

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

**Кафедра строительной техники и инженерной механики
им. д-ра техн. наук, профессора Н. А. Ульянова**

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН И КОМПЛЕКСОВ

*Методические указания
к выполнению курсовой работы
для обучающихся по направлениям подготовки
23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы»,
23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов»
и специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства»*

Воронеж 2020

УДК 621.8(07)
ББК 39.311-06-5я7

Составители:

В. А. Жулай, В. Л. Тюнин, Д. Н. Дегтев, Е. В. Кожакин

Энергетические установки транспортно-технологических машин и комплексов: методические указания к выполнению курсовой работы / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет; сост.: В. А. Жулай, В. Л. Тюнин., Д. Н. Дегтев, Е. В. Кожакин. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2020. – 27 с.

Методические указания содержат общие положения и последовательность построения индикаторной диаграммы и регуляторной характеристики двигателя внутреннего сгорания, а также справочные данные, необходимые для расчёта.

Предназначены для обучающихся по направлениям подготовки 23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» и специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства».

Ил. 4. Табл. 3. Библиогр. 8 назв.

УДК 621.8(07)
ББК 39.311-06-5я7

Рецензент - *В. Н. Геращенко, к.т. н., доцент кафедры строительной техники и инженерной механики ВГТУ*

*Печатается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение курсовой работы направлено на закрепление и углубление знаний по теории, расчету и конструированию двигателей внутреннего сгорания. Выполняя работу, студент должен усвоить основные зависимости между важнейшими эксплуатационными показателями двигателя и параметрами его конструкции.

Курсовая работа состоит из двух разделов. Основой первого раздела курсовой работы является тепловой расчет и построение индикаторной диаграммы двигателя. Второй раздел курсовой работы посвящён построению регуляторной характеристики двигателя, представляющей зависимость основных показателей двигателя (эффективная мощность, крутящий момент, часовой и удельный расходы топлива) от частоты вращения коленчатого вала.

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

Общие указания

Курсовая работа оформляется расчётно-пояснительной запиской на бумаге формата А4 и графиками на бумаге формата А1.

Основные разделы расчётно-пояснительной записки целесообразно изложить в следующем порядке:

Введение

Задание и исходные данные

Раздел 1. Тепловой расчёт и тепловой баланс двигателя

- 1.1. Параметры рабочего тела
- 1.2. Параметры окружающей среды и остаточные газы
- 1.3. Процесс впуска
- 1.4. Процесс сжатия
- 1.5. Процесс сгорания
- 1.6. Процесс расширения
- 1.7. Индикаторные параметры рабочего цикла
- 1.8. Эффективные показатели двигателя
- 1.9. Основные параметры цилиндра и двигателя
- 1.10. Построение индикаторной диаграммы дизеля
- 1.11. Тепловой баланс двигателя

Раздел 2. Построение регуляторной характеристики двигателя

- 2.1. Определение характерных точек регуляторной характеристики
- 2.2. Построение регуляторной характеристики двигателя

Библиографический список

При расчетах вначале следует записать формулу в общем виде и дать объяснения входящих в нее величин. Затем подставить цифровые значения и записать результат с указанием его размерности.

Исходные данные

1. Прототип двигателя.
2. Номинальная (максимальная) мощность двигателя.
3. Номинальная частота вращения коленчатого вала двигателя.
4. Число цилиндров.
5. Наличие наддува.
6. Степень сжатия.
7. Дополнительные данные (например, тактность, способ смесеобразования или форма камеры сгорания и т.д.).
8. Некоторые исходные данные принимаются по прототипу двигателя.

РАЗДЕЛ 1

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ И ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ДВИГАТЕЛЯ

1.1. Параметры рабочего тела

Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива (кг воздуха/кг топлива):

$$l_0 = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} C + 8H - O \right). \quad (1)$$

Химический состав топлива берется по табл. 1.

Действительное количество воздуха $L = \alpha L_0$ молей, где α – коэффициент избытка или недостатка воздуха ($\alpha = 1,4$ – для дизеля с наддувом и $\alpha = 1,7$ – для дизеля без наддува).

$$L_0 = \frac{1}{0,208} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right), \frac{\text{кмоль воздуха}}{\text{кг топлива}}. \quad (2)$$

Таблица 1

Химический состав топлива

Жидкое топливо	Содержание, кг		
	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>O</i>
Дизельное топливо	0,870	0,126	0,004

При полном сгорании топлива ($\alpha \geq 1$) продукты сгорания состоят из углекислого газа CO_2 , водяного пара H_2O , избыточного кислорода O_2 и азота N_2 .

Количество отдельных компонентов продуктов сгорания жидкого топлива при $\alpha \geq 1$:

- углекислого газа (кмоль CO_2 / кг топл.)

$$M_{CO_2} = C / 12; \quad (3)$$

- водяного пара (кмоль H_2O / кг топл.)

$$M_{H_2O} = H / 2; \quad (4)$$

- кислорода (кмоль O_2 / кг топл.)

$$M_{O_2} = 0,208(\alpha - 1)L_0; \quad (5)$$

- азота (кмоль N_2 / кг топл.)

$$M_{N_2} = 0,792\alpha L_0. \quad (6)$$

Общее количество продуктов сгорания:

$$M_2 = M_{CO_2} + M_{H_2O} + M_{O_2} + M_{N_2}. \quad (7)$$

1.2. Параметры окружающей среды и остаточные газы

При работе двигателя без наддува в цилиндр поступает воздух из атмосферы. В этом случае при расчете рабочего цикла двигателя давление окружающей среды принимается равным $p_0 = 0,1$ МПа, а температура – $T_0 = T_K = 293$ К.

Давление окружающей среды (МПа):

– для дизелей без наддува $p_k = p_0$,

– с наддувом $p_k = 1,5P_0$ (при низком давлении), $p_k = (1,5...2,2)p_0$ (при среднем давлении), $p_k = (2,2...2,5)p_0$ (при высоком давлении).

Температура окружающей среды (К):

– для дизелей без наддува $T_k = T_0$,

– для дизелей с наддувом

$$T_k = T_0 (p_k / p_0)^{(n_k - 1) / n_k}, \quad (8)$$

где n_k – показатель политропы сжатия, $n_k = 1,65$.

Давление остаточных газов устанавливается в зависимости от числа и расположения клапанов, сопротивлений впускного и выпускного трактов, фаз газораспределения, характера наддува, быстроходности двигателя, нагрузки, системы охлаждения и других факторов. Для автомобильных и тракторных

двигателей без наддува, а также с наддувом и выпуском в атмосферу давление остаточных газов (МПа):

– для двигателей без наддува

$$p_r = (1,05 \dots 1,25) p_0. \quad (9)$$

– для двигателя с наддувом

$$p_r = (0,75 \dots 0,98) p_k, \quad (10)$$

Температура остаточных газов

Принимается в зависимости от типа двигателя, степени сжатия, частоты вращения и коэффициента избытка воздуха, устанавливается значение температуры T_r остаточных газов в пределах.

Для дизелей принимается: $T_r = 600 \dots 700$ К.

