



МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»  
(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)  
БГТУ.СМК-Ф-4.2-К5-02

Факультет

А

шифр

Ракетно-космической техники

наименование

Кафедра

А8

шифр

Двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

наименование

ОТЧЁТ  
по научно-исследовательской работе  
на тему

Расчет рабочего процесса гидродвигателя

Выполнил студент группы А8М31  
Новожилов И.В.

\_\_\_\_\_  
Фамилия И.О.

**РУКОВОДИТЕЛЬ**

Соляр А.Я.

\_\_\_\_\_  
Фамилия И.О.

\_\_\_\_\_  
Подпись

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2019 г.

## **СОДЕРЖАНИЕ**

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>3</b>
<b>1. РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС В ДВИГАТЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>2. РАСЧЕТ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА.....</b>	<b>14</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>18</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

В данном отчете представлены расчеты рабочего процесса, исследуемого гидродвигателя. За основу взяты методы расчета двигателя внутреннего сгорания.

## 1. РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ДВИГАТЕЛЯ

**Коэффициент избытка воздуха** ( $\alpha$ ) принимается при нормальной нагрузке в следующих пределах:

$$\alpha = 0,8 \div 1,1$$

**Давление и температура окружающей среды** принимаются равными:

Атмосфера -  $p_0 = 1$  атм (760 мм рт. ст.);  $T_0 = 288$  К

Вода -  $p_{0в} = 0,1$  атм

**Давление перед воспламенением**  $p_\alpha$  – давление газов в цилиндре после закрытия впускного клапана:

$$p_\alpha = 4 p_0 \approx p_k$$

$p_k$  – давление воздуха после сжатия в нагнетателе.

Температура наддувочного воздуха  $T_k$  называют ту температуру, которую воздух имеет перед двигателем после нагнетателя.

$$T_k = T_0 \left( \frac{p_k}{p_0} \right)^{\frac{n_H - 1}{n_H}}$$

Значение показателя политропы сжатия воздуха в нагнетателе:

$$n_H = 1,4$$

Объём 1 кг воздуха перед двигателем:

$$v_k = \frac{RT_k}{P_k} \text{ м}^3/\text{кг}$$

Или так как газовая постоянная для воздуха  $R = 29,27$

$$v_k = \frac{29,27}{10^4} * \frac{T_k}{p_k} \text{ м}^3/\text{кг}$$

Где,  $p_k$  – в кг/см<sup>2</sup> и  $T_k$  в К.

Вес 1 м<sup>3</sup> воздуха перед двигателем:

$$\gamma_k = \frac{1}{v_k} \text{ кг/м}^3$$

В табл. Приведены значения  $v_k$  и  $\gamma_k$  в зависимости от  $\frac{p_k}{p_0}$  при  $p_0 = 1$  атм,  $T_0 = 288$  К и  $n_H = 1,4$ .

$\frac{p_k}{p_0}$	$\left(\frac{p_k}{p_0}\right)^{\frac{n_H-1}{n_H}}$	$\gamma_k$ в кг/м <sup>3</sup>	$v_k$ в м <sup>3</sup> /кг	$\frac{p_k}{p_0}$	$\left(\frac{p_k}{p_0}\right)^{\frac{n_H-1}{n_H}}$	$\gamma_k$ в кг/м <sup>3</sup>	$v_k$ в м <sup>3</sup> /кг
1	1	1,19	0,840	4,5	1,536	3,48	0,287
1,3	1,078	1,43	0,698	5,0	1,584	3,76	0,266
1,5	1,123	1,58	0,632	5,5	1,624	4,03	0,248
2,0	1,219	1,95	0,514	6,0	1,668	4,29	0,233
2,5	1,299	2,28	0,438	6,5	1,707	4,50	0,222
3,0	1,369	2,60	0,384	7,0	1,743	4,74	0,211
3,5	1,430	2,91	0,344	7,5	1,778	4,97	0,201
4,0	1,486	3,20	0,313	8,0	1,810	5,24	0,191

**Топливо воздух и продукты сгорания.** Для нефтяных бензиновых топлив можно принять следующий состав:  $C = 0,85$ ;  $H = 0,01$ .

