text{C}, 1 \text{ ат})}{\text{час}}$ только часть L_a остается в цилиндре, часть же L_b уходит в атмосферу через выхлопные клапаны или щели в виде потери при продувке.

Из оставшегося в цилиндре количества воздуха L_a на каждый килограмм израсходованного топлива приходится:

$$L' = \frac{L_a \text{ м}^3(15^\circ \text{C}, 1 \text{ атм})}{B \text{ кг топлива}}$$

или

$$L_m = \frac{L_a}{B V_m} \frac{\text{мол}}{\text{кг топлива}},$$

где:

B кг/час — расход топлива.

Вводя понятие коэффициента потери продувочного воздуха:

$$\delta = \frac{L_a}{L_k},$$

получим окончательное выражение действительного количества воздуха, приходящегося на 1 кг сгоревшего топлива:

$$L_m = \frac{\delta L_k}{B \cdot V_m} \frac{\text{мол}}{\text{кг топлива}}. \quad (1)$$

Известно, что при сгорании топлива в двигателе не происходит полного сгорания углерода топлива в CO_2 , т. е. только доля x сгорает в CO_2 , а остаток $(1 - x)$ выделяется, главным образом, в форме несгоревшего углерода — сажи; водород же топлива полностью сгорает в H_2O . Эта мысль, впервые высказанная проф. Н. Р. Брилингом, была в 1923 году оформлена проф. Е. К. Мазингом в виде формул и графиков для суждения о характере сгорания и определения коэффициента избытка воздуха. В настоящее время такое представление о неполноте сгорания углерода в CO_2 имеет отражение в работах Ф. Намера, Акермана и В. Венцеля.

В. Венцель впрыскивал топливо в бомбу, наполненную сжатым горячим воздухом. При анализе продуктов сгорания он ни разу не

обнаружил присутствия ни CO, ни H₂ при коэффициенте избытка воздуха $\alpha \geq 1,1$. При $\alpha < 1,1$ можно было определить очень малые количества CO и H₂. На основании этого Венцель считает, что эти газы образуются только в конце сгорания, вследствие восстановления CO₂ и H₂O. Как известно, двухтактные двигатели работают с коэффициентом избытка воздуха порядка 1,5 — 2,5. Кроме этого, для раскисления имеется гораздо меньше времени, чем в бомбе, так как в двигателе охлаждение газов происходит несравненно быстрее. Поэтому каких-либо значительных образований CO практически не будет.

Принимая, что жидкое топливо содержит углерод, водород, кислород, серу и азот, получим состав продуктов сгорания, состоящий из CO₂, O₂, SO₂ и N₂. При анализе газов прибором Орса содержание CO₂ и SO₂ порознь определить невозможно, так как оба эти газа поглощаются в сосуде с едким кали. Большая растворимость SO₂ в воде, при малом содержании его в продуктах сгорания, дает возможность допустить, что прибор Орса показывает только содержание CO₂. Учитывая, что количество азота в топливе незначительно, им можно также пренебречь. В таком случае, на основании уравнений реакция сгорания, полное количество продуктов сгорания, полученных при сгорании одного килограмма топлива, будет:

$$M' = M_{CO_2} + M_C + M_{H_2O} + M_{N_2} + M_{O_2} + M_{SO_2} = \frac{xC}{12} + \frac{(1-x)C}{12} + \frac{H}{2} + 0,79 L_m + (0,21 L_m - \frac{xC}{12} - \frac{H}{4} + \frac{O}{32} - \frac{S}{32}) + \frac{S}{32} = L_m + \frac{(1-x)C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{O}{32} \frac{\text{мол}}{\text{кг топлива}},$$

где:

$M_{CO_2} \frac{\text{мол}}{\text{кг топл.}}$ — количество CO₂;

$M_C \frac{\text{мол}}{\text{кг топл.}}$ — количество углерода, которое выделялось из топлива от неполноты сгорания в виде сажи;

$M_{H_2O} \frac{\text{мол}}{\text{кг топл.}}$ — количество паров воды;

$M_{O_2} \frac{\text{мол}}{\text{кг топл.}}$ — количество оставшегося кислорода;

$M_{N_2} \frac{\text{мол}}{\text{кг топл.}}$ — количество азота;

$M_{SO_2} \frac{\text{мол}}{\text{кг топл.}}$ — количество SO₂.