1.3. Процесс впуска

Потери давления на впуске в двигателе (МПа):

$$\Delta p_a = (\beta^2 + \xi_{вп}) (\omega_{вп}^2 / 2) p_k \cdot 10^{-6}, \quad (11)$$

где β – коэффициент затухания скорости движения заряда в рассматриваемом сечении цилиндра; $\xi_{вп}$ – коэффициент сопротивления впускной системы, отнесенной к наиболее узкому ее сечению; $\omega_{вп}$ – средняя скорость движения заряда в наименьшем сечении впускной системы; $p_k = p_0$ – без наддува.

По опытным данным в современных автомобильных двигателях на номинальном режиме $(\beta^2 + \xi_{вп}) = 2,5 \dots 4,0$ и $\omega_{вп} = 50 \dots 130$ м/с.

Давление в конце впуска – основной фактор, определяющий количество рабочего тела, поступающего в цилиндр двигателя (МПа):

$$p_a = p_k - \Delta p_a. \quad (12)$$

Коэффициент остаточных газов

Коэффициент остаточных газов γ_r характеризует качество очистки цилиндра от продуктов сгорания:

$$\gamma_r = \frac{T_k + \Delta T}{T_r} \frac{p_r}{\varepsilon p_a - p_r}. \quad (13)$$

где ΔT – температура подогрева свежего заряда,

$\Delta T = 0 \dots 20$ – для бензиновых двигателей,

$\Delta T = 10 \dots 40$ – для дизельных двигателей без наддува,

$\Delta T = 5 \dots 10$ – для дизельных с наддувом.

Температура в конце впуска (К):

$$T_a = \frac{T_k + \Delta T + \gamma_r T_r}{1 + \gamma_r}. \quad (14)$$

Коэффициент наполнения:

$$\eta_v = \frac{T_k (\varepsilon p_a - p_r)}{(T_k + \Delta T) (\varepsilon - 1) p_k}. \quad (15)$$

где ε – степень сжатия двигателя.

1.4. Процесс сжатия

Средние показатели адиабаты и политропы сжатия. При работе дизеля на номинальном режиме можно с достаточной степенью точности принять показатель политропы сжатия приблизительно равным показателю адиабаты $\kappa_1 = n_1$, который определяется по номограмме (рис. 1).

Давление (МПа) и температура (К) в конце сжатия:

$$\begin{aligned} p_c &= p_a \varepsilon^{n_1}, \\ T_c &= T_a \varepsilon^{n_1 - 1}. \end{aligned} \quad (16)$$

Средняя молярная теплоемкость в конце сжатия (кДж/кмоль·град):

а) воздуха

$$(mc_v)_{t_0}^{t_c} = 20,6 + 2,638 \cdot 10^{-3} \cdot t_c, \quad (17)$$

где $t_c = T_c - 273$, °С;

б) остаточных газов $(mc_v'')_{t_0}^{t_c}$ (определяется по табл. 2 методом интерполяции).

в) рабочей смеси

$$(mc_v')_{t_0}^{t_c} = \frac{1}{1 + \gamma_r} \left[(mc_v)_{t_0}^{t_c} + \gamma_r (mc_v'')_{t_0}^{t_c} \right]. \quad (18)$$

1.5. Процесс сгорания

Коэффициент молекулярного изменения свежей горючей смеси.

$$\mu_0 = M_2 / M_1, \quad (19)$$

где M_1 – количество свежего заряда,

$$M_1 = \alpha L_0. \quad (20)$$

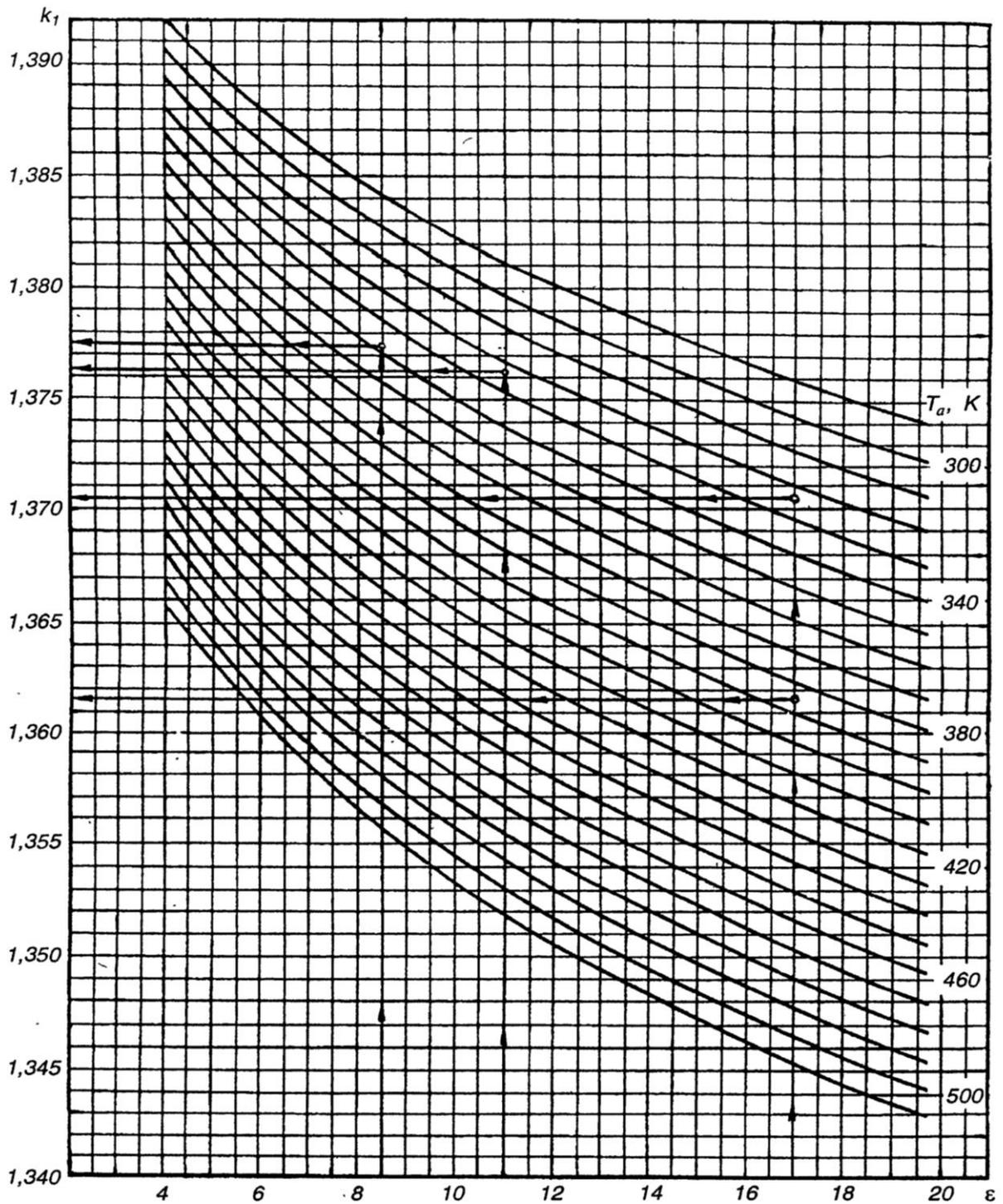


Рис. 1. Номограмма для определения показателя адиабаты сжатия k_1

Коэффициент молекулярного изменения рабочей смеси в дизелях.

