

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Двигатели внутреннего сгорания»

Г. А. Вершина  
О. С. Быстренков

# ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ГАЗОДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Пособие для студентов специальности  
1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением  
по образованию в области транспорта  
и транспортной деятельности*

Минск  
БНТУ  
2020

УДК 621.431.73(075.4)

ББК 31.365я7

В37

**Р е ц е н з е н т ы:**

зав. кафедрой «ТЭВСиД» Белорусской государственной академии авиации, канд. техн. наук *Е. А. Телущенко*;  
начальник КБ газовых и 8-цилиндровых двигателей  
управления главного конструктора ОАО «УКХ «Минский  
моторный завод» *С. В. Конаков*

**Вершина, Г. А.**

В37 Тепловой расчет газодизельного двигателя внутреннего сгорания : пособие для студентов специальности 1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания» / Г. А. Вершина, О. С. Быстренков. – Минск : БНТУ, 2020. – 34 с.

ISBN 978-985-583-268-4.

В пособии изложена систематизированная методика теплового расчета двигателей внутреннего сгорания различного функционального назначения, а также методика расчета равновесного состава продуктов сгорания.

УДК 621.431.73(075.4)

ББК 31.365я7

ISBN 978-985-583-268-4

© Вершина Г. А., Быстренков О. С., 2020

© Белорусский национальный  
технический университет, 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ .....	5
1. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ЧЕТЫРЕХТАКТНЫХ ГАЗОДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	9
1.1. Процесс впуска.....	9
1.2. Процесс сжатия .....	10
1.3. Процесс сгорания .....	11
1.4. Процесс расширения.....	15
1.5. Процесс выпуска .....	16
1.6. Индикаторные показатели двигателя.....	16
1.7. Эффективные показатели двигателя .....	17
1.8. Основные размеры цилиндра и показатели поршневого двигателя .....	18
2. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ГАЗОДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С НАДДУВОМ .....	21
3. ПОСТРОЕНИЕ ИНДИКАТОРНЫХ ДИАГРАММ .....	23
3.1. Общие положения .....	23
3.2. Перестроение индикаторной диаграммы в координаты $p - \varphi$ .....	28
4. РАСЧЕТ РАВНОВЕСНОГО СОСТАВА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ.....	30
ЛИТЕРАТУРА.....	34

## ВВЕДЕНИЕ

Данное пособие предназначено для систематизации и закрепления теоретических знаний студентов по основным разделам дисциплины «Теория рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания».

Тепловой расчет двигателя [1–4] служит для определения параметров газов в рабочем цикле газодизельного двигателя, а также оценочных показателей, характеризующих цикл в целом и позволяющих определить размеры двигателя, его мощностные показатели и экономические показатели.

Выполнение теплового расчета двигателя с учетом всей совокупности тепловых потерь, связанных с неполнотой и несвоевременностью сгорания, диссоциацией и теплоотдачей в стенки, является сложной задачей.

В пособии приведен приближенный метод расчета, основанный на методе, предложенном профессором В. И. Гриневецким и дополненном профессорами Е. К. Мазингом и Н. Р. Брилингом.

Проведение теплового расчета позволяет освоить связь между отдельными процессами рабочего цикла и получить представление о влиянии различных факторов на показатели двигателя в целом.

Тепловой расчет выполняется для режима номинальной мощности.

Система нелинейных уравнений в методике расчета равновесного состава продуктов сгорания [5] решается средствами Mathcad.

В задании на тепловой расчет указываются следующие данные: тип двигателя, его назначение, мощность, частота вращения коленчатого вала, число цилиндров, степень сжатия, коэффициент избытка воздуха, величина запальной порции дизельного топлива (доля замещения газового топлива дизельным), отношение хода поршня к диаметру цилиндра, давление наддува, применяемое топливо, рекомендуемый прототип.

Пособие предназначено для студентов специальности 1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания», но может быть использовано и студентами других автотракторных специальностей.

*В пособии приведены средние значения показателей рабочего цикла для номинального режима работы двигателя.*

## ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

### *Давление*

- $p_0$  – давление окружающей среды, МПа;  
 $p_k$  – давление после компрессора (нагнетателя), МПа;  
 $p_s$  – давление после охладителя наддувочного воздуха, МПа;  
 $\Delta p_a$  – потеря давления на впуске, МПа;  
 $\Delta p_s$  – потеря давления в охладителе наддувочного воздуха (ОНВ), МПа;  
 $p_a$  – давление конца впуска, МПа;  
 $p_c$  – давление в конце сжатия, МПа;  
 $p_z$  – теоретическое максимальное давление сгорания, МПа;  
 $p_{zd}$  – действительное максимальное давление сгорания, МПа;  
 $p_b$  – давление в конце расширения, МПа;  
 $p_r$  – давление остаточных газов, МПа;  
 $p'_i$  – среднее индикаторное давление теоретического цикла, МПа;  
 $p_i$  – среднее индикаторное давление действительного цикла, МПа;  
 $p_e$  – среднее эффективное давление, МПа;

### *Температура*

- $T_0$  – температура окружающей среды, К;  
 $\Delta T$  – температура подогрева свежего заряда, К;  
 $T_k$  – температура после компрессора (нагнетателя), К;  
 $T_s$  – температура после охладителя наддувочного воздуха, К;  
 $T_a$  – температура конца впуска, К;  
 $T_c$  – температура в конце сжатия, К;

$T_z$  – максимальная температура сгорания, К;

$T_b$  – температура в конце расширения, К;

$T_r$  – температура остаточных газов, К;

### ***Топливо и газы***

$g_C^r, g_H^r$  – элементарный состав газового топлива в долях 1 кг соответственно углерода и водорода;

$g_C^j, g_H^j, g_O^j$  – элементарный состав жидкого топлива в долях 1 кг соответственно углерода, водорода, кислорода;