Полное количество сухих продуктов сгорания без учета сажи будет:

$$M'_c = L_m + \frac{O}{32} - \frac{H}{4} \frac{\text{мол}}{\text{кг топл.}}$$

Полное количество продуктов сгорания, при сгорании одного килограмма топлива, с учетом остаточных газов M_r, выражается уравнением:

$$M = M' + M_r = L_m + \frac{(1-x)C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{O}{32} + M_r \frac{\text{мол}}{\text{кг топл.}}$$

и соответственно полное количество сухих продуктов сгорания будет:

$$M_c = M'_c + M'_r = L_m + \frac{O}{32} - \frac{H}{4} + M'_r \frac{\text{мол}}{\text{кг топл.}}$$

К концу хода расширения содержание продуктов сгорания, отнесенное к 1 кг топлива, выразится такими соотношениями:

а) углекислота —

$$x \frac{C}{12} + CO_2 \frac{\text{мол}}{\text{кг топл.}},$$

где:

$\text{CO}_2' \frac{\text{мол}}{\text{кг топл.}}$ — содержание CO_2 в остаточных газах и

б) свободный кислород —

$$0,21 L_m + \frac{O}{32} - x \frac{C}{12} - \frac{H}{4} - \frac{S}{32} + O_2' \frac{\text{мол}}{\text{кг топл.}},$$

где:

$O_2' \frac{\text{мол}}{\text{кг топл.}}$ — свободный кислород в остаточных газах.

Если обозначить через CO_{2v} и O_{2v} объемные доли углекислоты и кислорода в сухих продуктах сгорания в конце хода расширения и соответственно CO'_{2v} и O'_{2v} для хода сжатия, то можем получить следующие уравнения:

$$\text{CO}_{2v} = \frac{x \frac{C}{12} + \text{CO}'_2}{L_m + \frac{O}{32} - \frac{H}{4} + M'_r}; \quad (2)$$

$$O_{2v} = \frac{0,21 L_m + \frac{O}{32} - x \frac{C}{12} - \frac{H}{4} - \frac{S'}{32} + O'_2}{L_m + \frac{O}{32} - \frac{H}{4} + M'_r}; \quad (3)$$

$$\text{CO}'_{2v} = \frac{\text{CO}'_2}{L_m + M'_r}; \quad (4)$$

$$O'_{2v} = \frac{0,21 L_m + O'_2}{L_m + M'_r}. \quad (5)$$

Решая эти уравнения, получим;

$$L_m + M'_r = \frac{x \frac{C}{12} O_{2v} + \text{CO}_{2v} \left[0,21 L'_0 - \frac{C}{12} (1-x) \right]}{\text{CO}_{2v} O'_{2v} - \text{CO}'_{2v} O_{2v}} \frac{\text{мол}}{\text{кг топлива}}. \quad (6)$$

Учитывая количество паров воды в остаточных газах, получим заряд цилиндра во время хода сжатия, отнесенный к 1 кг топлива

$$L_m + M_r = \frac{x \frac{C}{12} O_{2v} + \text{CO}_{2v} \left[0,21 L'_0 - \frac{C}{12} (1-x) \right]}{\text{CO}_{2v} O'_{2v} - \text{CO}'_{2v} O_{2v}} + \text{H}_2\text{O}' \frac{\text{мол}}{\text{кг топлива}}. \quad (7)$$

Для решения этого уравнения необходимо знать объемные доли CO_{2v} , O_{2v} , CO'_{2v} , O'_{2v} , количество паров воды в остаточных газах $\text{H}_2\text{O}'$ и долю углерода топлива x , сгоревшего в CO_2 .

Объемные доли определяются газовым анализом. Количество паров воды в составе остаточных газов практически определить невозможно, поэтому с достаточной степенью точности можно принять

$$\text{H}_2\text{O}' = \gamma \frac{H}{2},$$

где γ — коэффициент остаточных газов.

