

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Учебно-методическое пособие
к выполнению расчётно-графического задания
для студентов специальности
26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок»

Севастополь
СевГУ
2022

УДК [629.5.03:621.431.7]-049.7:001.891-057.875(075.8)

ББК 39.455.5в6я73

П791

Рецензент:

Е.В. Хромов - канд. техн. наук, доцент кафедры ЭМСС

Составители: Г. В. Гоголев, В. А. Очеретяный, С. Е. Бабышев

П791 Проектирование и эксплуатация судовых двигателей внутреннего сгорания: учебно-методическое пособие к выполнению расчётно-графического задания для студентов специальности 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» / Севастопольский государственный университет, Морской институт; сост.: Г.В. Гоголев, В.А. Очеретяный, С.Е. Бабышев. – Севастополь: СевГУ, 2022. – 18 с. – Текст : электронный.

В указаниях рассматривается последовательность работы студента при выполнении курсового проекта. В частности, изложена последовательность действий при выполнении расчетной и эксплуатационной части курсового проекта.

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм обучения Севастопольского государственного университета, Морского института, специальности 26.05.06 – Эксплуатация судовых энергетических установок.

Выполнение практической работы направлено на изучение следующих профессионально-специализированных компетенций (Конвенция ПДНВ): ОПК-2 – способен применять естественнонаучные, общеинженерные знания и аналитические методы в профессиональной деятельности.

ПК-6 – способен осуществлять подготовку, эксплуатацию, обнаружение неисправностей и меры, необходимые для предотвращения причинения повреждений следующим механизмам и системам управления: 1. главный двигатель и связанные с ним вспомогательные механизмы (Конвенция ПДНВ).

УДК [629.5.03:621.431.7]-049.7:001.891-057.875(075.8)

ББК 39.455.5я73

Рассмотрено и рекомендовано на заседании кафедры Энергоустановок морских судов и сооружений Морского института Севастопольского госуниверситета в качестве учебно-методического пособия к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Судовые двигатели внутреннего сгорания» для студентов специальности 26.05.06 – Эксплуатация судовых энергетических установок, протокол № 4 от 28 декабря 2021 г.

© Гоголев Г.В., Очеретяный В.А.,
Бабышев С.Е., сост., 2022

© ФГАОУВО «Севастопольский
государственный университет», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Расчет рабочего процесса двигателя	5
2. Расчет энергетического баланса газотурбинного наддува комбинированного дизеля	11
3. Расчет и построение индикаторной диаграммы	14
Библиографический список	18

ВВЕДЕНИЕ

Расчет рабочего цикла базируется на классическом методе теплового расчета, разработанного профессором В.И. Гринивецким и развитым в последующем другими советскими учеными.

Метод теплового расчета основан на общеизвестных положениях термодинамики и термохимии, достаточно полно охватывает сущность тепловых явлений, происходящих в рабочем цилиндре, и представляет собой инженерное аналитическое исследование. На его основе можно:

- количественно оценить эти явления как при проектировании, так и при исследовании построенного двигателя;
- дать представление об основных параметрах цикла и факторах, влияющих на процессы рабочего цикла;
- определить расчетные значения параметров состояния рабочего тела в характерных точках расчетного цикла, а также эффективные показатели, характеризующие работу двигателя в целом.

Метод обеспечивает удовлетворительную для практики точность расчетов, несмотря на то, что протекающий в двигателе цикл описывается простейшими термодинамическими процессами и вводится ряд опытных коэффициентов.

1. РАСЧЕТ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДВИГАТЕЛЯ

Расчет осуществляется в табличной форме. Рекомендации по выбору исходных данных и различных коэффициентов даны в таблице 1.1, а также могут быть приняты по рекомендациям из литературы [1, 2].

При расчете максимальной температуры сгорания T_z следует подставить в уравнение сгорания топлива зависимости для $\bar{C}_v'$, $\bar{C}_v''$, $\bar{C}_{pz}''$ и решить его методом последовательных приближений, задаваясь температурой T_z в диапазонах: 1700...1900 К для МОД.