$q$  – величина запальной порции дизельного топлива (доля замещения газового топлива дизельным), %;

$H_u$  – суммарная низшая теплота сгорания, кДж/кг;

$H_u^j$  – низшая теплота сгорания для жидкого топлива, кДж/кг;

$H_u^r$  – низшая теплота сгорания для газового топлива, кДж/кг;

$\Delta H_u$  – потеря теплоты вследствие неполноты сгорания топлива, кДж/кг;

$m_T$  – молекулярная масса топлива, кг/кмоль;

$L_0$  – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива, кмоль возд./кг топлива;

$M_1$  – число молей свежего заряда, кмоль/кг топлива;

$M_2$  – число молей продуктов сгорания, кмоль/кг топлива;

$\rho_T$  – плотность топлива, кг/м<sup>3</sup>;

$mc_{vc}$  – средняя мольная теплоемкость свежего заряда, кДж/(кмоль · К);

$mc_{vz}$  – средняя мольная теплоемкость продуктов сгорания, кДж/(кмоль · К);

$M_x$  – число молей соответствующих компонентов, кмоль/кг;

## ***Коэффициенты***

- $\varepsilon$  – степень сжатия;  
 $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;  
 $\gamma_r$  – коэффициент остаточных газов;  
 $\mu_0$  – теоретический коэффициент молекулярного изменения;  
 $\mu$  – действительный коэффициент молекулярного изменения;  
 $\xi$  – коэффициент использования теплоты;  
 $\varphi_p$  – коэффициент уменьшения давления;  
 $\eta_{оч}$  – коэффициент очистки пространства сжатия;  
 $\eta_{доз}$  – коэффициент дозарядки;  
 $\eta_v$  – коэффициент наполнения;  
 $\eta_i$  – индикаторный коэффициент полезного действия (КПД);  
 $\eta_m$  – механический КПД;  
 $\eta_e$  – эффективный КПД;  
 $n_1$  – показатель политропы сжатия;  
 $n_2$  – показатель политропы расширения;  
 $k$  – степень повышения давления в процессе сгорания;  
 $\rho$  – степень предварительного расширения;  
 $\delta$  – степень последующего расширения;  
 $K$  – константа равновесия;

## ***Расходы топлива и воздуха***

- $g_i$  – удельный индикаторный расход жидкого топлива,  
г/(кВт·ч);  
 $v_i$  – удельный индикаторный расход газового топлива,  
г/(кВт·ч);

$g_e$  – удельный эффективный расход жидкого топлива, г/(кВт·ч);

$v_e$  – удельный эффективный расход газового топлива, г/(кВт·ч);

$G_T$  – часовой расход жидкого топлива, кг/ч;

$V_T$  – часовой расход газового топлива, кг/ч;

### ***Мощность и моменты***

$N_i$  – индикаторная мощность, кВт;

$N_{л}$  – литровая мощность, кВт/л;

$N_e$  – эффективная мощность, кВт;

$M_e$  – эффективный крутящий момент, Н·м;

### ***Геометрические и кинематические параметры***

$D$  – диаметр цилиндра, м;

$n$  – частота вращения коленчатого вала двигателя, мин<sup>-1</sup>;

$C_m$  – средняя скорость поршня, м/с;

$S$  – ход поршня, м;

$R$  – радиус кривошипа, м;

$L$  – длина шатуна, м;

$\lambda$  – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна;

$i$  – число цилиндров двигателя;

$V_{л}$  – литраж двигателя, л;

$V_h$  – рабочий объем одного цилиндра, л;

$V_c$  – объем сжатия одного цилиндра, л.

# 1. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ГАЗОДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

## 1.1. Процесс впуска

При расчете процесса впуска делаем допущение на то, что в двигателе без наддува воздух поступает в цилиндры из атмосферы, при расчете давление и температура окружающей среды принимаются:  $p_0 = 0,1$  МПа,  $T_0 = 298$  К для автомобильных двигателей;  $p_0 = 0,1$  МПа,  $T_0 = 293$  К – для тракторных.

Давление остаточных газов

$$p_r = (1,05 - 1,25)p_0.$$

Температура остаточных газов

$$T_r = 600 - 1000 \text{ К.}$$

Температура подогрева свежего заряда

$$\Delta T = 5 - 30 \text{ К.}$$

Давление в конце впуска

$$p_a = p_0 - \Delta p_a.$$

Потери давления на впуске  $\Delta p_a = (0,04 - 0,18)p_0$ .

Коэффициент остаточных газов

$$\gamma_r = \frac{T_0 + \Delta T}{T_r} \frac{p_r}{\varepsilon p_a - p_r}.$$

Величина коэффициента остаточных газов лежит в пределах  $\gamma_r = 0,02 - 0,06$ .

Температура в конце впуска

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + \gamma_r T_r}{1 + \gamma_r}.$$

Значение температуры в конце впуска у четырехтактных двигателей находится в следующих пределах:  $T_a = 310 - 350$  К.

Коэффициент наполнения

$$\eta_v = \frac{T_0}{T_0 + \Delta T} \frac{1}{\varepsilon - 1} \frac{1}{p_0} (\varepsilon p_a - p_r).$$

Величина коэффициента наполнения  $\eta_v = 0,8 - 0,92$ .

## 1.2. Процесс сжатия

Давление в конце сжатия

$$p_c = p_a \varepsilon^{n_1}.$$

Температура в конце сжатия

$$T_c = T_a \varepsilon^{n_1 - 1}.$$

Значения показателей процесса сжатия приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

### Показатели процесса сжатия

Тип двигателя	$n_1$	$p_c$ , МПа	$T_c$ , К
Без наддува	1,35–1,40	3,5–6	700–950
С наддувом	1,32–1,37	5,0–11,0	900–1150

### 1.3. Процесс сгорания

Теоретически необходимое количество воздуха (кмоль) для сгорания 1 кг жидкого топлива

$$L_0^{\text{ж}} = \frac{1}{0,21} \left( \frac{g_{\text{C}}}{12} + \frac{g_{\text{H}}}{4} - \frac{g_{\text{O}}}{32} \right),$$

где 0,21 – объемная доля кислорода в воздухе.