Долю углерода топлива x , сгоревшего в CO_2 , можно определить, пользуясь уравнением Лебедева для определения несгоревшей доли углерода

$$\varphi = 1 - \frac{\beta \text{CO}_{2v}}{0,21 - (\text{CO}_{2v} - O_{2v})} = 1 - x,$$

откуда

$$x = \frac{\beta \text{CO}_{2v}}{0,21 - (\text{CO}_{2v} - \text{O}_{2v})}, \quad (8)$$

где

$$\beta = 2,37 \frac{\text{H} + 0,038\text{N} + 0,125(\text{S} - \text{O})}{\text{C}}.$$

Так как количество азота в топливе обычно не превышает 1%, то член $0,038\text{N}$ будет составлять только $0,00038$ и им вполне можно пренебречь.

Пренебрегая членом $0,038\text{N}$, получим

$$\beta = 2,37 \frac{\text{H} + 0,125(\text{S} - \text{O})}{\text{C}}.$$

4. Коэффициент избытка воздуха

В двигателях, работающих на тяжелом топливе, практически невозможно быстрое и совершенное перемешивание частичек топлива с воздухом. Поэтому, чтобы обеспечить полноту сгорания топлива, в двигатель вводят количество воздуха, значительно большее теоретически необходимого.

Отношение действительного количества воздуха L_m , приходящегося на 1 кг топлива, к теоретически необходимому L_0 , называется коэффициентом избытка воздуха

$$\alpha = \frac{L_m}{L_0}.$$

Коэффициент избытка воздуха можно определить, пользуясь уравнением Мазинга.

$$\alpha = \frac{0,21\beta\text{N}_2}{(0,79 + \beta)(\text{N}_2 - 79)}, \quad (9)$$

где:

$$\text{N}_2 = 100 - (\text{CO}_{2v} - \text{O}_{2v}) \text{ и}$$

β — химическая константа топлива, имеющая то же значение, что и при определении доли топлива x , сгоревшего в CO_2 .

5. Коэффициент остаточных газов

К концу процесса продувки внутри цилиндра двигателя находится смесь, состоящая из остаточных газов и чистого воздуха.

Отношение количества молей остаточных газов M_r к числу молей воздуха L_m , поступившего в цилиндр во время продувки, называется коэффициентом остаточных газов

$$\gamma = \frac{M_r}{L_m}.$$

Зная зависимость

$$\text{H}_2\text{O}' = \gamma \frac{\text{H}}{2} \text{ и } L_m = \alpha L_0,$$

можно определить коэффициент остаточных газов по уравнению (7).

$$\gamma = \frac{x \frac{\text{C}}{12} \text{O}_{2v} + \text{CO}_{2v} \left[0,21 L_0' - \frac{\text{C}}{12} (1 - x) \right]}{\left(\alpha L_0' - \frac{\text{H}}{2} \right) (\text{CO}_{2v} \text{O}'_{2v} - \text{CO}'_{2v} \text{O}_{2v})} - \frac{\alpha L_0'}{\alpha L_0' - \frac{\text{H}}{2}}. \quad (10)$$

6. Коэффициент молекулярного изменения

При расчете процесса сгорания необходимо принимать во внимание изменение объема в результате происшедшей реакции. Это

изменение объема учитывается коэффициентом молекулярного изменения.

Химическим коэффициентом молекулярного изменения μ_0 называется отношение числа молей продуктов сгорания к числу молей воздуха L_m без учета остаточных газов:

$$\mu_0 = \frac{M'}{L_m} = \frac{L_m + \frac{(1-x)C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{O}{32}}{L_m} = 1 + \frac{1}{\alpha L_0} \left[\frac{(1-x)C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{O}{32} \right]. \quad (11)$$

Действительным коэффициентом молекулярного изменения μ называется отношение числа молей газов после сгорания к числу молей газов до сгорания с учетом остаточных газов:

$$\mu = \frac{M' + M_r}{L_m + M_r}.$$

Это выражение может быть записано следующим образом:

$$\mu = \frac{\mu_0 + \gamma}{1 + \gamma}. \quad (12)$$

7. Коэффициент полезного действия продувки

Мощность, развиваемая двигателем, в первую очередь зависит от качества продувки цилиндра. Чем лучше будет очищен цилиндр от остаточных газов, тем больше будет мощность, снимаемая с двигателя. О качестве продувки мы можем судить по коэффициенту полезного действия продувки η_s .