Средний показатель политропы расширения n_2 определяется при совместном решении уравнений в пунктах 5 и 6 таблицы 1.5 методом последовательных приближений, задаваясь значениями температуры $T_8=900...1200$ К. Средние значения показателя политропы лежат в диапазоне: $n_2 = 1,2...1,3$ для МОД и СОД с охлаждаемыми поршнями; $n_2 = 1,1...1,25$ для ВОД с неохлаждаемыми поршнями.

Таблица 1.1 – Исходные данные

Параметр	Обозначение	Размерность	Формула	Двигатель	
				5L90MCE (5ДКРН 90/291,6)	12ЧН 18/20
1	2	3	4	5	6
1. Эффективная мощность	N_e	кВт	Задано	28600	1000
2. Частота вращения	n	1/мин		74	1500
3. Давление окружающей среды	P_0	МПа		0,103	0,103
4. Температура окружающей среды	T_0	К		300	290
5. Давление наддува	p_k	МПа	$p_k=(0,15...0,20)p_e$ (4-х тактн.) $p_k=(0,18...0,20)p_e$ (2-х тактн.)	0,315	0,17
6. Коэффициент избытка воздуха для сгорания	α		Выбрано $\alpha=1,5...2,7$ (для МОД $\alpha=1,8...2,7$; для СОД $\alpha=1,6...2,2$)	2,7	1,9
7. Коэффициент продувки	φ_α		для 4-тактных $\varphi_\alpha=1,05...1,35$ для 2-тактных $\varphi_\alpha=1,25...1,80$	1,4	1,15
8. Коэффициент остаточных газов	γ_r		для 4-тактных $\gamma_r=0,01...0,04$ для 2-тактных с прямоточной схемой газообмена $\gamma_r=0,02...0,09$ для 2-тактных с контурными схемами $\gamma_r=0,01...0,14$	0,03	0,04
9. Коэффициент использования тепла в точке z	ξ_z		МОД и СОД $\xi_z=0,75...0,92$ ВОД $\xi_z=0,7...0,85$	0,90	0,75
10. Коэффициент использования тепла в точке b	ξ_b		МОД и СОД $\xi_b=0,85...0,99$ ВОД $\xi_b=0,85...0,95$	0,98	0,9

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6
11. Степень сжатия	ε		для МОД $\varepsilon=11...15$ для СОД $\varepsilon=12...16$ для ВОД $\varepsilon=15...18$	15	14
12. Степень повышения давления сгорания	λ		$\lambda=1,1...1,5$	1,12	1,5
13. Подогрев заряда от стенок цилиндра	ΔT_a	К	для 2-тактных $\Delta T_a=5...10$ К для 4-тактных $\Delta T_a=5...20$ К	10	10
14. Доля хода поршня, потерянная на продувку	ψ_a		$\psi=0,04...0,25$ для прямоточно-клапанной схемы газообмена $\psi=0,04...0,13$ для контурных схем	0,10	-
15. Плотность топлива при 15 °С	ρ_{15}	кг/м ³	Выбираем из таблицы показатели принятого топлива [4]	?	?
16. Коэффициент скругления индикаторной диаграммы	ζ		$\zeta=0,95...0,98$	0,95	0,96
17. Механический КПД двигателя	η_m		$\eta_m=0,75...0,96$	0,94	0,84
18. Адиабатный КПД компрессора	$\eta_{к.ад}$		принимаем $\eta_{к.ад}=0,75...0,84$	0,82	0,75
19. Потеря давления в воздухоохладителе	$\Delta p_{охл}$	МПа	для 2-тактных 0,003...0,007 для 4-тактных 0,001...0,003	0,005	0,004
20. Снижение температуры в воздухоохладителе	$\Delta T_{охл}$	К	д.б. $T_s \leq 310$ К принимаем $\Delta T_{охл} = 25...140$	135	28
21. Температура остаточных газов	T_r	К	Для МОД $T_r=550...650$ К Для СОД $T_r=650...800$ К Для ВОД $T_r=750...900$ К	500	850
22. Массовый состав топлива		кг/кг	принимаем в пределах $C=0,84...0,88$; $H=0,11...0,14$; $S=0,001...0,045$; $O=0,001...0,03$ $X_{H_2O}=0...0,002$	$C=0,877$ $H=0,12$ $S=0,002$ $O=0,001$	$C=0,87$ $H=0,126$ $O=0,004$
23. Низшая теплотворная способность топлива	Q_H	кДж/кг	$Q_H = (46,7 - 8,8 \cdot 10^{-6} \rho_{15}^2 + 3,17 \cdot 10^{-3} \rho_{15}) \times$ $\times [1 - (X_{H_2O} + S)] - 9,425 - 2,45 \cdot X_{H_2O}$	42170	41870
24. Показатель политропы сжатия в компрессоре	n_k		$n_k=1,5...2,0$	1,7	1,6