Теоретически необходимое количество воздуха (кмоль) для сгорания 1 кг газового топлива

$$L_0^{\text{г}} = \frac{1}{0,21} \left( \frac{g_{\text{C}}}{12} + \frac{g_{\text{H}}}{4} \right),$$

где 0,21 – объемная доля кислорода в воздухе.

Теоретически необходимое количество воздуха (кмоль) для сгорания 1 кг смеси жидкого и газового топлива

$$L_0 = qL_0^{\text{ж}} + (1-q)L_0^{\text{г}}.$$

Величина запальной порции дизельного топлива лежит в пределах  $q = 0,08 - 0,16$ .

Элементарный состав топлива принимают:

– для дизельного топлива  $g_{\text{C}} = 0,86$ ,  $g_{\text{H}} = 0,136$ ,  $g_{\text{O}} = 0,004$ ;

– пропана  $g_{\text{C}} = 0,818$ ,  $g_{\text{H}} = 0,182$ ;

– бутана  $g_{\text{C}} = 0,828$ ,  $g_{\text{H}} = 0,172$ ;

– метана  $g_{\text{C}} = 0,75$ ,  $g_{\text{H}} = 0,25$ .

Современные дизельные топлива могут содержать некоторое количество кислородосодержащих соединений (оксигенатов), что приводит к появлению кислорода  $g_{\text{O}}$  в топливе и некоторому изменению долей углерода  $g_{\text{C}}$  и водорода  $g_{\text{H}}$ .

Для смеси газовых топлив элементарный состав определяют следующим образом:

$$g_C^r = \sum_{i=1}^h (g_C)_i (g_{C_n H_m})_i;$$

$$g_H^r = \sum_{i=1}^h (g_H)_i (g_{C_n H_m})_i.$$

Количество свежего заряда (кмоль)

$$M_1 = 1 + \alpha L_0.$$

Количество продуктов сгорания (кмоль)

$$M_2 = 1 + \alpha L_0 + \frac{g_C}{12} + \frac{g_H}{2}.$$

Для определения количества продуктов сгорания необходимо рассчитать элементарный состав смеси газового и дизельного топлива:

$$g_C = q (g_C^{\text{ж}}) + (1 - q) (g_C^r);$$

$$g_H = q (g_H^{\text{ж}}) + (1 - q) (g_H^r).$$

Теоретический коэффициент молекулярного изменения

$$\mu_0 = \frac{M_2}{M_1}.$$

Действительный коэффициент молекулярного изменения

$$\mu = 1 + \frac{\mu_0 - 1}{1 + \gamma_r}.$$

Величина действительного коэффициента молекулярного изменения лежит в пределах  $\mu = 1,01 - 1,06$ .

Низшую теплоту сгорания топлива принимают:

– для дизельного топлива  $H_u = 42\,500 - 43\,000$  кДж/кг;

– метана  $H_u = 55\,000$  кДж/кг;

– пропана  $H_u = 50\,000$  кДж/кг;

– бутана  $H_u = 45\,800$  кДж/кг.

Значения  $H_u$  для газов установлены при температуре  $0^\circ\text{C}$  и давлении  $101,325$  кПа.

Для современного дизельного топлива, в состав которого входят кислородосодержащие соединения, значение  $H_u$  снижается.

Низшая теплота сгорания смеси дизельного и газового топлива рассчитывается следующим образом:

$$H_u = qH_u^{\text{жк}} + (1 - q)H_u^{\text{г}}.$$

Средняя молярная теплоемкость свежего заряда определяется по формуле

$$mc_{vc} = 20,16 + 1,74 \cdot 10^{-3} T_c. \quad (1.1)$$

Средняя молярная теплоемкость продуктов сгорания

$$mc_{vz} = \left( 20,10 + \frac{0,92}{\alpha} \right) + \left( 1,55 + \frac{1,38}{\alpha} \right) 10^{-3} T_z. \quad (1.2)$$

Значение коэффициента использования теплоты для газодизельного двигателя  $\xi = 0,80 - 0,85$ .

Уравнение сгорания

$$\frac{\xi H_u}{M_1(1 + \gamma_r)} + (mc_{vc} + 8,314k)T_c = \mu(mc_{vz} + 8,314)T_z. \quad (1.3)$$

Величину степени повышения давления выбирают в следующих пределах  $k = 1,5 - 2,5$ .

В уравнении сгорания (1.3) после подстановки теплоемкостей известны все члены, кроме  $T_z$ . Эту температуру можно определить методом последовательных приближений (подбором значений  $T_z$ ), если для определения  $mc_{vz}$  используются табличные значения. При использовании формул (1.1) и (1.2) для определения  $mc_{vz}$  уравнение сгорания после преобразования можно представить в виде квадратного уравнения:

$$AT_z^2 + BT_z - C = 0,$$

откуда

$$T_z = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A},$$

где  $A, B, C$  – численные значения известных величин.

Величина теоретического максимального давления сгорания определяется следующим образом:

$$p_z = kp_c.$$

Действительное давление  $p_{zd} = p_z$ .

Значения температуры и давления изменяются в пределах, приведенных в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Показатели процесса сгорания

Тип двигателя	$T_z$ , К	$p_{zd}$ , МПа
Без наддува	1600–2200	7,0–9,0
С наддувом	1700–2300	8,0–17,0

## 1.4. Процесс расширения

Степень предварительного расширения

$$\rho = \frac{\mu T_z}{k T_c}.$$

Степень последующего расширения

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\rho}.$$

Температура в конце расширения

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

Давление в конце расширения

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

Величину среднего показателя политропы расширения выбирают в следующих пределах  $n_2 = 1,18-1,28$ .