Коэффициентом полезного действия продувки называется отношение количества молей воздуха, оставшегося после продувки в цилиндре, к числу молей содержимого цилиндра до сгорания.

$$\eta_s = \frac{L_m}{L_m + M_r} = \frac{1}{1 + \gamma}. \quad (13)$$

8. Коэффициент потери продувочного воздуха

Коэффициент потери продувочного воздуха определяем из уравнения (1)

$$L_m = \frac{\delta L_k}{BV_m},$$

откуда

$$\delta = \frac{\alpha L_0' BV_m}{L_k}. \quad (14)$$

9. Определение температур цикла

Температуру газов в цилиндре (от начала сжатия до начала выхлопа) можно определить, пользуясь характеристическим уравнением:

$$PV = GRT,$$

где P кг/м² и V м³ — текущие координаты из взятой нами индикаторной диаграммы;

R — газовая постоянная для всех молей газов является величиной постоянной и равной 848;

G — мол/цикл — заряд цилиндра.

При определении температур цикла необходимо учитывать молекулярное изменение газов, которое происходит в результате процесса горения; поэтому весь цикл необходимо разбить на три таких участка:

1. Сжатие газов до начала горения.
2. От начала до конца горения и
3. От конца горения до начала выхлопа.

Но так как не представляется возможным учесть молекулярное изменение газов по углу поворота кривошипа во время процесса горения, то принимаем два участка:

1. Весь ход сжатия без учета молекулярного изменения и
2. Ход расширения, где молекулярное изменение учитывается коэффициентом молекулярного изменения μ .

На основании предыдущего нам известно то, что к началу действительного сжатия (т. е. к концу продувки) заряд цилиндра, отнесенный к 1 кг топлива, составляет:

$$L_m + M_r \frac{\text{мол}}{\text{кг топлива}},$$

следовательно, на один цикл будет:

$$G_c = (L_m + M_r) \frac{B \text{ мол}}{60n \text{ цикл}},$$

где n — число оборотов двигателя в минуту.

Соответственно заряд цилиндра к концу расширения будет:

$$G_p = \left[L_m + \frac{(1-x)C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{O}{32} + M_r \right] \frac{B \text{ мол}}{60n \text{ цикл}}.$$

На основании вышеизложенного получаем следующие уравнения для определения температур цикла:

1. По ходу сжатия

$$\begin{aligned} T_{cx} &= \frac{P_{cx} V_{cx}}{848 (L_m + M_r) \frac{B}{60n}} = \frac{P_{cx} V_{cx}}{848 (1 + \gamma) \frac{L_m B}{60n}} = \frac{\eta_s}{848 L_m \frac{B}{60n}} P_{cx} V_{cx} = \\ &= \frac{\eta_s V_m}{848 \frac{\delta \cdot L_k}{60n}} P_{cx} \cdot V_{cx} = K_c \cdot P_{cx} \cdot V_{cx}, \end{aligned} \quad (15)$$

где величина

$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{848 (L_m + M_r) \frac{B}{60n}} = \frac{1}{848 (1 + \gamma) \frac{L_m B}{60n}} = \\ &= \frac{\eta_s}{848 L_m \frac{B}{60n}} = \frac{\eta_s \cdot V_m}{848 \cdot \frac{\delta L_k}{60n}} \end{aligned}$$

для хода сжатия является постоянной.

2. По ходу расширения

$$T_{px} = \frac{P_{px} V_{px}}{848 \left[L_m + \frac{(1-x)C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{O}{32} + M_r \right] \frac{B}{60n}} = K_p \cdot P_{px} \cdot V_{px}, \quad (16)$$

где величина

$$K_p = \frac{1}{848 \left[L_m + \frac{(1-x)C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{O}{32} + M_r \right] \frac{B}{60n}}$$

для хода расширения является постоянной.

Уравнение для подсчета температур по ходу расширения можно привести к следующему виду:

$$T_{px} = \frac{P_{px} \cdot V_{px}}{P_{cx} \cdot V_{cx}} \cdot \frac{T_{cx}}{L_m + \frac{(1-x)C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{O}{32} + M_r} = \frac{P_{px} \cdot V_{px} \cdot T_{cx}}{P_{cx} \cdot V_{cx} \cdot \mu} \quad (17)$$

или

$$T_{px} = \frac{P_{px}}{P_{cx}} \cdot \frac{T_{cx}}{\mu}, \quad (18)$$

где T_{cx} и P_{cx} — температура и давление по линии сжатия при данном угле поворота кривошипа и μ — коэффициент молекулярного изменения.