$$\mu = \frac{\mu_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r} \quad (21)$$

Средняя мольная теплоёмкость продуктов сгорания

Температура, °С	Средняя мольная теплоёмкость продуктов сгорания, кДж/(кмоль · град), дизельного топлива при α											
	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6
0	22,184	22,061	21,958	21,870	21,794	21,728	21,670	21,572	21,493	21,428	21,374	21,328
100	22,545	22,398	22,275	22,169	22,078	21,999	21,929	21,812	21,717	21,640	21,574	21,519
200	22,908	22,742	22,602	22,482	22,379	22,289	22,210	22,077	21,970	21,882	21,808	21,745
300	23,324	23,142	22,989	22,858	22,745	22,647	22,560	22,415	22,300	22,202	22,121	22,052
400	23,750	23,554	23,390	23,249	23,128	23,022	22,930	22,774	22,648	22,544	22,457	22,384
500	24,192	23,985	23,811	23,662	23,533	23,421	23,322	23,157	23,023	22,914	22,822	22,743
600	24,631	24,413	24,229	24,073	23,937	23,819	23,716	23,541	23,401	23,285	23,188	23,106
700	25,069	24,840	24,648	24,484	24,342	24,218	24,109	23,927	23,780	23,659	23,557	23,471
800	25,490	25,251	25,050	24,879	24,731	24,602	24,488	24,298	24,144	24,018	23,912	23,822
900	25,896	25,648	25,439	25,261	25,107	24,973	24,855	24,657	24,487	24,366	24,256	24,162
1000	26,278	26,021	25,804	25,620	25,460	25,321	25,199	24,993	24,828	24,692	24,578	24,481
1100	26,641	26,375	26,151	25,960	25,795	25,652	25,525	25,313	25,142	25,001	24,883	24,783
1200	26,987	26,713	26,482	26,286	26,116	25,967	25,837	25,618	25,442	25,296	25,175	25,071
1300	27,311	27,029	26,792	26,589	26,415	26,262	26,128	25,903	25,722	25,572	25,447	25,341
1400	27,618	27,328	27,085	26,877	26,698	26,541	26,404	26,173	25,986	25,833	25,705	25,596
1500	27,907	27,610	27,361	27,148	26,965	26,805	26,664	26,427	26,237	26,080	25,948	25,836
1600	28,175	27,873	27,618	27,400	27,212	27,049	26,905	26,663	26,468	26,308	26,173	26,059
1700	28,432	28,123	27,863	27,641	27,449	27,282	27,135	26,888	26,690	26,526	26,389	26,272
1800	28,669	28,354	28,089	27,863	27,668	27,497	27,348	27,096	26,894	26,727	26,587	26,469
1900	28,895	28,575	28,305	28,076	27,877	27,704	27,552	27,296	27,090	26,921	26,781	26,658
2000	29,107	28,782	28,508	28,275	28,073	27,898	27,743	27,483	27,274	27,102	26,958	26,835
2100	29,310	28,980	28,703	28,466	28,262	28,083	27,926	27,663	27,451	27,276	27,130	27,005
2200	29,503	29,169	28,888	28,648	28,441	28,260	28,101	27,834	27,619	27,442	27,294	27,168
2300	29,680	29,342	29,057	28,815	28,605	28,422	28,261	27,991	27,774	27,595	27,444	27,317
2400	29,851	29,510	29,222	28,976	28,764	28,580	28,471	28,144	27,924	27,743	27,591	27,462
2500	30,011	29,666	29,375	29,127	28,913	28,726	28,562	28,286	28,064	27,881	27,728	27,598
2600	30,164	29,816	29,523	29,272	29,056	28,868	28,702	28,424	28,199	28,015	27,860	27,729
2700	30,311	29,960	29,664	29,412	29,194	29,004	28,837	28,557	28,331	28,144	27,988	27,856
2800	30,451	30,097	29,799	29,546	29,326	29,135	28,966	28,684	28,456	28,269	28,111	27,978

Теплота сгорания рабочей смеси в дизелях (кДж/кмоль раб. см.):

$$H_{РАБ.СМ} = H_u [M_1 (1 + \gamma_r)], \quad (22)$$

где H_u – низшая теплота сгорания топлива (для дизелей $H_u = 42440$ кДж/кг).

Средняя молярная теплоемкость продуктов сгорания:

$$\left\{ \begin{aligned} (mc''_V)_{t_0}^{t_z} &= \frac{1}{M_2} \left[M_{CO_2} (mc''_{VCO_2})_{t_0}^{t_z} + M_{H_2O} (mc''_{VH_2O})_{t_0}^{t_z} + \right. \\ &\left. + M_{O_2} (mc''_{VO_2})_{t_0}^{t_z} + M_{N_2} (mc''_{VN_2})_{t_0}^{t_z} \right], \\ (mc''_P)_{t_0}^{t_z} &= (mc''_V)_{t_0}^{t_z} + 8,315. \end{aligned} \right. \quad (23)$$

Формулы для определения средних молярных теплоемкостей отдельных газов при постоянном объеме, кДж/(кмоль·град), для температур t_z , °С:

- углекислый газ CO_2 : $(mc''_{VCO_2})_{t_0}^{t_z} = 39,123 + 0,003349t_z$;
- водяной пар H_2O : $(mc''_{VH_2O})_{t_0}^{t_z} = 26,670 + 0,004438t_z$;
- кислород O_2 : $(mc''_{VO_2})_{t_0}^{t_z} = 23,723 + 0,001550t_z$;
- азот N_2 : $(mc''_{VN_2})_{t_0}^{t_z} = 21,951 + 0,001457t_z$.

Температура в конце видимого процесса сгорания:

$$\xi_Z H_{РАБ.СМ} + \left[(mc'_V)_{t_0}^{t_c} + 8,315\lambda \right] t_c + 2270(\lambda - \mu) = \mu (mc''_P)_{t_0}^{t_z} t_z, \quad (24)$$

где ξ_Z – коэффициент использования теплоты: для дизеля без наддува $\xi_Z = 0,82$, с наддувом $\xi_Z = 0,86$; λ – степень повышения давления: для дизеля без наддува $\lambda = 2,0$, с наддувом $\lambda = 1,5$.

После подстановки значений и преобразования выражение (24) представим в виде:

$$At_z^2 + Bt_z + C = 0,$$

откуда находим

$$t_z = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}. \quad (25)$$

$$T_z = t_z + 273 \text{ К}. \quad (26)$$

Максимальное давление сгорания для дизелей (МПа):

$$p_z = \lambda p_c. \quad (27)$$

Степень предварительного расширения для дизелей:

$$\rho = \frac{\mu T_z}{\lambda T_c}. \quad (28)$$

1.6. Процесс расширения

Степень последующего расширения для дизелей:

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\rho}. \quad (29)$$

Средние показатели адиабаты и политропы расширения для дизелей выбираются следующим образом. На номинальном режиме можно принять показатель политропы расширения n_2 с учётом достаточно больших размеров цилиндра, несколько меньше (на 0,5...1 %) показателя адиабаты расширения κ_2 , который определяется по номограмме (рис. 2).