Теплопроводность топлива (низшая)

$$Q_H = 8100 C + 24600 H - 2600 (O - S) - 600 W \text{ ккал/кг}$$

$$Q_H = 10500 \text{ ккал/кг}$$

Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива:

$$L_0 = \frac{1}{0,21} \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} \right) \text{ моль/кг}$$

Весовое количество:

$$L'_0 = 28,95 L_0 \text{ кг/кг}$$

Где 28,95 – молекулярный вес воздуха;

Количество горючей смеси:

$$M_0 = \alpha L_0 + \frac{1}{m_T}$$

Где  $m_T$  – молекулярный вес паров топлива; для бензина  $m_T \approx 114$ .

В табл. 2 приведены значения  $\alpha L_0$ ,  $\alpha L'_0$  в зависимости от  $\alpha$ .

Количество продуктов сгорания на 1 кг топлива в молях при  $\alpha \geq 1$ :

$$M_{CO_2} = \frac{C}{12} \text{ моль/кг}$$

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2} \text{ моль/кг}$$

$$M_{O_2} = 0,21(\alpha - 1)L_0 \text{ моль/кг}$$

$$M_{N_2} = 0,79 \alpha L_0 \text{ моль/кг}$$

$$M = M_{CO_2} + M_{H_2O} + M_{O_2} + M_{N_2} = L_0(\alpha - 0,21) + \frac{C}{12} + \frac{H}{2} \text{ моль/кг}$$

$\alpha$	$\alpha L_0$ в моль/кг	$\alpha L'_0$ в кг/кг	$M_0$ в моль/кг	Продукты сгорания								$\mu_0$
				$M_{CO}$ в моль/кг	$M_{CO_2}$ в моль/кг	$M_{H_2O}$ в моль/кг	$M_{O_2}$ в моль/кг	$M_{N_2}$ в моль/кг	$M$ в моль/кг	$M'$ в кг/кг	$\Delta M$ в моль/кг	
0,8	0,412	11,84	0,420	0,043	0,028	0,075	—	0,326	0,472	12,84	0,052	1,12
0,9	0,464	13,45	0,474	0,022	0,049		—	0,366	0,512	14,45	0,038	1,082
1,0	0,516	14,94	0,525	—	0,071		—	0,407	0,553	15,94	0,028	1,053
1,1	0,568	16,43	0,578	—	0,071		0,011	0,448	0,605	17,43	0,027	1,048
1,2	0,619	17,93	0,630	—	0,071		0,022	0,489	0,657	18,93	0,027	1,043

Критическим коэффициентом избытка воздуха  $\alpha_{кр}$  называют такой коэффициент избытка воздуха, при котором кислорода воздуха хватает для сгорания водорода полностью в  $H_2O$ , а углерода лишь в  $CO$ :

$$\alpha_{кр} = 1 - \frac{C}{5,04L_0}$$

Где С – весовая доля углерода в топливе.

Для нефтяных топлив  $\alpha_{кр} = 0,655 \div 0,670$

Количество продуктов сгорания на 1 кг топлива в молях при  $\alpha = \alpha_{крс} \div 1,0$ :

$$M_{CO} = 0,42(1 - \alpha)L_0 \text{ моль/кг}$$

$$M_{CO_2} = \frac{C}{12} - 0,42(1 - \alpha)L_0 \text{ моль/кг}$$

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2} \text{ моль/кг}$$

$$M_{N_2} = 0,79 \alpha L_0 \text{ моль/кг}$$

$$M = M_{CO} + M_{CO_2} + M_{H_2O} + M_{N_2} = \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + 0,79 \alpha L_0 \text{ моль/кг}$$