10. Определение к. п. д. продувки η_s , коэффициента потери продувочного воздуха δ и коэффициента остаточных газов в зависимости от индикаторного давления P_i

Для вывода формулы индикаторного давления пользуемся уравнениями, выражающими индикаторную мощность.

Индикаторная работа L_i одного цилиндра в минуту:

$$L_i = P_i \cdot F \cdot S \cdot n \text{ кгм},$$

где P_i кг/м² — индикаторное давление,

F м² — площадь поршня,

S м — ход поршня и

n — число оборотов в минуту.

Индикаторная мощность двигателя в лошадиных силах для числа цилиндров i будет:

$$N_i = \frac{P_i F S n i}{60 \cdot 75} = \frac{P_i F S n i}{4500}.$$

Так как $FS = V_h$ м³ — объем, описанный поршнем, то если взять индикаторное давление P_i в кг/см², получим:

$$N_i = \frac{P_i V_h \cdot n \cdot i}{0,45}. \quad (19)$$

Индикаторную мощность двигателя можно определить также, исходя из часового расхода топлива B (в килограммах) на весь двигатель.

Часовой расход топлива B связан с мощностью и размерами двигателя следующими уравнениями:

$$B = C_i N_i$$

и

$$B = \frac{\delta L_k}{\alpha L_0},$$

где $\delta L_k \frac{M^3 (15^\circ \text{C } 1 \text{ ат})}{\text{час}}$ — полезный часовой расход воздуха через двигатель;

L_0 м³/кг топлива — количество воздуха, теоретически необходимое при сгорании одного килограмма топлива;

C_i кг/л. с. час — индикаторный расход топлива на одну лошадиную силу в час.

Приравняв эти уравнения, получим:

$$N_i = \frac{\delta L_k}{\alpha L_0 C_i}. \quad (20)$$

Решая совместно уравнения (19) и (20), определим P_i :

$$P_i = \frac{0,45 \cdot \delta L_k}{\alpha L_0 C_i \cdot V_h n i} \text{ кг/см}^2. \quad (21)$$

Уравнение (21) для определения среднего индикаторного давления можно выразить в зависимости от коэффициента полезного действия продувки η_s и коэффициента остаточных газов γ .

Рассмотрим выражение к. п. д. продувки

$$\eta_s = \frac{L_m}{L_m + M_r} = \frac{1}{1 + \gamma}.$$

Известно, что $(L_m + M_r)$ количество газов в мол/1 кг топлива, находящихся в цилиндре в момент начала действительного сжатия:

Количество газов, остающихся в цилиндре после продувки в кг/1 кг топлива, будет:

$$(L_m + M_r) V_m \cdot \gamma_a \cdot \frac{T_a \cdot P_0}{T_0 \cdot P_a};$$

и в течение часа при расходе топлива B кг в час:

$$(L_m + M_r) V_m \cdot \gamma_a \frac{T_a \cdot P_0}{T_0 \cdot P_a} B, \quad (22)$$

где V_m — объем моля,

γ_a — удельный вес газов в цилиндре при давлении и температуре газов в конце продувки,

P_a и T_a — давление и температура газов в цилиндре в конце продувки.

С другой стороны, это количество газов помещается в часовом объеме i цилиндров

$$(V_h + V_c - V_0) n \cdot i \cdot 60.$$

Умножив это выражение на γ_a , мы можем его приравнять к выражению (22)

$$(V_h + V_c - V_0) n \cdot i \cdot 60 \cdot \gamma_a = (L_m + M_r) V_m \cdot \gamma_a \cdot B \frac{T_a \cdot P_0}{T_0 \cdot P_a},$$

откуда получим:

$$L_m + M_r = \frac{(V_h + V_c - V_0) n \cdot i \cdot 60}{V_m \cdot B} \cdot \frac{T_a \cdot P_0}{T_0 \cdot P_a},$$

где V_h м³ — объем, описываемый поршнем за $1/2$ оборота вала;

V_c м³ — объем камеры сжатия;

V_0 м³ — объем, описываемый поршнем от его нижнего мертвого положения до конца продувки.