Давление (МПа) и температура (К) в конце расширения для дизелей.

$$p_b = p_z / \delta^{n_2}, \quad (30)$$

$$T_b = T_z / \delta^{n_2-1}. \quad (31)$$

Проверка ранее принятой температуры остаточных газов для дизелей:

$$T_r = \frac{T_b}{\sqrt[3]{p_b / P_r}}, \quad (32)$$

$$\Delta = \frac{T_r - T_{r \text{ задан.}}}{T_r} \cdot 100.$$

1.7. Индикаторные параметры рабочего цикла

Теоретическое среднее индикаторное давление (МПа):

$$p'_i = \frac{p_c}{\varepsilon - 1} \left[\lambda(\rho - 1) + \frac{\lambda\rho}{n_2 - 1} \left(1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}} \right) - \frac{1}{n_1 - 1} \left(1 - \frac{1}{\delta^{n_1-1}} \right) \right]. \quad (33)$$

Среднее индикаторное давление для дизелей (МПа):

$$p_i = \varphi_H p'_i, \quad (34)$$

где φ_H – коэффициент полноты диаграммы, принят $\varphi_H = 0,95$.

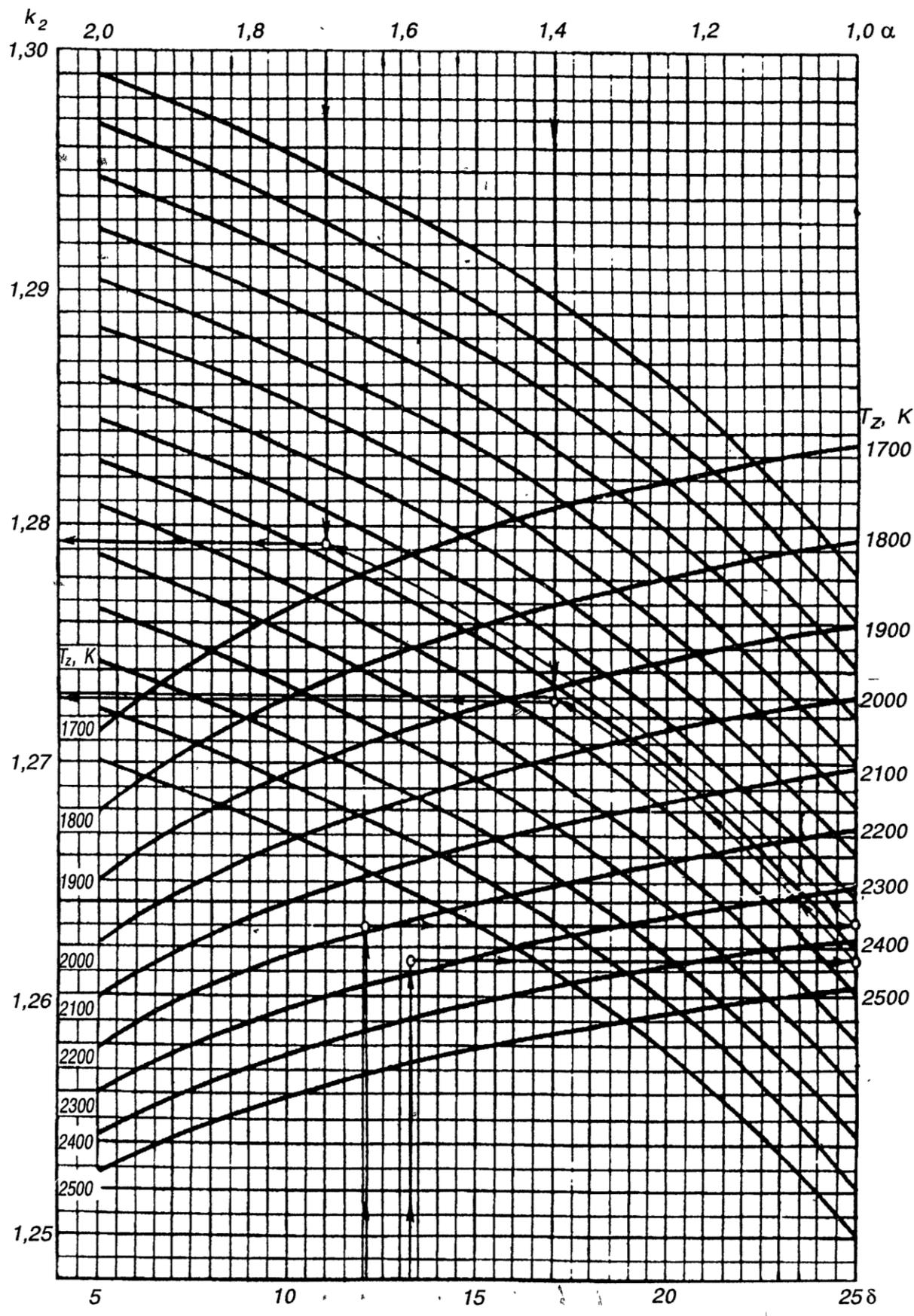


Рис. 2. Номограмма для определения показателя адиабаты расширения k_2

Индикаторный КПД

Индикаторный КПД характеризует степень использования в действительном цикле теплоты топлива для получения полезной работы и представляет собой отношение теплоты, эквивалентной индикаторной работе цикла, ко всему количеству теплоты, внесенной в цилиндр с топливом:

$$\eta_i = \frac{p_i l_0 \alpha}{H_u \rho_k \eta_V}, \quad (35)$$

где p_i выражено в МПа; l_0 – в кг/кг топл.; H_u – в МДж/кг топл.; ρ_k – плотность заряда на впуске, $\rho_k = P_k 10^6 / (R_B T_k)$ – в кг/м³, R_B – удельная газовая постоянная для воздуха, $R_B = 287$ Дж/(кг·град).

Индикаторный удельный расход (г/кВт·ч) для дизелей:

$$g_i = \frac{3600}{H_u \eta_i}. \quad (36)$$

1.8. Эффективные показатели двигателя

Среднее давление механических потерь (МПа):

$$p_M = 0,089 + 0,0118 v_{П.СР}, \quad (37)$$

где $v_{П.СР}$ – средняя скорость поршня предварительно принята $v_{П.СР} = 10,2$ м/с.

Среднее эффективное давление (МПа) и механический КПД для дизелей.

Среднее эффективное давление p_e представляет собой отношение эффективной работы на валу двигателя к единице рабочего объема цилиндра.

$$p_e = p_i - p_M. \quad (38)$$

$$\eta_M = p_e / p_i. \quad (39)$$

Эффективный КПД и эффективный удельный расход топлива (г/кВт·ч) для дизелей:

$$\eta_e = \eta_i \eta_M. \quad (40)$$

$$g_i = \frac{3600}{H_u \eta_e}. \quad (41)$$

1.9. Основные параметры цилиндра и двигателя

По эффективной мощности, частоте вращения коленчатого вала и эффективному давлению определяется литраж (л) двигателя:

$$V_{\text{л}} = \frac{30\tau N_e}{p_e n_H}, \quad (42)$$

где N_e – эффективная (номинальная) мощность двигателя, кВт; p_e выражено в МПа; n_H – номинальная частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹; τ – число тактов (для 4-тактного двигателя $\tau = 4$, для 2-тактного двигателя $\tau = 2$).