Таблица 1.2 – Расчет процесса наполнения

Параметр	Обозначение	Размерность	Формула	Двигатель	
				5L90MCE (5ДКРН 90/291,6)	12ЧН 18/20
1. Температура воздуха за компрессором	T_k	К	$T_0 \left(\frac{p_k}{p_0} \right)^{\frac{n_k-1}{n_k}}$	475	353
2. Температура воздуха перед двигателем	T_s	К	$T_k - \Delta T_{охл}$	340	325
3. Температура заряда к концу наполнения	T_a	К	$\frac{T_s + \Delta T_a + \gamma_r T_r}{1 + \gamma_r}$	354	355
4. Давление воздуха перед двигателем	p_s	МПа	$p_k - \Delta p_{охл}$	0,31	0,165
5. Давление заряда к концу процесса наполнения	p_a	МПа	$(0,97 \dots 0,98) \cdot p_s$	0,296	0,160
6. Коэффициент наполнения	η_n		$\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} \frac{p_a}{p_s} \frac{T_s}{T_a} \frac{1}{1+\gamma_r} (1-\psi_a) \text{ (ДН)}$ $\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} \frac{p_a}{p_s} \frac{T_s}{T_a} \frac{1}{1+\gamma_r} \text{ (ЧН)}$	0,844	0,892

Таблица 1.3 – Расчет процесса сжатия

Параметр	Обозначение	Размерность	Формула	Двигатель	
				5L90MCE (5ДКРН 90/291,6)	12ЧН 18/20
1. Средняя молярная изохорная теплоемкость воздуха	$\bar{C}_v'$	кДж/(моль·К)	$19,26 + 0,0025T$	?	?
2. Средняя молярная изохорная теплоемкость чистых продуктов сгорания	$\bar{C}_v''$	кДж/(моль·К)	$20,47 + 0,0036T$	?	?
3. Теплоемкость смеси воздуха и остаточных газов на ходе сжатия	$\bar{C}_{vC}$	кДж/(моль·К)	$\frac{\gamma_r \bar{C}_v'' + [a(1+j_r) - j_r] \cdot \bar{C}_v'}{a(1+j_r)} = a_{vc} + b_c T$	$19,251 + 0,0025 \cdot T$	$19,262 + 0,002534 \cdot T$
4. Средний показатель политропы сжатия	n_1		$n_1 - 1 = \frac{8,314}{a_{vc} + b_c(1 + \varepsilon^{n_1-1})}$	1,368	1,369
5. Давление в конце сжатия	p_c	МПа	$p_a \varepsilon^{n_1}$	12,04	5,95
6. Температура в конце сжатия	T_c	К	$T_a \varepsilon^{n_1-1}$	962	941