Примерные значения  $T_b$  и  $p_b$  приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Примерные значения приведены в таблице

$T_b$ , К	$p_b$ , МПа
1000–1300	0,20–0,80

## 1.5. Процесс выпуска

Параметры процесса выпуска задаются в начале расчета процесса впуска. Правильность предварительного выбора величин проверяется по формуле профессора Е. К. Мазинга:

$$T_r = \frac{T_b}{\sqrt[3]{\frac{p_b}{p_r}}}.$$

Расхождение между принятой величиной и вычисленной по формуле не должно превышать 10 %. В противном случае тепловой расчет необходимо уточнить.

## 1.6. Индикаторные показатели

Среднее индикаторное давление теоретического цикла для газодизельного двигателя подсчитывается по формуле

$$p'_i = \frac{p_c}{\varepsilon - 1} \left[ \frac{k \cdot \rho}{n_2 - 1} \left( 1 - \frac{1}{\delta^{n_2 - 1}} \right) - \frac{1}{n_1 - 1} \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1 - 1}} \right) + k(\rho - 1) \right].$$

Среднее индикаторное давление действительного цикла

$$p_i = \varphi_{\Pi} p'_i.$$

Для газодизелей принимают  $\varphi_{\Pi} = 0,92-0,95$ .

Величина  $p_i$  для различных двигателей изменяется в следующих пределах:

– без наддува  $p_i = 0,75-1,25$  МПа;

– с наддувом  $p_i = 0,8-2,6$  МПа.

Индикаторный КПД для газодизельного двигателя подсчитывается по формуле

$$\eta_i = 8,314 \frac{M_1 p_i T_0}{H_u \eta_v p_0}.$$

Удельный индикаторный расход жидкого топлива определяется по уравнению

$$g_i = \frac{3600 \cdot 10^3}{H_u^{\text{ж}} \eta_i} \cdot q.$$

Удельный индикаторный расход газового топлива определяется по уравнению

$$v_i = \frac{3600 \cdot 10^3}{H_u^{\text{г}} \eta_i} \cdot (1 - q).$$

Величина индикаторного КПД для двигателей имеет следующие значения  $\eta_i = 0,40-0,53$ .

### 1.7. Эффективные показатели

Задаем величину механического КПД двигателя, исходя из следующих значений:

- для газодизелей без наддува  $\eta_{\text{м}} = 0,70-0,83$ ;
- для газодизелей с наддувом  $\eta_{\text{м}} = 0,80-0,90$ .

Среднее эффективное давление

$$p_e = p_i \cdot \eta_{\text{м}}.$$

Эффективный КПД

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m.$$

Удельный эффективный расход жидкого топлива

$$g_e = \frac{3600 \cdot 10^3}{H_u^{\text{ж}} \eta_e} \cdot q.$$

Удельный эффективный расход газового топлива

$$v_e = \frac{3600 \cdot 10^3}{H_u^{\text{г}} \eta_e} \cdot (1 - q).$$

Эффективные показатели двигателей приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Значения эффективных показателей двигателей

Тип двигателя	$\eta_e$	$p_e$ , МПа
Без наддува	0,32–0,43	0,60–1,0
С наддувом	0,35–0,46	0,8–2,4

### 1.8. Основные размеры цилиндра и показатели поршневого двигателя

По эффективной мощности частоты вращения коленчатого вала и среднему эффективному давлению определяем литраж двигателя

$$V_{\text{л}} = 30\tau \frac{N_e}{p_e n},$$

где  $N_e$  – выражена в кВт;

$p_e$  – в МПа;

$n$  – в  $\text{мин}^{-1}$ ;

$\tau = 4$  для четырехтактного двигателя.

Рабочий объем одного цилиндра

$$V_h = \frac{V_{\text{л}}}{i}.$$

Диаметр цилиндра

$$D = 0,159 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_h}{\pi(S/D)}}.$$

Ход поршня

$$S = D(S/D).$$

Полученные значения округляют до целого числа, кратного двум или пяти. По принятым значениям определяют основные параметры и показатели двигателя.

Литраж двигателя

$$V'_{\text{л}} = \frac{\pi D^2 S i}{4} \cdot 10^3.$$

Эффективная мощность

$$N'_e = \frac{p_e V'_{\text{л}} n}{30\tau}.$$

Эффективный крутящий момент

$$M_e = \frac{3 \cdot 10^4 N'_e}{\pi n}.$$

Часовой расход жидкого топлива

$$G_T = N'_e g_e \cdot 10^{-3}.$$

Часовой расход газового топлива

$$V_T = N'_e v_e \cdot 10^{-3}.$$

Средняя скорость поршня

$$C_m = \frac{Sn}{30}.$$

Величина  $N'_e$  может отличаться от заданной  $N_e$  не более чем на 10 %. В противном случае расчет необходимо уточнить.

Литровая мощность определяется по формуле

$$N_{\text{л}} = \frac{P_e n}{30\tau}.$$

Величина литровой мощности для автотракторных двигателей колеблется в пределах  $N_{\text{л}} = 12-100$  кВт/л.

## 2. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ГАЗОДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С НАДДУВОМ

Для газодизельного двигателя с наддувом давление после компрессора принимается по прототипу или равным  $p_k = (1,5-2,5)p_0$ .

Для газодизельного двигателя с наддувом без охладителя наддувочного воздуха (ОНВ) температура заряда после компрессора

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

Величину  $n_k$  принимают в зависимости от типа нагнетателя и степени охлаждения:

- для поршневых нагнетателей  $n_k = 1,4-1,6$ ;
- объемных нагнетателей  $n_k = 1,55-1,75$ ;
- центробежных нагнетателей  $n_k = 1,8-2,0$ .