Рабочий объем цилиндра (л):

$$V_h = V_{\text{л}} / i, \quad (43)$$

где i – количество цилиндров.

Диаметр цилиндра (мм):

$$D = 100 \sqrt[3]{\frac{4V_h}{\pi(S/D)}}. \quad (44)$$

где S/D – отношение хода поршня к диаметру цилиндра принимаем $S/D = 1$.

Полученный диаметр округляем до ближайшего целого круглого числа.

По окончательно принятым значениям D и S определяются основные параметры и показатели двигателя:

– литраж двигателя:

$$V_{\text{л}} = \frac{\pi D^2 S i}{4 \cdot 10^6}, \quad (45)$$

– площадь поршня (см²):

$$F_{\text{п}} = \frac{\pi D^2}{4}, \quad (46)$$

– средняя скорость поршня (м/с):

$$v_{\text{п.ср}} = \frac{S n_H}{3 \cdot 10^4}, \quad (47)$$

– эффективная мощность (кВт):

$$N_e = \frac{p_e V_{\text{л}} n_H}{30\tau}, \quad (48)$$

– эффективный крутящий момент (Н·м):

$$M_e = \frac{3 \cdot 10^4 \cdot N_e}{\pi n_H}, \quad (49)$$

– часовой расход топлива (кг/ч):

$$G_T = \frac{N_e g_e}{1000}, \quad (50)$$

где g_e – удельный расход топлива (г/кВт·ч).

– литровая мощность двигателя (кВт):

$$N_L = N_e / V_L. \quad (51)$$

1.10. Построение индикаторной диаграммы дизеля

Выбираем масштабы диаграммы (рис. 3):

масштаб хода поршня:

$$M_S = \frac{\text{значение хода поршня, мм}}{\text{максимальное расстояние на графике, мм}},$$

масштаб давлений

$$M_P = \frac{\text{максимальное значение давления, МПа}}{\text{максимальное расстояние на графике, мм}}.$$

Масштаб следует выбирать таким образом, чтобы высота диаграммы была приблизительно в 1,5 раза больше её основания.

После нанесения координатных осей проведём линию абсолютного давления окружающей среды на расстоянии OK от оси абсцисс, причём $OK = p_0 / M_P$.

Параллельно оси давления на расстоянии OA от начала координат проведём линию, определяющую положение поршня в верхней мёртвой точке (ВМТ). $S_C = S / (\varepsilon - 1)$, $OA = S_C / M_S$.

От точки A отложим отрезок AB , эквивалентный ходу поршня S , $AB = S / M_S$.

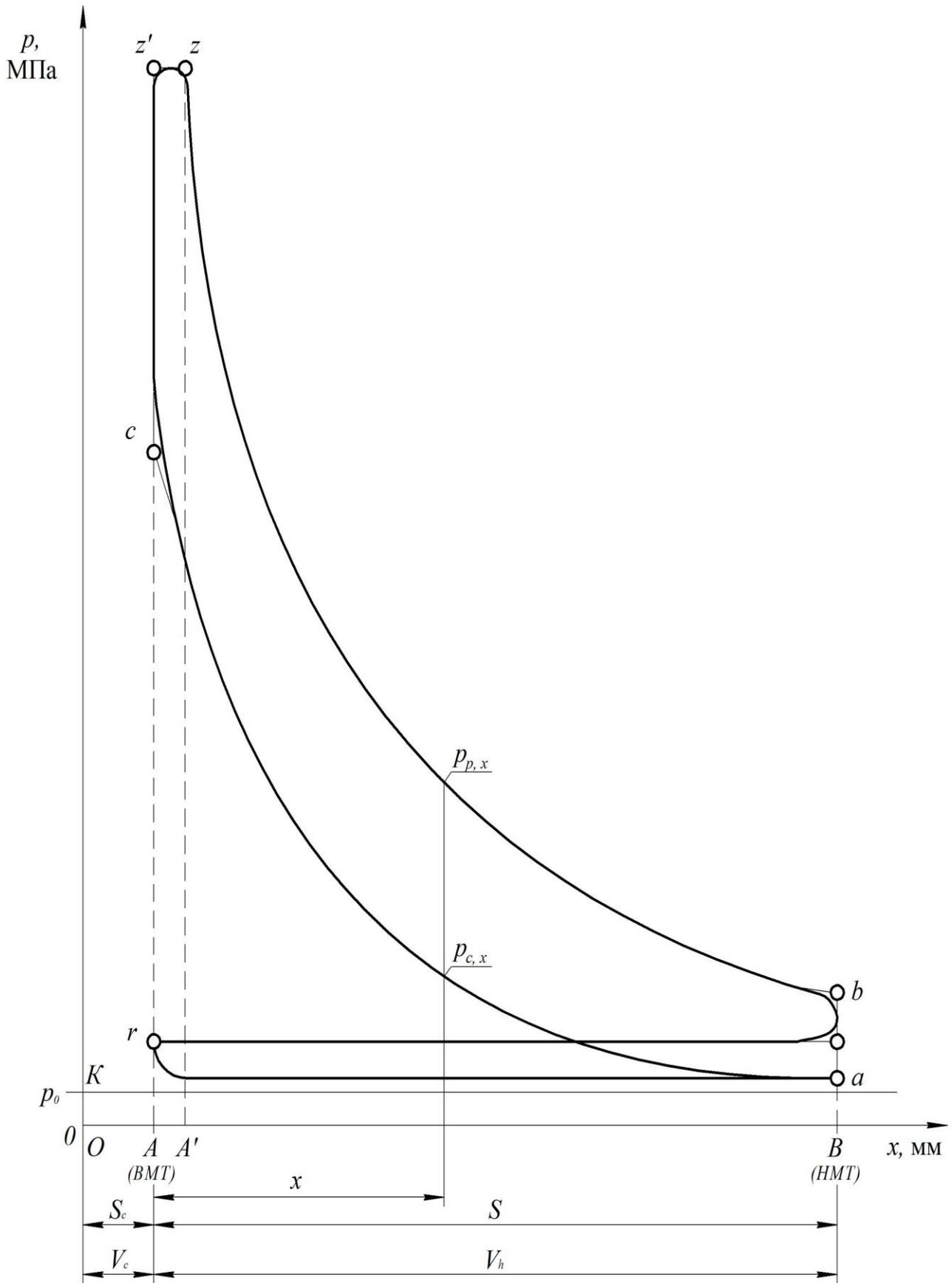


Рис. 3. Индикаторная диаграммы двигателя

Через точку B , определяющую положение поршня в нижней мёртвой точке (НМТ), проведём параллельно оси давления вертикальную линию.

От точки O откладываем отрезок OA' , эквивалентный объёму цилиндра после предварительного расширения $OA' = \rho \cdot OA$. Через точку A' проведём штриховую линию, параллельную оси ординат, на которой располагается точка z' .