Таблица 1.4 – Расчет процесса сгорания

Параметр	Обозначение	Размерность	Формула	Двигатель	
				5L90MCE (5ДКРН 90/291,6)	12ЧН 18/20
1	2	3	4	5	6
1. Теоретически необходимое мольное количество воздуха для сгорания 1 кг топлива	L_0		$\frac{1}{0,21} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right)$	?	?
2. Действительное количество воздуха для сгорания 1 кг топлива	L	кмоль/ кг	$\alpha \cdot L_0$	1,312	0,941
3. Химический коэффициент молекулярного изменения	β_0		$1 + \frac{8H + O}{32L}$	1,0234	1,0337
4. Действительный коэффициент молекулярного изменения	β		$\frac{\beta_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r}$	1,0221	1,033
5. Доля топлива, сгоревшая в точке z	x_z		ξ_z / ξ_b	0,918	0,843
6. Коэффициент молекулярного изменения в точке z	β_z		$1 + \frac{\beta_0 - 1}{1 + \gamma_r} x_z$	1,0211	1,0274
7. Приращение объема продуктов сгорания	ΔM		$\frac{H}{4} + \frac{O}{32}$	?	?
8. Коэффициент	m		$m = 1 + \frac{\Delta M}{L_0}$	?	?
9. Изобарная теплоемкость	$\overline{C}_p$		$\overline{C}_v + 8,314$	?	?
10. Средняя мольная изохорная теплоемкость рабочего тела в точке z	$\overline{C}_{v_z}$	кДж/ (кмоль· К)	$\frac{(mx_z + \gamma_r) \overline{C}_v'' + [\alpha(1 + \gamma_r) - (x_z + \gamma_r)] \overline{C}_v'}{\alpha(1 + \gamma_r) + (m - 1)} = a_{v_z} + b_z T$	19,76 + 0,0029· T	19,82 + 0,00293· T
11. Средняя мольная изохорная теплоемкость рабочего тела в точке b	$\overline{C}_{v_b}$	кДж/ (кмоль· К)	$\frac{(m + \gamma_r) \overline{C}_v'' + (\alpha - 1)(1 + \gamma_r) \overline{C}_v'}{\alpha(1 + \gamma_r) + (m - 1)x_z} = a_{v_b} + b_b T$	19,87 + 0,003· T	19,94 + 0,00323· T
12. Максимальная температура сгорания	T_z	К	$\frac{\xi_z Q_H}{\alpha L_0} + \left[\overline{C}_v' + 8,314\lambda + \gamma_r \left(\overline{C}_v'' + 8,314 \cdot \lambda \right) \right] T_c =$ $= \beta_z (1 + \gamma_r) \overline{C}_{pz}'' \cdot T_z$	1725	1865
13. Максимальное давление сгорания	p_z	МПа	λp_c	13,52	8,92

Таблица 1.5 – Расчет процесса расширения

Параметр	Обозначение	Размерность	Формула	Двигатель	
				5L90MCE (5ДКРН 90/291,6)	12ЧН 18/20
1	2	3	4	5	6
1. Степень предварительного расширения	ρ		$\frac{\beta_z T_z}{\lambda T_c}$	1,63	1,36
2. Степень последующего расширения	δ		$\frac{e}{r}$	9,16	10,3
3. Коэффициент А			$A=8,314 \frac{\beta_z T_z}{\beta}$	?	?
4. Коэффициент В			$B= \frac{Q_H(\xi_b - \xi_z)}{L(1+j_r)\beta} + \frac{\beta_z}{\beta} (a_{v_z} + b_z T_z) T_z$	?	?
5. Средний показатель политропы расширения	n_2		Определяется при совместном решении уравнений пунктов 5 и 6 $n_2-1 = \frac{A-8,314 T_b)}{B-(a_{v_b} + b_b T_b) T_b}$	1,276	1,232
6. Температура в конце процесса расширения	T_b	К	$T_b = T_z \frac{1}{\delta^{n_2-1}}$	944	1080
7. Давление в конце процесса расширения	p_b	МПа	$\frac{\rho_z}{\delta^{n_2}}$	0,804	0,538

Таблица 1.6 – Определение индикаторных показателей

Параметр	Обозначение	Размерность	Формула	Двигатель	
				5L90MCE (5ДКРН 90/291,6)	12ЧН 18/20
8. Теоретическое среднее индикаторное давление	p'_i	МПа	$\frac{p_c}{\varepsilon-1} \left[\lambda(\rho-1) + \frac{\lambda \rho}{n_2-1} \left(1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}} \right) - \frac{1}{n_1-1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1-1}} \right) \right]$	1,76	1,17
9. Действительное среднее индикаторное давление	p_i	МПа	Для 2-тактных $p'_i \zeta (1-\psi_n)$ (ДН) Для 4-тактных $p'_i \zeta$ (ЧН)	1,53	1,12
10. Индикаторная мощность	N_i	кВт	$\frac{\pi D^2}{4 \cdot 60} S \cdot p_i \cdot z \cdot n \cdot I \cdot 1000$ Для 2-тактных $z=1$ Для 4-тактных $z=0,5$	?	?