Если двигатель работает с ОНВ, то давление воздуха на выходе из охладителя

$$p_s = p_k - \Delta p_s.$$

Для воздушно-воздушного ОНВ  $\Delta p_s = 0,003-0,005$  МПа, а для жидкостно-воздушного –  $\Delta p_s = 0,002-0,004$  МПа.

Температура воздуха за холодильником при расчетах принимается  $T_s = T_0 + (20-25)^\circ$ .

Для газодизельного двигателя с наддувом при определении основных параметров рабочего цикла по п. 1.1 и 1.6 следует

вместо  $T_0$  и  $p_0$  подставлять  $T_k(T_s)$  и  $p_k(p_s)$ . В данном пункте при наличии ОНВ вместо  $T_k$  и  $p_k$  в формулы также подставляем  $T_s$  и  $p_s$ .

Давление остаточных газов для газодизельных двигателей с наддувом может быть больше, равно или меньше давления на впуске. При расчетах выбирается в пределах  $p_r = (0,80-1,30) p_k$ .

Температура остаточных газов  $T_r = 700-1300$  К.

Температура подогрева свежего заряда для газодизельных двигателей с наддувом  $\Delta T = (-5) - (+10)$  К.

Давление в конце впуска для газодизельных двигателей с наддувом

$$p_a = (0,90-0,95) p_k.$$

Температура в конце впуска для газодизельных двигателей с наддувом

$$T_a = \frac{T_k + \Delta T + \eta_{\text{доз}} \gamma_r T_r}{1 + \eta_{\text{доз}} \gamma_r}.$$

Коэффициент дозарядки принимают  $\eta_{\text{доз}} = 1,02-1,13$ .

Для двигателей с наддувом  $T_a = 320-450$  К.

Величину коэффициента остаточных газов для газодизельного четырехтактного двигателя  $\gamma_r = 0,02-0,06$ .

Для определения коэффициента наполнения газодизельных двигателей с наддувом используется уравнение

$$\eta_v = \frac{T_k}{(T_k + \Delta T)} \frac{1}{(\varepsilon - 1)} \frac{\eta_{\text{доз}}}{p_k} [\varepsilon p_a - p_r (1 - \eta_{\text{оч}})].$$

Коэффициент очистки пространства сжатия принимают  $\eta_{оч} = 0,05-0,2$ .

Для двигателей с наддувом  $\eta_v = 0,90-0,98$ .

Остальные расчеты проводятся по тем же формулам, что и в главе 1, с заменой, где необходимо,  $T_0$  и  $p_0$  на  $T_k(T_s)$  и  $p_k(p_s)$ .

### 3. ПОСТРОЕНИЕ ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЫ

#### 3.1. Общие положения

Индикаторная диаграмма строится в координатах  $p-V$ . Индикаторная диаграмма двигателя внутреннего сгорания строится на основании теплового расчета.

В начале построения на оси абсцисс откладывают отрезок АВ (рис. 3.1), соответствующий рабочему объему цилиндра, а по величине равный ходу поршня в масштабе  $m_s$ , который в зависимости от величины хода поршня проектируемого двигателя может быть принят 1:1, 1,5:1 или 2:1. Отрезок ОА, соответствующий объему сжатия, определяется из соотношения

$$OA = \frac{AB}{\varepsilon - 1}.$$

Отрезок  $z'z$  для газодизеля определяется по уравнению

$$z'z = 0A(\rho - 1).$$

При построении диаграммы рекомендуется выбирать масштабы давлений  $m_p = 0,02; 0,025; 0,04; 0,05; 0,07; 0,10$  МПа/мм так, чтобы получить высоту диаграммы, равную 1,2–1,7 ее основания.

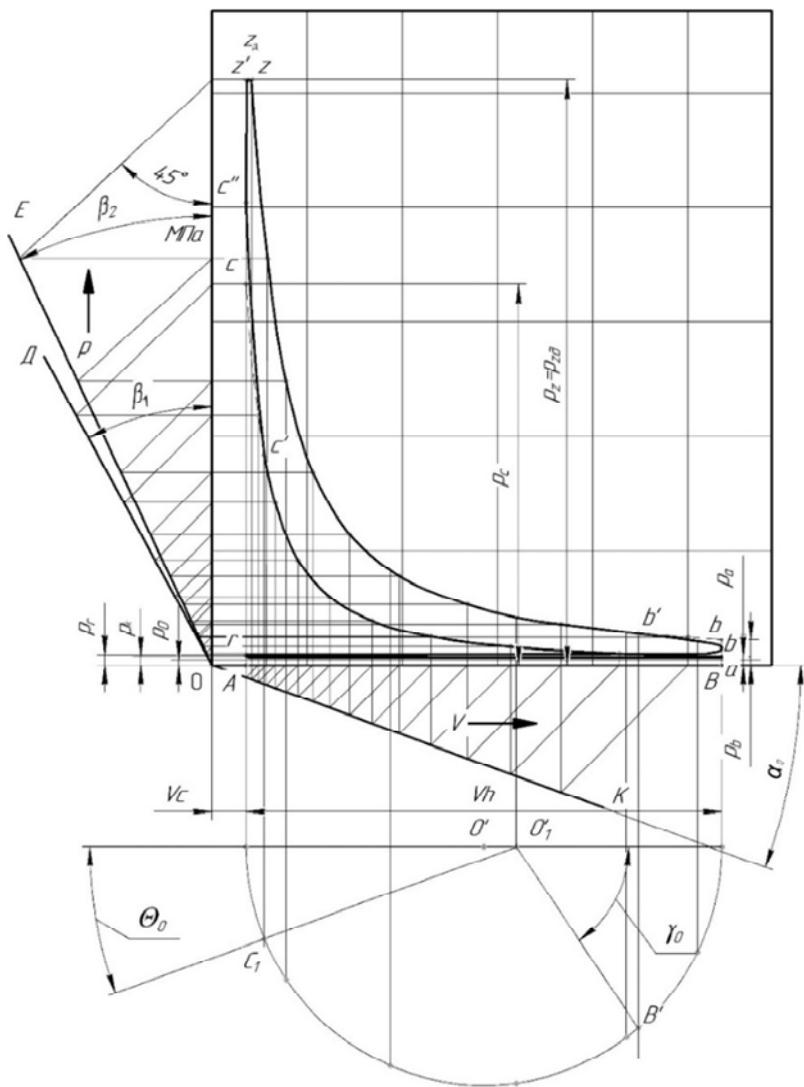


Рис. 3.1. Индикаторная диаграмма газодизельного двигателя

Затем по данным теплового расчета на диаграмме откладывают в выбранном масштабе величины давлений в характерных точках  $a$ ,  $c$ ,  $z'$ ,  $z$ ,  $b$ ,  $r$ .