Характерные точки индикаторной диаграммы. По линии ВМТ отложим точки z, c, r , соответствующие давлениям p_z, p_c, p_r , на следующих расстояниях, мм: $Az = p_z/M_p, Ac = p_c/M_p, Ar = p_r/M_p$. По линии НМТ отложим точки a, b , соответствующие давлениям p_a, p_b , на следующих расстояниях, мм: $Ba = p_a/M_p, Bb = p_b/M_p$.

Отрезок $A'B$ примерно разбивается на 10 равных частей. При построении теоретической индикаторной диаграммы рабочего цикла ординаты промежуточных точек при перемещении поршня от ВМТ на расстояние x для процессов сжатия и расширения определяются по следующим формулам (МПа):

– для процесса сжатия:

$$p_{c,x} = p_a \left(\frac{S_a}{S_c + x} \right)^{n_1} = Ba \left(\frac{OB}{Ox} \right)^{n_1}, \quad (52)$$

– для процесса расширения:

$$p_{p,x} = p_b \left(\frac{S_a}{S_c + x} \right)^{n_2} = Bb \left(\frac{OB}{Ox} \right)^{n_2}. \quad (53)$$

Полученные расчётные точки политроп сжатия и расширения последовательно соединяем между собой. Точки a и b, z' и c , а также z' и z соединяют прямой линией. При этом процессы газообмена условно считают изобарными (т.е. при постоянном давлении), поэтому через точки a и r проводят прямую, параллельную оси абсцисс.

Действительная индикаторная диаграмма (толстая линия) будет отличаться от построенной «округленностью» в точках c, z', z, b .

«Скругление» диаграммы объясняется: в точке c – началом горения заряда до прихода поршня в верхнее мертвое положение в результате опережения подачи

топлива или зажигания; в точках z' и z – немгновенностью вспышки и догоранием; в точке b – опережением открытия выпускного клапана.

1.11. Тепловой баланс двигателя

Общее количество теплоты, введённой в двигатель с топливом (Дж/с):

$$Q_0 = \frac{H_u G_T}{3,6}. \quad (54)$$

Теплота, эквивалентная эффективной работе за 1 с (Дж/с):

$$Q_e = 1000 \cdot N_e. \quad (55)$$

Теплота, передаваемая охлаждающей среде (Дж/с):

$$Q_B = C i D^{1+2m} n_H^m (1 / \alpha), \quad (56)$$

где C – коэффициент пропорциональности (для четырёхтактных двигателей, $C = 0,45 \dots 0,53$); i – число цилиндров; D – диаметр цилиндра, см; m – показатель степени (для четырёхтактных двигателей $m = 0,6 \dots 0,7$); n – номинальная частота вращения коленчатого вала двигателя, мин^{-1} .

Теплота, унесённая с отработавшими газами (в дизеле с наддувом часть теплоты отработавших газов используется в газовой турбине) (Дж/с):

$$Q_G = (G_T / 3,6) \left[M_2 (m c_p'')_{t_0}^{t_G} t_G - M_1 (m c_p)_{t_0}^{t_K} t_K \right], \quad (57)$$

где $(m c_p'')_{t_0}^{t_G} = (m c_v'')_{t_0}^{t_G} + 8,315$, кДж/(кмоль·град); значение $(m c_v'')_{t_0}^{t_G}$ определяется по табл. 2; $t_G = T_G - 273$, °С; значение $(m c_p)_{t_0}^{t_K}$ определяется по табл. 3, графа «Воздух»; $t_K = T_K - 273$, °С.

Неучтённые потери теплоты:

$$Q_{ocm} = Q_0 - (Q_e + Q_B + Q_G). \quad (58)$$

Составляющие теплового баланса записываются в процентах от общего количества теплоты, введённой в двигатель с топливом.

Средняя молярная теплоёмкость отдельных газов при постоянном объёме

Температура, °С	Средняя молярная теплоёмкость отдельных газов при постоянном объёме, кДж/(кмоль · град)						
	Воздух	O ₂	N ₂	H ₂	CO	CO ₂	H ₂ O
0	20,759	20,960	20,705	20,303	20,809	27,546	25,185
100	20,839	21,224	20,734	20,621	20,864	29,799	25,428
200	20,985	21,617	20,801	20,759	20,989	31,746	25,804
300	21,207	22,086	20,973	20,809	21,203	33,442	26,261
400	21,475	22,564	21,186	20,872	21,475	34,936	26,776
500	21,781	23,020	21,450	20,935	21,785	36,259	27,316
600	22,091	23,447	21,731	21,002	22,112	37,440	27,881
700	22,409	23,837	22,028	21,094	22,438	38,499	28,476
800	22,714	24,188	22,321	21,203	22,756	39,450	29,079
900	23,008	24,511	22,610	21,333	23,062	40,304	29,694
1000	23,284	24,804	22,882	21,475	23,351	41,079	30,306
1100	23,548	25,072	23,142	21,630	23,623	41,786	30,913
1200	23,795	25,319	23,393	21,793	23,878	42,427	31,511
1300	24,029	25,549	23,627	21,973	24,113	43,009	32,093
1400	24,251	25,763	23,849	22,153	24,339	43,545	32,663
1500	24,460	25,968	24,059	22,333	24,544	44,035	33,211
1600	24,653	26,160	24,251	22,518	24,737	44,487	33,743
1700	24,837	26,345	24,435	22,698	24,917	44,906	34,262
1800	25,005	26,520	24,603	22,878	25,089	45,291	34,756
1900	25,168	26,692	24,766	23,058	25,248	45,647	35,225
2000	25,327	26,855	24,917	23,234	25,394	45,977	35,682
2100	25,474	27,015	25,063	23,410	25,537	46,283	36,121
2200	25,612	27,169	25,202	23,577	25,666	46,568	36,540
2300	25,746	27,320	25,327	23,744	25,792	46,832	36,942
2400	25,871	27,471	25,449	23,908	25,909	47,079	37,331
2500	25,993	27,613	25,562	24,071	26,022	47,305	37,704
2600*	26,120	27,753	25,672	24,234	26,120	47,515	38,060
2700*	26,250	27,890	25,780	24,395	26,212	47,710	38,395
2800*	26,370	28,020	25,885	24,550	26,300	47,890	38,705

РАЗДЕЛ 2

ПОСТРОЕНИЕ РЕГУЛЯТОРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ

В этом разделе рассматривается аналитический метод построения регуляторной характеристики дизельного двигателя. Данный метод позволяет построить регуляторную характеристику дизеля, имеющего всережимный регулятор, если известны следующие основные параметры двигателя:

- $N_{\text{етax}}$ – максимальная (номинальная) мощность двигателя (кВт);
- $n_{\text{ен}}$ – номинальная частота вращения коленчатого вала двигателя (мин⁻¹);

- g_{emin} – минимальный (номинальный) удельный расход топлива (г/кВт·ч).
Основными зависимостями этой характеристики являются:
 $M_e = M_e(n_e)$, $N_e = N_e(n_e)$, $G_e = G_e(n_e)$, $g_e = g_e(n_e)$.