Приращение молей при сгорании при  $\alpha = \alpha_{крс} \div 1,0$ :

$$M = M - M_0 = \frac{H}{4} + \frac{O}{32} + 0,21(1 - \alpha)L_0 - \frac{1}{m_T} \text{ моль/кг}$$

Количество продуктов сгорания на 1 кг топлива

$$M = \alpha L'_0 + 1 \text{ кг/кг}$$

Теоретический коэффициент молекулярного изменения

$$\mu_0 = 1 + \frac{\Delta M}{\alpha L_0 + \frac{1}{m_T}}$$

Коэффициент остаточных газов  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{T_0 + \Delta T}{T_r} * \frac{p_r}{\varepsilon p_a - p_r}$$

Где  $\Delta T$  – подогрев свежего заряда от стенок

Значения  $\Delta T = 10 \div 20$  К;  $T_r = 950 \div 1150$  К;  $\gamma = 0,07 \div 0,15$

**Температура заряда перед воспламенением.** Температурой заряда перед воспламенением  $T_a$  назовём ту температуру, которую заряд имеет в цилиндре после закрытия впускного клапана:

$$T_a = \frac{T_K + \Delta T + \gamma T_r}{1 + \gamma}$$

Температура заряда перед воспламенением  $T_a$  при работе с наддувом получается близкой к температуре наддувочного воздуха  $T_K$  перед двигателем. Это объясняется, с одной стороны, малой величиной коэффициента остаточных газов  $\gamma$ ; с другой стороны, нагревание воздуха в процессе зарядки от соприкосновения со стенками цилиндра и днищем поршня незначительно из-за относительно высокой температуры наддувочного воздуха. Кроме того, нагрев воздуха от соприкосновения со стенками цилиндра и поршня частично компенсируется снижением температуры наддувочного воздуха за счет расширения последнего при прохождении через продувочные окна.

Коэффициент наполнения:

$$\eta_v =$$

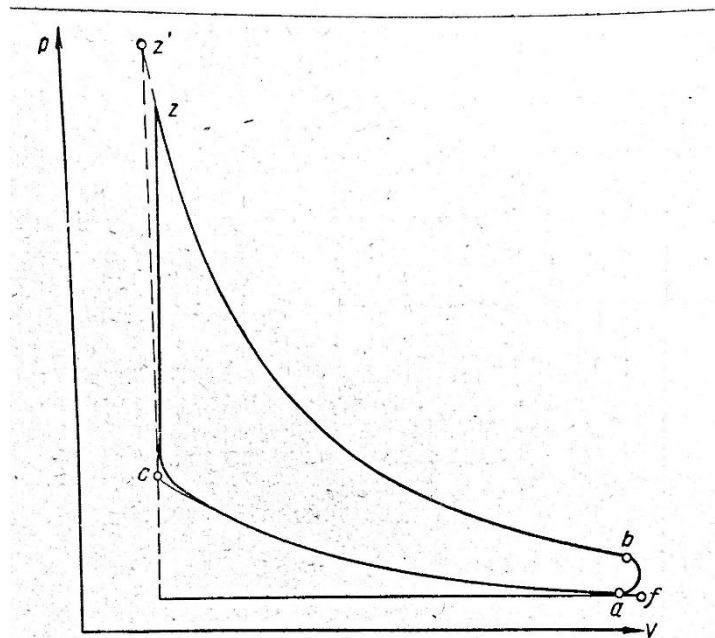
Процесс сгорания. Тепловая энергия, содержащая в потенциальной форме в топливе, при его сгорании в двигателе распределяется следующим образом:

- 1) часть тепла идёт на совершение механической работы;
- 2) часть тепла идёт на повышение внутренней энергии газов
- 3) часть тепла из топлива совсем не выделяется вследствие неполного сгорания топлива
- 4) часть тепла поглощается стенками цилиндра



5) часть тепла не выделяется при сгорании вследствие диссоциации

Наиболее интенсивное сгорание топлива происходит на участке индикаторной диаграммы  $c - z$ , который называют участком видимого сгорания.