Политропы сжатия и расширения могут быть построены аналитическим или графическим методом.

При аналитическом методе построения политроп сжатия и расширения вычисляется ряд точек для промежуточных объемов, расположенных между  $V_c$  и  $V_a$  и между  $V_{z'}$  и  $V_b$  по уравнению политропы

$$pV^{n_{1(2)}} = \text{const.}$$

Для политропы сжатия

$$p_x = p_a \left( \frac{V_a}{V_x} \right)^{n_1}.$$

Отношение  $V_a / V_x$  изменяется в интервале  $1 - \varepsilon$ .

Для политропы расширения

$$p_x = p_b \left( \frac{V_b}{V_x} \right)^{n_2}.$$

Далее соединяем точки  $a$  и  $c$  плавной кривой, проходящей через вычисленные и нанесенные на поле диаграммы точки политропы сжатия, а точки  $z'$  и  $b$  – кривой, проходящей через точки политропы расширения.

При графическом методе по наиболее распространенному способу Брауэра политропы сжатия и расширения строят следующим образом.

Из начала координат проводят луч  $OK$  под произвольным углом  $\alpha_0$  к оси абсцисс (рекомендуется принимать  $\alpha_0 = 15-20^\circ$ ). Далее из начала координат проводят лучи  $OD$  и  $OE$  под углами  $\beta_1$  и  $\beta_2$  к оси ординат. Эти углы определяются из следующих соотношений:

$$\operatorname{tg}\beta_1 = (1 + \operatorname{tg}\alpha_0)^{n_1} - 1;$$

$$\operatorname{tg}\beta_2 = (1 + \operatorname{tg}\alpha_0)^{n_2} - 1.$$

При построении политропы сжатия из точки  $c$  проводят горизонталь до пересечения с осью ординат; из точки пересечения – линию под углом  $45^\circ$  к вертикали до пересечения с лучом  $0D$ , а из этой точки – вторую горизонтальную линию, параллельную оси абсцисс.

Затем из точки  $c$  проводят вертикальную линию до пересечения с лучом  $0K$ . Из этой точки пересечения под углом  $45^\circ$  к вертикали проводят линию до пересечения с осью абсцисс, а из этой точки – вторую вертикальную линию, параллельную оси ординат, до пересечения со второй горизонтальной линией. Точка пересечения этих линий будет промежуточной точкой  $1$  политропы сжатия. Точку  $2$  и далее находят аналогично, принимая предыдущую точку за начало построения.

Политропу расширения строят с помощью лучей  $0K$  и  $0E$ , начиная от точки  $z'$ , аналогично построению политропы сжатия. Критерием правильности построения политропы расширения является приход ее в ранее нанесенную точку  $b$ .

После построения политропы сжатия и расширения производят скругление индикаторной диаграммы с учетом предвращения открытия выпускного клапана, опережения начала впрыска дизельного топлива и скорости нарастания давления, а также наносят линии впуска и выпуска. Для этой цели под осью абсцисс на длине хода поршня  $S$  как на диаметре проводят полуокружность радиусом  $R = S/2$ . Из геометрического центра  $O$  в сторону (нижней мертвой точки) н.м.т. откладывается отрезок

$$OO' = \frac{R^2}{2L} = \frac{R\lambda}{2},$$

где  $L$  – длина шатуна (выбирается по прототипу).

Величина  $OO'$  представляет собой поправку Брикса. Из точки  $O'$  под углом  $\gamma_0$ , соответствующим предварению открытия выпускного клапана, проводят луч  $O'B'$  ( $\gamma_0 = 40\text{--}65^\circ$  до н.м.т.). Полученную точку  $B'$ , соответствующую началу открытия выпускного клапана, сносят на политропу расширения (точка  $b'$ ).

Луч  $O'C'$  проводят под углом  $\theta_0$ , соответствующим углу опережения начала впрыска дизельного топлива ( $\theta_0 = 6\text{--}30$  град. ПКВ до верхней мертвой точки (в.м.т.)). Полученную точку  $C'$  сносят на политропу сжатия, получая точку  $c'$ .

Скругление диаграммы на участке процесса сгорания производится следующим образом. На линии в.м.т. находят точку  $c''$  из соотношения  $p_{c''} = (1,15\text{--}1,25)p_c$ . Затем проводят плавную кривую  $c'c''$  изменения давления сжатия в связи с опережением начала впрыска.

Далее из точки  $c''$  проводят плавную кривую до точки  $z_d$  – середины отрезка  $z'z$ ; из точки  $z_d$  – кривую с плавным переходом в линию расширения.

Скругление диаграммы на участке процесса расширения производится следующим образом. Находят точку  $b''$ , которую можно считать серединой отрезка  $ba$ , и проводят плавную кривую  $b'b''$  изменения линии расширения в связи с предварением открытия выпускного клапана.

Далее проводят линии впуска и выпуска, скругляя их в районе ранее нанесенной точки  $r$ , и скругляя линию выпуска в районе точки  $b''$ .

В индикаторной диаграмме двигателя с наддувом линия впуска может быть выше линии выпуска.

В результате указанных построений получается действительная индикаторная диаграмма.