2.1. Определение характерных точек регуляторной характеристики

Номинальный крутящий момент двигателя (Н·м):

$$M_{en} = 9558,8 \frac{N_{emax}}{n_{en}}. \quad (59)$$

Номинальный (максимальный) часовой расход топлива (кг/ч):

$$G_{en} = \frac{N_{emax} g_{emin}}{1000}. \quad (60)$$

Частота вращения коленчатого вала двигателя при максимальном крутящем моменте (мин^{-1}):

$$n_{em} = \frac{n_{en}}{k_{\Pi}}, \quad (61)$$

где k_{Π} – коэффициент приспособляемости двигателя по оборотам ($k_{\Pi} = 1,3 \dots 1,6$).

Максимальный крутящий момент двигателя (Н·м):

$$M_{emax} = M_{en} \cdot k_M, \quad (62)$$

где k_M – коэффициент приспособляемости двигателя по крутящему моменту ($k_M = 1,1 \dots 1,2$).

Мощность двигателя при максимальном крутящем моменте (кВт):

$$N_{em} = \frac{M_{emax} n_{em}}{9558,8}. \quad (63)$$

Часовой расход топлива при максимальном крутящем моменте (кг/ч):

$$G_{em} = \frac{G_{en}}{k_{G1}}, \quad (64)$$

где K_{G1} – коэффициент снижения часового расхода топлива при работе двигателя на безрегуляторной ветви характеристики ($k_{G1} = 1,05 \dots 1,25$).

Удельный расход топлива при максимальном крутящем моменте (г/(кВт·ч))

$$g_{em} = \frac{G_{em} 1000}{N_{em}}. \quad (65)$$

Минимальная частота вращения коленчатого вала двигателя (мин⁻¹)

$$n_{ek} = n_{emin} = \frac{n_{en}}{k_{кп}}, \quad (66)$$

где $k_{кп}$ – коэффициент критичности двигателя по оборотам ($k_{кп} = 1,8 \dots 2,0$).

Крутящий момент двигателя при минимальной частоте вращения (Н·м):

$$M_{ek} = M_{en} k_{км}, \quad (67)$$

где $k_{км}$ – коэффициент критичности двигателя по крутящему моменту ($k_{км} = 1,0 \dots 1,1$).

Мощность двигателя при минимальной частоте вращения (кВт):

$$N_{ek} = \frac{M_{ek} n_{emin}}{9558,8}. \quad (68)$$

Часовой расход топлива при минимальной частоте вращения (кг/ч):

$$G_{ek} = \frac{G_{em}}{k_{G2}}, \quad (69)$$

где k_{G2} – коэффициент снижения часового расхода топлива при работе двигателя на безрегулярной ветви характеристики от G_{em} до G_{ek} ($k_{G2} = 1,25 \dots 1,5$).

Удельный расход топлива при минимальной частоте вращения (г/(кВт·ч)):

$$g_{ek} = \frac{G_{ek} 1000}{N_{ek}}. \quad (70)$$

Максимальная частота вращения холостого хода двигателя (мин⁻¹)

$$n_{ex} = n_{en} \frac{2 + \delta_p}{2 - \delta_p}, \quad (71)$$

где δ_p – степень неравномерности регулятора ($\delta_p = 0,07 \dots 0,09$).

Часовой расход топлива при максимальной частоте вращения холостого хода (кг/ч):

$$G_{ex} = \frac{G_{en}}{k_{cp}}, \quad (72)$$

где k_{cp} – коэффициент снижения часового расхода топлива при работе двигателя на регуляторной ветви характеристики ($k_{cp} = 2 \dots 3$).

2.2. Построение регуляторной характеристики двигателя

Выбираем масштабы регуляторной характеристики (рис. 4):
масштаб частоты вращения коленчатого вала:

$$M_n = \frac{\text{значение } n_{ex}, \text{ мин}^{-1}}{\text{максимальное расстояние на графике, мм}},$$

масштаб крутящего момента:

$$M_M = \frac{\text{значение } M_{emax}, \text{ Н} \cdot \text{м}}{\text{максимальное расстояние на графике, мм}},$$

масштаб мощности:

$$M_N = \frac{\text{значение } N_{emax}, \text{ кВт}}{\text{максимальное расстояние на графике, мм}},$$

масштаб часового расхода топлива:

$$M_G = \frac{\text{значение } G_{en}, \text{ кг} \cdot \text{ч}}{\text{максимальное расстояние на графике, мм}},$$

масштаб удельного расхода топлива:

$$M_g = \frac{\text{значение } g_{emin}, \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})}{\text{минимальное расстояние на графике, мм}}.$$

Масштабы следует выбирать таким образом, чтобы высота диаграммы была приблизительно в 1,5 раза больше её основания и чтобы кривые графиков не накладывались друг на друга.

После нанесения координатных осей проведём вертикальные линии соответствующих режимов работы двигателя: $n_{ек}, n_{ем}, n_{ен}, n_{ех}$. Затем на каждом режиме расставляем точки, в соответствии с масштабом характеристик, относящихся к этому режиму. После нанесения всех точек плавными линиями их соединяем (рис. 4).