Параметр	Обо знач ение	Размер- ность	Формула	Двигатель	
				5L90MCE (5ДКРН 90/291,6)	12ЧН 18/20
11. Индикаторный удельный расход топлива	b_i	кг× (кВт·ч)	$433 \frac{p_s \eta_H}{\alpha L_0 T_s p_i}$	0,162	0,192
12. Индикаторный КПД	η_i		$\frac{3600}{b_i Q_H}$	0,507	0,444

Таблица 1.7 – Определение эффективных показателей

Параметр	Обоз наче ние	Размер- ность	Формула	Двигатель	
				5L90MCE (5ДКРН 90/291,6)	12ЧН 18/20
1. Среднее эффективное давление	p_e	МПа	$p_i \eta_m$	1,44	0,96
2. Удельный эффективный расход топлива	b_e	кг/ (кВт·ч)	$\frac{b_i}{\eta_m}$	0,173	0,230
3. Эффективный КПД двигателя	η_e		$\eta_i \cdot \eta_m$	0,477	0,381

3. РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ГАЗОТУРБИННОГО НАДДУВА КОМБИНИРОВАННОГО ДИЗЕЛЯ

Наддув комбинированного четырехтактного дизеля может быть достаточно надежно осуществлен одноступенчатым газотурбинным нагнетателем обычно центробежного типа. Согласованность автономного ГТН с двигателем достигается равенством относительных мощностей газовой турбины δ_T и компрессора δ_K .

В случае применения импульсных турбин допускается превышение мощности центробежного нагнетателя над мощностью газовой турбины на 10...15 % при повышенном наддуве и на 15...20 % при низком p_K .

Такое превышение $\delta_K=(1,05..1,25) \delta_T$ оправдано, если расчет газовой турбины ведется как турбины постоянного давления, а мощность импульсной турбины при прочих равных условиях оказывается больше на 5...25 %.

В двухтактных двигателях наддув автономным ГТН надежно осуществляется только при прямоточно-клапанной продувке, а при контурной продувке применяется комбинированная схема наддува, состоящая из автономного ГТН (одного или нескольких) первой ступени и приводного нагнетателя (ПН), установленного в качестве второй ступени.

При комбинированной схеме наддува степень повышения давления в приводном нагнетателе (π_H) должна быть возможно меньше, а давление между ступенями (p_I) возможно большим, так как с ростом π_H увеличивается мощность, отбираемая от двигателя на привод этого нагнетателя.

Можно назначать p_I , исходя из соотношения $\pi_H=p'_K/p_I=1,05...1,2$; тогда $\pi_K=p_I/p_0$.

2.1. Расчет параметров продувочно-наддувочного агрегата

2.1.1. Параметры газовой турбины

Температура остаточных газов в конце выпуска:

$$T_T = T_\theta / \left(\frac{p_\theta}{p_T} \right)^{\frac{n_T-1}{n_T}}, \text{ К},$$

где n_T – показатель политропы расширения при истечении газа в коллектор, принимается в пределах 1,30...1,35.

Температура воздуха в цилиндре в конце сжатия, «чистых» продуктов сгорания и их смеси:

$$\bar{C}'_p = 19,26 + 8,315 \cdot 0,0025 \cdot T_c, \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)};$$

$$\bar{C}''_p = a_{v\theta} + 8,315 + \epsilon_\theta \cdot T_T, \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)};$$

$$\bar{C}'''_{pT} = \frac{(\varphi_a - 1) \cdot \bar{C}'_p + \beta_0 \cdot \bar{C}''_p}{(\varphi_a - 1) + \beta_0}, \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}.$$

Температура газов перед турбиной:

$$T_T = \frac{(\varphi_a - 1) \cdot \bar{C}_p' \cdot T_k + \beta_0 \cdot \bar{C}_p'' \cdot T_r}{(\varphi_a - 1 + \beta_0) \cdot \bar{C}_{pT}''}, \text{ К.}$$