### 3.2. Перестроение индикаторной диаграммы в координаты $p - \varphi$

Развертку индикаторной диаграммы в координаты  $p - \varphi$  рекомендуется выполнять справа от индикаторной диаграммы (рис. 3.2). Ось абсцисс развернутой индикаторной диаграммы располагают по горизонтали на уровне линии  $p_0$  индикаторной диаграммы. Развернутая диаграмма строится в пределах (0–720) град. ПКВ. Она делится на 24 равных участка, которые соответствуют определенному углу поворота коленчатого вала. Каждая точка на линии абсцисс должна быть пронумерована (0, 30, 60 град. ПКВ). По наиболее распространенному способу Ф. А. Брикса дальнейшее перестроение индикаторной диаграммы ведется следующим образом.

Из центра  $O$  проводят окружность радиусом кривошипа. Затем ее необходимо разделить вспомогательными лучами из центра  $O$  на шесть равных частей, а затем из центра Брикса (точки  $O'$ ) провести линии, параллельные вспомогательным лучам, до пересечения с полуокружностью.

Вновь полученные точки на полуокружности соответствуют определенным углам  $\varphi$ . Из этих точек проводят вертикали до пересечения с соответствующими линиями индикаторной диаграммы. Развертку индикаторной диаграммы следует начинать, принимая за начало координат положение поршня в в.м.т. в начале такта впуска. Отмеченные на индикаторной диаграмме давления  $p$  для каждого значения угла  $\varphi$ , проводя горизонтальные линии, переносят на развернутую диаграмму. Соединяя точки на развернутой диаграмме плавной кривой получают зависимость  $p - \varphi$ .

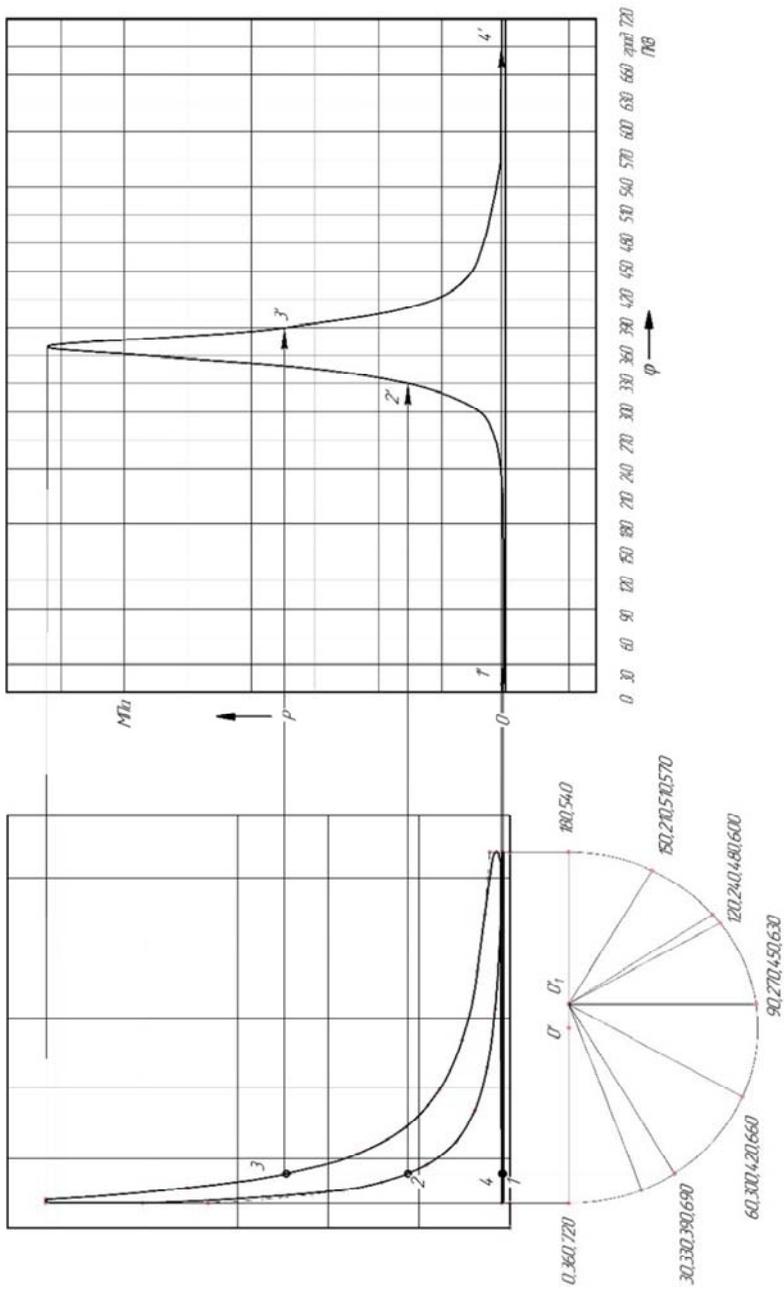


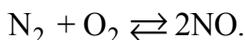
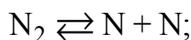
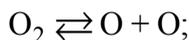
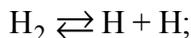
Рис. 3.2. Порядок развертки индикаторной диаграммы

#### 4. РАСЧЕТ РАВНОВЕСНОГО СОСТАВА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Данная методика предназначена для расчета концентраций 11 равновесных продуктов сгорания смесей паров топлива с воздухом при известных значениях коэффициента избытка воздуха, температуры и давления. Такая методика необходима при относительно точном расчете параметров процесса сгорания, особенно при выполнении расчетов по выявлению концентраций основных токсичных компонентов отработанных газов (СО и NO).

Предполагается, что в рассматриваемой системе процесс горения полностью завершен, установлено химическое равновесие и продукты сгорания ведут себя как идеальные газы. В таком случае законы сохранения вещества, действующих масс и Дальтона полностью определяют состояние системы.