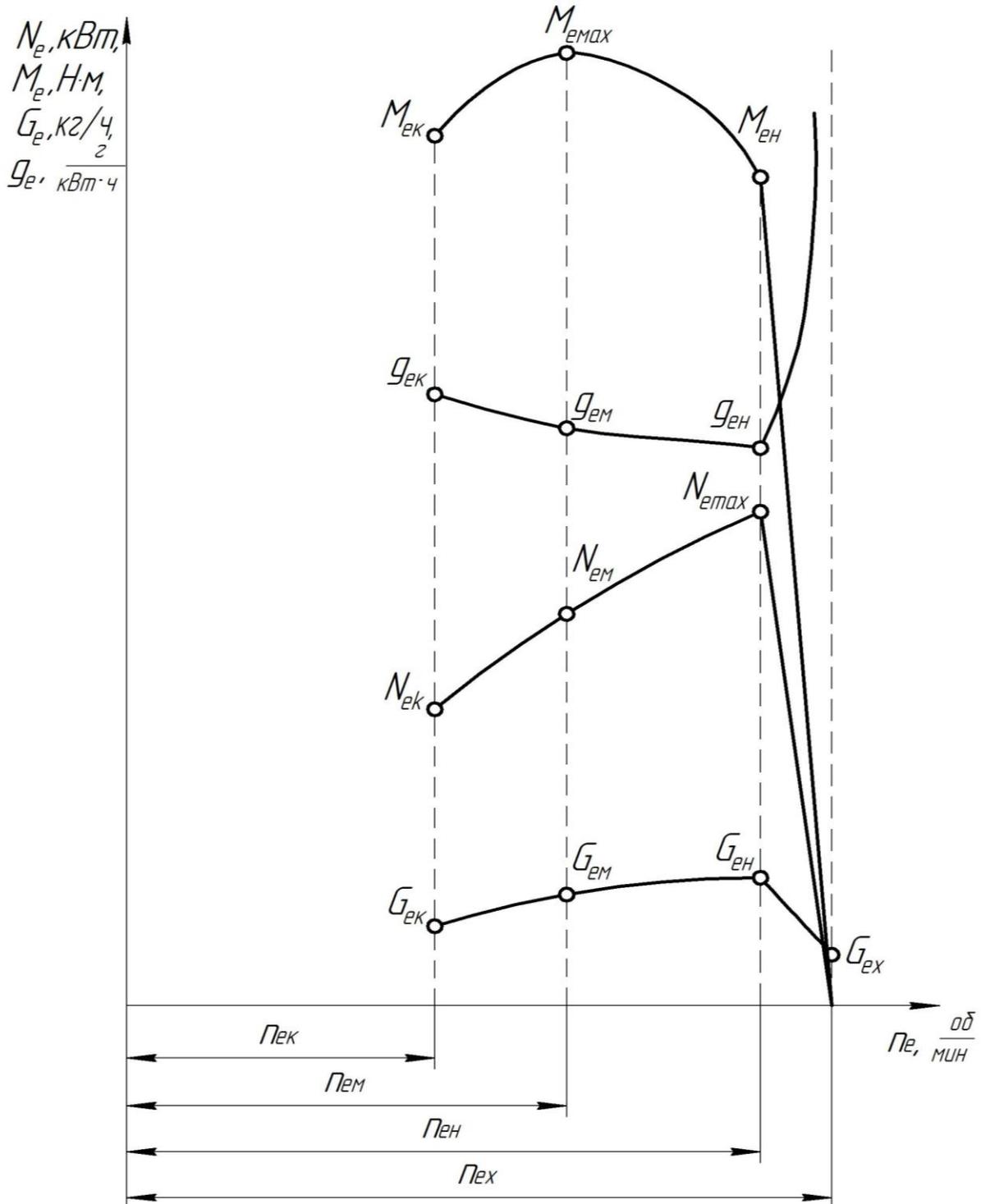


Рис. 4. Регуляторная характеристика двигателя

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хорош А.И. Дизельные двигатели транспортных и технологических машин: учебное пособие/ А.И. Хорош. – 2-е изд., испр. – СПб, Москва, Краснодар: Лань, 2012. – 702 с.
2. Суркин В.И. Основы теории и расчёта автотракторных двигателей, курс лекций: учебное пособие/ В.И. Суркин. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб., Москва, Краснодар: Лань, 2013. – 296 с.
3. Конструирование двигателей внутреннего сгорания [Электронный ресурс]: учебник/ Н.Д. Чайнов [и др.]. – Электрон. текстовые данные. – М.: Машиностроение, 2011. – 504 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/5173>. – ЭБС «IPRbooks».
4. Автомобильные двигатели: Курсовое проектирования: учеб. пособие / М.Г. Шатров, К.А. Морозов, И.В. Алексеев и др.; под ред. М.Г. Шатрова. – М.: Академия, 2011. – 256 с.
5. Двигатели внутреннего сгорания: учебник: В 3 кн.: допущено МО РФ. Кн. 1: Теория рабочих процессов / под ред. В.Н. Луканина, М.Г. Шатрова. – 2005. – 478 с.
6. Колчин А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие / А.И. Колчин, В.П. Демидов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2002. – 495 с.
7. Автомобильные двигатели: учебник для студ. высш. учеб. заведений / М.Г. Шатров, К.А. Морозов, И.В. Алексеев и др.; под ред. М.Г. Шатрова. – М.: Академия, 2010. – 464 с.
8. Прокопенко Н.И. Экспериментальные исследования двигателей внутреннего сгорания: учебное пособие/ Н.И. Прокопенко. – СПб.: Лань, 2010. – 592 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

Исходные данные для расчёта

Двигатель \ Параметры	Номинальная (максимальная) мощность, кВт	Номинальная частота вращения коленчатого вала, об/мин	Удельный минимальный расход топлива, г/кВтч	Число цилиндров	Наличие наддува	Степень сжатия
ВТЗ Д-120	22	2000	245	2	нет	15,0
ВТЗ Д-130	30	1500	236	2	нет	16,0
ВТЗ Д-130Т	48	2200	235	2	есть	16,5
ММЗ Д243Л-94	57	2100	211	4	нет	16
ММЗ Д243-250Э	60	2200	225	4	нет	16,0
ММЗ Д243-286	60	2200	233	4	нет	16,0
ММЗ Д243С-666	60	2200	235	4	нет	15,1
ВТЗ Д-144	65	2400	234	2	нет	16,7
А-41	69	1750	227	4	нет	16,0
Д-440	72	1750	220	4	есть	16,0
Д-245	77	2200	220	4	есть	15,1
Д-442-25БИ	103	1750	220	4	есть	16,5
Д-160	129	1280	231	4	есть	16,0
Д-180	132	1250	218	4	есть	16,5
ЯМЗ 236М2	132	2100	214	8	нет	16,5
ЯМЗ-5340	140	2300	194,5	4	есть	17,5
КАМАЗ-740-210	154	2600	225	8	нет	17,0
ТМЗ-8482.10-01	198	1700	211	8	есть	15,2
ЯМЗ-536	229	2300	194,5	6	есть	17,5
ТМЗ-8481.10-01	257	1900	206	8	есть	15,2
ЯМЗ-651-01	303	1925	193	6	есть	16,5
ЯМЗ-652-01	303	1925	192	6	есть	16,4
ТМЗ-8521.10	305	1775	204	8	есть	15,5
ТМЗ-8486.10-02	309	2000	204	8	есть	15,5
ТМЗ-8224.10-06	312	2100	204	8	есть	15,5

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Общие указания и исходные данные к курсовой работе	3
Раздел 1. Тепловой расчёт и тепловой баланс двигателя	4
1.1. Параметры рабочего тела.....	4
1.2. Параметры окружающей среды и остаточные газы	5
1.3. Процесс впуска	6
1.4. Процесс сжатия	7
1.5. Процесс сгорания	7
1.6. Процесс расширения	11
1.7. Индикаторные параметры рабочего цикла	11
1.8. Эффективные показатели двигателя	13
1.9. Основные параметры цилиндра и двигателя	14
1.10. Построение индикаторной диаграммы дизеля	15
1.11. Тепловой баланс двигателя.....	18
Раздел 2. Построение регуляторной характеристики двигателя	19
2.1. Определение характерных точек регуляторной характеристики	20
2.2. Построение регуляторной характеристики двигателя	22
Библиографический список.....	24
Приложение. Исходные данные для расчета.....	25

Энергетические установки транспортно-технологических машин и комплексов

*Методические указания
к выполнению курсовой работы
для обучающихся по направлениям подготовки
23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы»,
23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов»
и специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства»*

Составители:
Жулай Владимир Алексеевич,
Тюнин Виталий Леонидович,
Дегтев Дмитрий Николаевич,
Кожакин Евгений Владимирович

Редактор Аграновская Н.Н.

Подписано в печать 19.02. 2020. Формат 60×84 1/16.
Бумага для множительных аппаратов.
Уч.-изд. л. 1,75. Усл.-печ. л. 1,6. Тираж 98 экз. Заказ № 14.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский проспект, 14

Участок оперативной полиграфии издательства ВГТУ
394026 Воронеж, Московский проспект, 14