Удельный расход газов через турбину:

$$M_r = \frac{q_i \cdot L \cdot (\varphi_a - 1 + \beta_0)}{3600}, \text{ кмоль/кВт.}$$

Коэффициент адиабатного напора турбины:

$$H_{aT} = \bar{C}_{pT}''' \cdot T_r \left[1 - \left(\frac{p_0}{p_r} \right)^{\frac{\kappa_r - 1}{\kappa_r}} \right], \text{ кДж/кмоль,}$$

где κ_r – показатель адиабаты расширения газа в турбине, принимается 1,30...1,40.

Относительная мощность турбины:

$$\delta_T = H_{aT} \cdot M_r \cdot \eta_{aT} \cdot \kappa_{и},$$

где η_{aT} – адиабатный КПД турбины, принимается 0,72...0,82; $\kappa_{и}$ – коэффициент использования энергии импульса, принимается 1,10...1,33.

2.1.2. Параметры центробежного компрессора

Удельная адиабатная работа компрессора:

$$U_{aK} = T_0 \cdot (\pi_K^{0,286} - 1), \text{ кДж/кг.}$$

Удельная действительная работа компрессора:

$$U_K = U_{aK} / \eta_{aK} \cdot \eta_{мK}, \text{ кДж/кг,}$$

где η_{aK} – адиабатный КПД компрессора, принимается 0,70...0,78;

$\eta_{мK}$ – механический КПД компрессора, принимается 0,96...0,98.

Относительная мощность компрессора:

$$\delta_K = 28,95 \cdot U_K \cdot \alpha_\Sigma \cdot L_0 / Q_H \cdot \eta_i.$$

2.1.3. Параметры приводного нагнетателя

Температура надувочного воздуха после нагнетателя:

$$T_H = T_0 \cdot \left(\frac{p_I}{p_0} \right)^{0,286} \cdot \left(\frac{p'_K}{p_T} \right)^{\frac{\eta_H - 1}{\eta_H}}, \text{ К.}$$

Действительный температурный перепад для расчета охладителя надувочного воздуха:

$$\Delta T_{охл} = T_n - T_k.$$

Удельная работа приводного нагнетателя:

$$U_n = \frac{n_n}{n_n - 1} \cdot T'_k (\pi_n^{\frac{n_n - 1}{n_n}} - 1) \frac{1}{\eta_{мн}}, \text{ кДж/кг},$$

где n_n – показатель политропы сжатия воздуха в приводном нагнетателе, принимаем равным: 1,6 – для роторно-зубчатого;

1,45...1,6 – для поршневого;

$\eta_{мн}$ – механический КПД нагнетателя, равен 0,89...0,95.

Относительная мощность приводного нагнетателя:

$$\delta'_n = 28,95 \cdot U_n \cdot \alpha_\Sigma \cdot L_0 / (Q_n \cdot \eta_i).$$

3. РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЫ

Теоретическую индикаторную диаграмму строят по данным расчета рабочего цикла. Ординаты точек политропы сжатия и расширения вычисляют по следующим формулам:

$$\text{для процесса сжатия } p = \frac{p_c}{\left(\frac{V}{V_c}\right)^{n_1}},$$

для процесса расширения, учитывая, что $V_z = \rho \cdot V_c$,

$$p = \frac{p_z \cdot \rho^{n_2}}{\left(\frac{V}{V_c}\right)^{n_2}},$$

где $V/V_c = \varepsilon_x$ – отношение объемов, представляющее собой текущее значение степени сжатия.

Использование отношения V/V_c в качестве переменной позволяет упростить вычисления, так как численные значения V/V_c в основном целые числа (от 1,0 до e – для политропы сжатия, от ρ до e – для политропы расширения). Удобно также задавать одни и те же значения V/V_c для вычисления ординат политропы сжатия и расширения. При этом две ординаты политроп сжатия и расширения соответствуют одной абсциссе, что значительно упрощает их построение.