Фиг. 2: Индикаторная диаграмма четырехтактного карбюраторного двигателя:

$a$  — начало сжатия;  $b$  — начало выпуска.

Экспериментальное изучение сгорания в двигателе показывает, что неполнота сгорания на участке  $c - z$  в той или иной степени всегда имеет место и дальнейшее догорание топлива наблюдается в процессе расширения.

Двигатель работает при  $\alpha < 1$ , поэтому в случае  $\alpha < 1$  необходимо из теплотворности топлива  $Q_H$  вычесть то количество тепла  $\Delta Q$ , которое теоретически не может быть выделено вследствие недостатка кислорода. Уравнение сгорания изохорного цикла при  $\alpha_{кр} < \alpha < 1$  имеет следующий вид:

$$\frac{\xi_z(Q_H - \Delta Q)}{\mu(1 + \gamma)M_0} + \frac{c'_v t_c}{\mu} = c''_v t_z$$

Или

(1)

$$\frac{\xi_z(Q_H - \Delta Q)}{\mu(1 + \gamma)M_0} + \frac{U'_c}{\mu} = U''_z$$

Где  $U'_c$  - внутренняя энергия 1 моля заряда, т.е. смеси воздуха остаточных газов и паров топлива при температуре  $t_c^\circ C$ .

$$U'_c = \frac{U_c + \gamma U''_c + \frac{U_c^T}{\alpha L_0 m_T}}{1 + \gamma + \frac{1}{\alpha L_0 m_T}}$$

где  $U_c^T$  – внутренняя энергия 1 моля паров топлива при температуре  $t_c^\circ C$ .

При применении в качестве топлива бензина

$$U'_c = \frac{U_c + \gamma U''_c + \frac{U_c^T}{59\alpha}}{1 + \gamma + \frac{1}{59\alpha}}$$

Для упрощения расчета с достаточной для практики точностью можно принять внутреннюю энергию смеси равной внутренней энергии воздуха, т.е.  $U'_c = U_c$  при этом погрешность получается весьма незначительной.

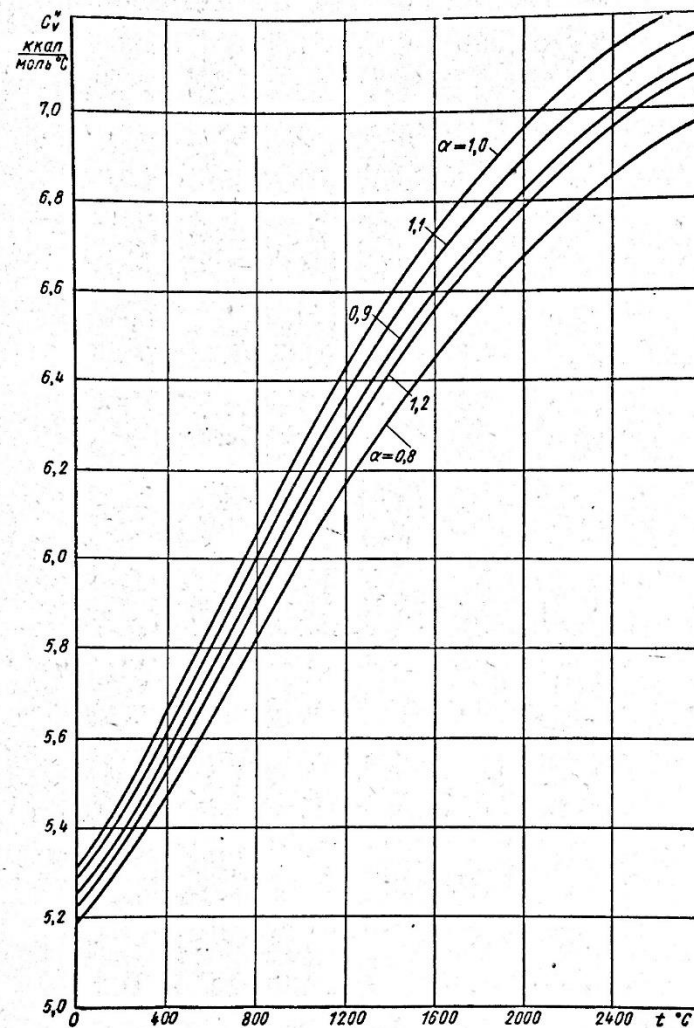
Значение  $\xi_z$  при работе карбюраторного двигателя на номинальной нагрузке:

$$\xi_z = 0,85 \div 0,95$$

Количество тепла  $\Delta Q$ , теряемого из-за неполноты сгорания при  $\alpha_{кр} < \alpha < 1$ , определяется из следующего выражения:

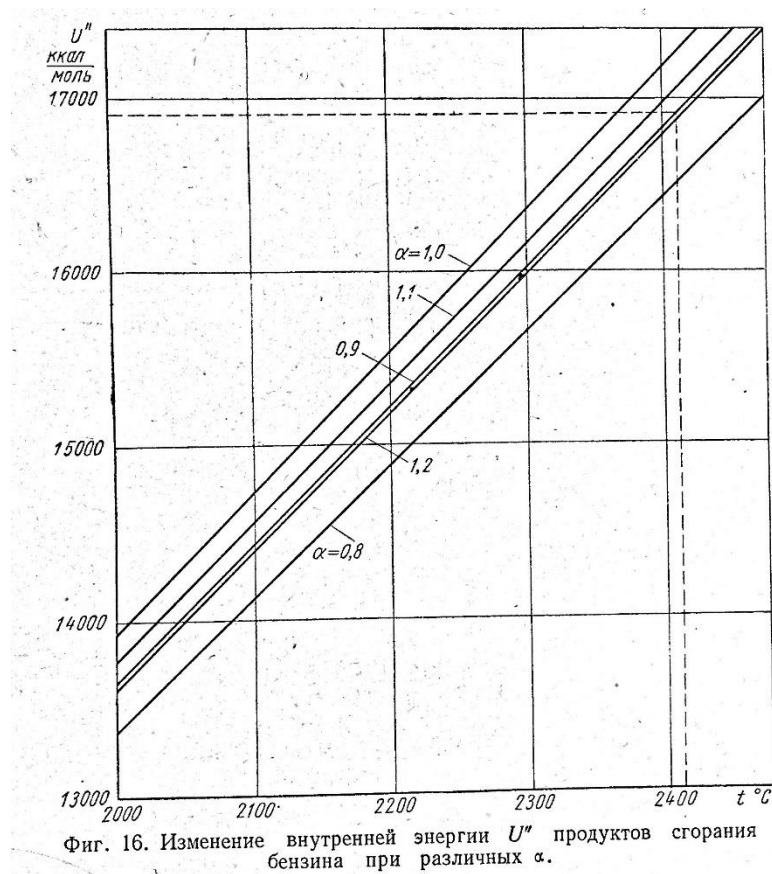
$$\Delta Q = 28560 (1 - \alpha) L_0 \text{ ккал/кг}$$

На фиг. 15 приведены значения теплоемкости  $c_v''$  продуктов сгорания бензина (состава С = 85%, Н = 15%) в зависимости от температуры для различных  $\alpha$ . При подсчете теплоемкостей принято, что при  $\alpha > 1$  топливо полностью сгорает, а при  $\alpha < 1$  неполнота сгорания выражается только в форме СО.



Фиг. 15. Значения средней теплоемкости  $c_v''$  продуктов сгорания бензина в зависимости от температуры при различных  $\alpha$ .

На фиг. 16 приведены значения внутренней энергии  $U_c'' = c_v''t$  продуктов сгорания бензина принятого состава в зависимости от температуры для различных  $\alpha$ .



При графоаналитическом способе решения подсчитывают значение левой части уравнения (1), представляющее собой внутреннюю энергию, и затем по графику фиг.16 определяют искомое значение  $t_z$ .