Химическое равновесие между образующимися компонентами после завершения процесса сгорания устанавливаются по следующим реакциям:



В приведенных реакциях содержится 11 компонентов, которые в значительных количествах образуются после завер-

шения реакций сгорания топлива:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2$  и  $\text{N}$ . Для определения их концентраций требуется составить 11 уравнений. С этой целью используют 4 уравнения материального баланса и 7 уравнений равновесия.

Уравнения материального баланса составляют по каждому элементу исходной смеси на основе неизменности числа атомов этих элементов в ходе реакции:

$$M_{\text{CO}_2} + M_{\text{CO}} = \frac{C}{12}(1 + \gamma_r);$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} + M_{\text{H}_2} + \frac{1}{2}M_{\text{H}} + \frac{1}{2}M_{\text{OH}} = \frac{H}{2}(1 + \gamma_r);$$

$$M_{\text{N}_2} + \frac{1}{2}M_{\text{NO}} + \frac{1}{2}M_{\text{N}} = 0,79\alpha L_0(1 + \gamma_r);$$

$$\begin{aligned} M_{\text{CO}_2} + M_{\text{O}_2} + \frac{1}{2}M_{\text{CO}} + \frac{1}{2}M_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{1}{2}M_{\text{O}} + \frac{1}{2}M_{\text{OH}} + \frac{1}{2}M_{\text{NO}} = \\ = \left( \frac{O}{32} + 0,21\alpha L_0 \right) (1 + \gamma_r). \end{aligned}$$

Уравнения равновесия, вытекающие из закона действующих масс, составляют по каждой реакции системы в следующем виде:

$$K_1 = \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}} \sqrt{M_{\text{O}_2}}} \left( \frac{P_z}{M_\Sigma} \right)^{-0,5};$$

$$K_2 = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2} \sqrt{M_{\text{O}_2}}} \left( \frac{P_z}{M_\Sigma} \right)^{-0,5};$$

$$K_3 = \frac{M_{H_2O}}{M_{OH} \sqrt{M_{H_2}}} \left( \frac{P_z}{M_\Sigma} \right)^{-0,5};$$

$$K_4 = \frac{M_H}{\sqrt{M_{H_2}}} \left( \frac{P_z}{M_\Sigma} \right)^{0,5};$$

$$K_5 = \frac{M_O}{\sqrt{M_{O_2}}} \left( \frac{P_z}{M_\Sigma} \right)^{0,5};$$

$$K_6 = \frac{M_{NO}}{\sqrt{M_{O_2} M_{N_2}}};$$

$$K_7 = \frac{M_N}{\sqrt{M_{N_2}}} \left( \frac{P_z}{M_\Sigma} \right)^{0,5}.$$

Константы равновесия можно рассчитать по следующим аппроксимирующим уравнениям в зависимости от температуры:

$$K_1 = 3,4447 \cdot 10^{-7} \cdot T_z^{0,6885} \cdot \exp\left(\frac{289322}{RT_z}\right);$$

$$K_2 = 24,142 \cdot 10^{-3} \cdot T_z^{-0,2421} \cdot \exp\left(\frac{247410}{RT_z}\right);$$

$$K_3 = 15,088 \cdot 10^{-4} \cdot T_z^{-0,1118} \cdot \exp\left(\frac{288568}{RT_z}\right);$$

$$K_4 = 13,1792 \cdot T_z^{0,4056} \cdot \exp\left(\frac{-218561}{RT_z}\right);$$

$$K_5 = 156,6265 \cdot T_z^{0,2126} \cdot \exp\left(\frac{-249964}{RT_z}\right);$$

$$K_6 = 6,0469 \cdot T_z^{-0,0322} \cdot \exp\left(\frac{-91235}{RT_z}\right);$$

$$K_7 = 79,8151 \cdot T_z^{0,2920} \cdot \exp\left(\frac{-475224}{RT_z}\right).$$

При  $\alpha < 1$  значения числа молей CO и H<sub>2</sub> необходимо уточнить по следующим формулам:

$$M'_{CO} = M_{CO} - \frac{2}{1+x} 0,21(1-\alpha)L_0;$$

$$M'_{H_2} = M_{H_2} - \frac{2x}{1+x} 0,21(1-\alpha)L_0.$$

где  $x = \frac{M_{H_2}}{M_{CO}}$  – величина, зависящая от отношения количества молекулярного водорода к окиси углерода, содержащихся в продуктах сгорания.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Двигатели внутреннего сгорания : учебник для вузов : в 3 кн. / В. Н. Луканин [и др.] ; под ред. В. Н. Луканина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 2005. – Кн. 1 : Теория рабочих процессов. – 479 с.

2. Колчин, А. И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей / А. И. Колчин, В. П. Демидов. – М. : Высшая школа, 2008.

3. Автомобильный справочник / пер. с англ. ООО «СтабСПб». – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : ООО «Книжное издательство “За рулем”», 2012. – 1280 с.

4. Кухаренок, Г. М. Теория рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания : методическое пособие для студентов заочной формы обучения специальности 1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания» / Г. М. Кухаренок. – Минск : БНТУ, 2011. – 62 с.

5. Мехтиев, Р. И. Методика, алгоритм и программа расчета равновесного состава продуктов сгорания топливозвоздушной смеси на ЭВМ: методическое указание для курсового и дипломного проектирования по курсу «Автотракторные двигатели» / Р. И. Мехтиев, Х. Б. Багиров. – Баку : Издание АЭПИ им. Ч. Ильдрыма, 1984. – 31 с.

Учебное издание

**ВЕРШИНА** Георгий Александрович  
**БЫСТРЕНКОВ** Олег Сергеевич

**ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ  
ГАЗОДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ  
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

Пособие для студентов специальности  
1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания»

Редактор *А. С. Кириллова*  
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 16.03.2020. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 2.03. Уч.-изд. л. 1.59. Тираж 200. Заказ 677.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.