Подставим значение $(L_m + M_r)$ в выражение к. п. д. продувки, получим:

$$\eta_s = \frac{L_m \cdot V_m \cdot B}{(V_h + V_c - V_0) 60 \cdot n \cdot i} \cdot \frac{T_a \cdot P_0}{T_0 \cdot P_a},$$

откуда

$$L_m = \frac{\eta_s}{V_m \cdot B} (V_h + V_c - V_0) 60 \cdot n \cdot i \frac{T_0 \cdot P_a}{T_a \cdot P_0}.$$

Зная, что

$$L_m = \frac{\delta L_k}{B \cdot V_m},$$

получим

$$\delta L_k = \eta_s (V_h + V_c - V_0) 60 \cdot n \cdot i \frac{T_0 \cdot P_a}{T_a \cdot P_0}.$$

Подставляя значение δL_k в уравнение (21) и проделав соответствующее преобразование, получим:

$$P_i = \frac{27 \cdot \eta_s}{\alpha L_0 C_i} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} - \frac{h}{2R} \right) \frac{T_0 \cdot P_a}{T_a \cdot P_0} \text{ кг/см}^2, \quad (23)$$

где ε — геометрическая степень сжатия,

h — высота продувочных окон в мм и

R — радиус кривошипа в мм.

Уравнение (23) дает зависимость среднего индикаторного давления от коэффициента полезного действия продувки η_s .

Если в уравнении (23) подставить значение

$$\eta_s = \frac{1}{1 + \gamma},$$

то получим зависимость среднего индикаторного давления от коэффициента остаточных газов γ :

$$P_i = \frac{27 \cdot \frac{T_0 \cdot P_a}{T_a \cdot P_0}}{\alpha L_0 C_i (1 + \gamma)} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} - \frac{h}{2R} \right) \text{ кг/см}^2. \quad (24)$$

Зная зависимость

$$C_i = \frac{632}{H_u \eta_i},$$

можем уравнения (21), (23) и (24) преобразовать так:

$$P_i = \frac{0,455 \cdot L_k H_u \cdot \eta_i}{632 \cdot V_h \cdot n \cdot i} \text{ кг/см}^2, \quad (25)$$

$$P_i = \frac{27 H_u \cdot \eta_i \eta_s \frac{T_0 \cdot P_a}{T_a \cdot P_0}}{632 \alpha L_0} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} - \frac{h}{2R} \right) \text{ кг/см}^2 \quad (26)$$

и

$$P_i = \frac{27 \cdot H_u \cdot \eta_i \frac{T_0 \cdot P_a}{T_a \cdot P_0}}{632 \cdot \alpha \cdot L_0 (1 + \gamma)} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} - \frac{h}{2R} \right) \text{ кг/см}^2. \quad (27)$$

Пользуясь уравнениями (21), (23), (24), (25), (26) и (27), можем в зависимости от P_i , определенного по индикаторной диаграмме, определить:

1. Коэффициент полезного действия продувки

$$\eta_s = \frac{P_i \cdot \alpha \cdot L_0 \cdot C_i}{27 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} - \frac{h}{2R} \right)} \cdot \frac{T_a \cdot P_0}{T_0 \cdot P_a} \quad (28)$$

или

$$\eta_s = \frac{632 \alpha L_0}{27 \cdot H_u \cdot \eta_i \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} - \frac{h}{2R} \right)} \cdot \frac{T_a \cdot P_0}{T_0 \cdot P_a}. \quad (29)$$

2. Коэффициент потери продувочного воздуха

$$\delta = \frac{P_i \cdot \alpha L_0 \cdot C_i \cdot V_h \cdot n \cdot i}{0,45 L_k} \quad (30)$$

или

$$\delta = \frac{632 \cdot P_i \cdot V_h \cdot n \cdot i}{0,45 \cdot L_k \cdot H_u \cdot \eta_i}. \quad (31)$$

3. Коэффициент остаточных газов

$$\gamma = \frac{27 \cdot \frac{T_0 \cdot P_a}{T_a \cdot P_0}}{P_i \cdot \alpha \cdot L_0 \cdot C_i} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} - \frac{h}{2R} \right) - 1 \quad (32)$$

или

$$\gamma = \frac{27 H_u \cdot \eta_i \frac{T_0 \cdot P_a}{T_a \cdot P_0}}{632 \cdot P_i \cdot \alpha \cdot L_0} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} - \frac{h}{2R} \right) - 1. \quad (33)$$

Приведенные выше уравнения могут служить для определения (а также и для контроля определенных методов газового анализа) η_s , δ и γ , т. к. все величины, входящие в эти уравнения (за исключением α) известны.