Степень повышения давления изохорного цикла

$$\lambda = \mu \frac{T_z}{T_c}$$

**Процесс расширения.** Давление в конце расширения

$$p_b = \frac{p_z}{\delta^{n_2}}$$

но, в свою очередь,

$$\delta = \frac{V_b}{V_{cp}}$$

С достаточной точностью для теплового расчета можно принять  $V_b = V_a$ , и тогда  $\delta = \frac{V_b}{V_{cp}}$ .

Температура в конце расширения

$$T_b = \frac{T_z}{\delta^{n_2-1}} \text{ } ^\circ \text{ абс.}$$

Показатель политропы расширения обычно выбирают в пределах  $n_2 = 1,20 \div 1,28$ .

Большие значения  $n_2$  выбираются при больших коэффициентах использования тепла  $\xi_z$  и при интенсивном охлаждении.

При работе двигателя с наддувом по мере повышения давления наддува значение  $n_2$  понижается.

## 2. РАСЧЕТ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА

В соответствии с быстроходностью и типом двигателя принимаем следующие исходные параметры для расчета:  $\varepsilon = 6,5$ ;  $\alpha = 0,9$ ;  $p_0 = 1,0$  ата;  $T_0 = 288^\circ$  абс.;  $p_a = 0,80$  ата  $p_r = 1,2$  ата  $\Delta T = 12^\circ$ ;  $T_r = 1050^\circ$  абс.;  $n_1 = 1,36$ ;  $n_2 = 1,25$ ;  $\xi_z = 0,9$ .

Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива

$$L_0 = \frac{1}{0,21} \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right) = \frac{1}{0,21} \left( \frac{0,85}{12} + \frac{0,15}{4} \right) = 0,516 \text{ моль/кг}$$

$$L'_0 = 28,95 L_0 = 28,95 * 0,516 = 15 \text{ кг/кг т}$$

Действительно потребляемое количество воздуха для 1 кг топлива

$$L = \alpha L'_0 = 0,9 * 0,516 \text{ моль/кг}$$

То же в кг

$$L = \alpha L'_0 = 0,9 * 14,94 \text{ кг/кг}$$

Количество горючей смеси

$$M_0 = \alpha L_0 + \frac{1}{m_T} = 0,9 * 0,516 + \frac{1}{114} = 0,474 \text{ моль/кг}$$

Количество отдельных компонентов продуктов сгорания:

Количество CO

$$M_{CO} = 0,42(1 - \alpha)L_0 = 0,42(1 - 0,9)0,516 = 0,022 \text{ моль/кг}$$

Количество CO<sub>2</sub>

$$M_{CO_2} = \frac{C}{12} - 0,42(1 - \alpha)L_0 = \frac{0,85}{12} - 0,022 = 0,049 \text{ моль/кг}$$

Количество H<sub>2</sub>O

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2} = \frac{0,15}{2} = 0,075 \text{ моль/кг}$$

Количество  $N_2$

$$M_{N_2} = 0,79\alpha L_0 = 0,79 * 0,9 * 0,516 = 0,366 \text{ моль/кг}$$

Общее количество продуктов сгорания

$$M = M_{CO} + M_{CO_2} + M_{H_2O} + M_{N_2} = 0,022 + 0,049 + 0,075 + 0,366 \\ = 0,512 \text{ моль/кг}$$

Приращение количества молей при сгорании

$$\Delta M = M - M_0 = 0,512 - 0,474 = 0,039 \text{ моль/кг}$$

Теоретический коэффициент молекулярного изменения

$$\mu_0 = 1 + \frac{\Delta M}{M_0} = 1 + \frac{0,039}{0,474} = 1,082$$

Коэффициент остаточных газов

$$\gamma = \frac{T_0 + \Delta T}{T_r} \frac{P_r}{\varepsilon p_a - p_r} = \frac{288 + 12}{1050} * \frac{1,2}{6,5 * 0,8 - 1,2} = 0,086$$

Действительный коэффициент молекулярного изменения

$$\mu = \frac{\mu_0 - \gamma}{1 + \gamma} = \frac{1,082 + 0,086}{1 + 0,086} = 1,07$$

Температура газов в начале сжатия

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + \gamma T_r}{1 + \gamma} = \frac{288 + 12 + 0,086 * 1050}{1 + 0,086} = 373K$$

Коэффициент наполнения

$$\eta_v = \frac{\varepsilon p_a - p_r}{(\varepsilon - 1)p_0} * \frac{T_0}{T_0 + \Delta T} = \frac{6,5 * 0,8 - 1,2}{(6,5 - 1)1} * \frac{288}{288 + 12} = 0,7$$

Давление в конце сжатия

$$p_c = p_a \varepsilon^{n_1} = 0,8 * 6,5^{1,36} = 10,2 \text{ атм}$$

Температура в конце сжатия

$$T_c = T_a \varepsilon^{n_1-1} = 363 * 6,5^{0,36} = 710 \text{ атм}$$

$$t_c = 710 - 273 = 437^\circ \text{C}$$

Количество тепла  $\Delta Q$ , теряемое из-за неполноты сгорания при  $\alpha = 0,9$ :

$$\Delta Q = 28560(1 - \alpha)L_0 = 28560(1 - 0,9)0,516 = 1470 \text{ ккал/кг}$$

Внутренняя энергия воздуха при температуре  $t_c$

$$U_c = c_v t_c = 5,16 * 437 = 2250 \text{ ккал/кг}$$

Из фиг. 15 находим  $c_v = 5,16 \text{ ккал/моль град}$  для воздуха при  $t_c = 437^\circ \text{C}$ .

Температура конца сгорания:

$$\frac{\xi_z(Q_H - \Delta Q)}{\mu(1 + \gamma)M_0} + \frac{U'_c}{\mu} = U''_z$$

В соответствии с рекомендациями подставляем числовые значения в уравнения и получим

$$U''_z = \frac{0,9(10500 - 1470)}{1,07(1 + 0,086)0,474} + \frac{2250}{1,07} = 16900$$

Для простоты расчета принимаем внутреннюю энергию смеси равной внутренней энергии воздуха

$$U'_c = U_c$$

По графику на фиг.16 находим искомое значение  $t_z = 2412^\circ \text{C}$ .

$$T_z = 2412 + 273 = 2685 \text{ K}$$

Степень повышения давления



$$\lambda = \mu \frac{T_z}{T_c} = 1,07 \frac{2685}{710} = 4,05$$

Давление в конце сгорания

$$p_z = \lambda p_c = 4,05 * 10,2 = 41,3 \text{ кг/см}^2$$

Давление в конце расширения

$$p_b = \frac{p_z}{\varepsilon^{n_2}}$$

Приняв  $n_2 = 1,25$ , найдем

$$p_b = \frac{41,3}{6,5^{1,25}} = \frac{41,3}{10,35} = 4 \text{ кг/см}^2$$

Теоретическое среднее индикаторное давление

$$p'_i = 8,65 \text{ кг/см}^2$$

Приняв коэффициент полноты диаграммы, найдем действительное среднее индикаторное давление

$$p_i = p'_i \varphi_n = 8,65 * 0,95 = 8,2 \text{ кг/см}^2$$

Среднее эффективное давление

$$p_e = p_i \eta_m = 8,2 * 0,83 = 6,8 \text{ кг/см}^2$$

Значение механического К.П.Д. в соответствии с рекомендациями принимаем

$$\eta_m = 0,83$$

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Басенцян А.А. Расчет рабочих процессов в двигателях внутреннего сгорания под ред. А.С. Орлина – Москва: Издательство МАШГИЗ, 1958. – 157 с.
2. Дьяченко Н.Х., Дашков С.Н., Мусатов В.С., Белов П.М., Будыко Ю.И. Быстроходные поршневые двигатели внутреннего сгорания под ред. Юркевич М.П. – Москва: Издательство МАШГИЗ, 1962. – 359 с.