Коэффициент избытка воздуха α можно определить, пользуясь методом газового анализа.

12. Определение теплоемкости газов

По Шелесту полная молекулярная теплоемкость газов и перегретых паров будет:

1. При постоянном объеме

$$\mu C_v = n \left(2,0075 + 0,9925 \ln \frac{T}{273} \right). \quad (34)$$

2. При постоянном давлении

$$\mu C_p = \mu C_v + \mu AR, \quad (35)$$

где n — число атомов в молекуле,

T — абсолютная температура и

μAR — постоянная для всех газов величина, равная 1,985.

Переводя натуральный логарифм в десятичный и подставив соответствующее число атомов, уравнение (34) можно преобразовать так:

1. Для двухатомных газов O_2 , N_2 и H_2

$$\mu C_v = 4,0150 + 4,5714 \lg \frac{T}{273}$$

и

2. Для трехатомных газов CO_2 , H_2O и SO_2

$$\mu C_v = 6,0225 + 6,8571 \lg \frac{T}{273}.$$

Средняя молекулярная теплоемкость газов может быть найдена по уравнению:

$$\mu C_v = \left(4,0150 + 4,5714 \lg \frac{T}{273} \right) \Sigma g_2 + \left(6,0225 + 6,8571 \lg \frac{T}{273} \right) \Sigma g_3,$$

где Σg_2 и Σg_3 — сумма объемных долей трех- и двухатомных газов.

Из приведенных выше уравнений видно, что средняя молекулярная теплоемкость зависит от состава газов в цилиндре. Состав газов не является постоянным, а зависит от чистоты продувки цилиндра и от количества топлива, сгоревшего к данному моменту. Но так как определение состава газов по углу поворота кривошипа встречает значительные затруднения, то для упрощения полагаем, что газ в цилиндре во время сжатия состоит только из двухатомных газов, а по ходу расширения — из продуктов сгорания без учета остаточных газов.

В этом случае средняя молекулярная теплоемкость по ходу сжатия определяется по уравнению:

$$\mu C_{vc} = 4,0150 + 4,5714 \lg \frac{I}{273},$$

а по ходу расширения по уравнению:

$$\mu C_{vp} = \left(4,0150 + 4,5714 \lg \frac{I}{273} \right) \Sigma g_2 + \left(6,0225 + 6,8571 \lg \frac{I}{273} \right) \Sigma g_3,$$

где сумма объемных долей двухатомных газов равна:

$$\Sigma g_2 = \frac{L'_0 (\alpha - 0,21) + \frac{C}{12} (1 - x)}{\alpha L'_0 (1 + \gamma) + \frac{(1-x)C}{12} + \frac{O}{32} + \frac{H}{4}}$$

и сумма объемных долей трехатомных газов:

$$\Sigma g_3 = \frac{x \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + \frac{S}{32}}{\alpha L'_0 (1 + \gamma) + \frac{(1-x)C}{12} + \frac{O}{32} + \frac{H}{4}}$$

Представленный выше метод определения величин, характеризующих работу двухтактного двигателя методом газового анализа, является методом экспериментальным. Точность его зависит в первую очередь от хорошей организации взятия газовых проб и от хорошо поставленного газового анализа.

За промежуток времени с момента перекрытия продувочных окон верхней кромкой поршня до момента перекрытия первым поршневым кольцом в двухтактном двигателе бывают значительные утечки газа в ресивер. Эта утечка при аналитическом методе определения температур цикла не учитывается. Метод газового анализа в этом отношении более точен, т. к., пользуясь им, определяем заряд цилиндра по действительному составу газов в цилиндре. Кроме этого, при определении температур цикла необязательно знать давление и температуру газов в цилиндре в конце продувки. При наличии индикаторной диаграммы, снятой со слабой пружины, методом газового анализа можно определить температуру газов в цилиндре в любой момент, в том числе и в конце продувки.

19 декабря 1939 года