Теоретическая индикаторная диаграмма рабочего цикла в этом случае представляется в системе координат p – V/V_c безразмерной в направлении оси объемов. Абсолютные объемы, соответствующие значениям отношения V/V_c , легко найти, умножив отношение V/V_c на постоянный объем V_c камеры сжатия:

$$\text{для четырехтактных ДВС } V_c = V_a / (\varepsilon - 1);$$

$$\text{для двухтактных ДВС } V_c = V_s / (\varepsilon_2 - 1),$$

где $\varepsilon_2 = (\varepsilon - \varphi) / (1 - \varphi)$ – геометрическая степень сжатия.

Вычисление ординат точек политроп сжатия и расширения удобно проводить в табличной форме и в определенном порядке (таблица 4.1).

Значения p_c , p_a , p_z и p_b являются контрольными и должны соответствовать полученным в расчете цикла.

Таблица 4.1 – Вычисление ординат точек политроп сжатия и расширения

$\frac{V}{V_c}$	$\left(\frac{V}{V_c}\right)^{n_1}$	p , МПа	p , мм	$\left(\frac{V}{V_c}\right)^{n_2}$	p , МПа	p , мм
1,0	1	p_c	$\frac{p_c}{m_p}$			
1,25						
ρ				ρ^{n_2}	p_z	$\frac{p_z}{m_p}$
1,50						
1,75						
2,0						
2,5						
3,0						
4,0						
6,0						
8,0						
10,0						
12,0						
ε						

Порядок построения индикаторных диаграмм рабочего цикла двигателя (рисунки 4.1, 4.2) следующий:

- 1) устанавливают масштабы построения диаграммы m_p и m_v/V_c .

При выборе масштабов построения диаграммы рекомендуется руководствоваться таким отношением:

$$\frac{p_z}{m_p} \cdot \frac{m_v/V_c}{\varepsilon} \approx \frac{2}{3},$$

где m_p – масштаб по оси ординат (давлений), обычно $m_p=0,04\dots0,06$ МПа/мм;

m_v/V_c – масштаб по оси абсцисс (отношение объемов), обычно единица оси абсцисс составляет 15...20 мм;

- 2) проводят контрольные линии постоянных давлений окружающей среды p_0 и наддува p_s ;
- 3) на вертикальных прямых линиях, проведенных через нанесенные на оси абсцисс значения V/V_c , откладываются соответствующие значения ординат давлений, вычисленных в таблице 4.1 для политроп сжатия и расширения. Полученные точки соединятся плавными кривыми sa и zb . Далее проводятся линии su и uz процесса сгорания;
- 4) проводят линии процессов газообмена (выпуска br и наполнения ra) для четырехтактных ДВС в предположении постоянства значений потерь на впуске ($-\Delta p_a$) и противодавлений на выпуске ($+\Delta p_a$); линии постоянных

давлений процессов наполнения и выпуска наносятся с соблюдением условий: для ДВС с наддувом $p_a < p_s$ и $p_r > p_0$, при этом $p_a < p_r$.

Для двухтактных ДВС (рисунок 4.2) замыкающие диаграмму линии процессов выпуска и наполнения (так называемая хвостовая часть диаграмм) наносят с учетом особенностей протекания процессов выпуска и продувки в различных схемах газообмена: после открытия окон (клапанов) давление в цилиндре резко падает в связи с быстрым нарастанием сечения выпускных органов (участок bd); к моменту открытия продувочных окон давление в цилиндре несколько меньше давления продувочного воздуха – при этом на участке df должно соблюдаться условие $p_a < p_s$.

В целях сближения теоретической индикаторной диаграммы рабочего цикла к действительной, построенную диаграмму корректируют на участках процесса сгорания $суz$, наполнения ra и свободного выпуска ba (для четырехтактных ДВС, рисунок 1) или bd (для двухтактных ДВС, рисунок 2).

На участке $суz$ в результате протекания процесса сгорания с конечной скоростью давление на начальном участке $су$ повышается не по изохоре, а по сложной наклонной кривой, имеющей началом точку c ; с изменением объема на участке $уз$ эта кривая приближается к точке z . Линия процесса сгорания плавно сопрягается в районе точки c с политропой сжатия и в районе точки z – с политропой расширения.

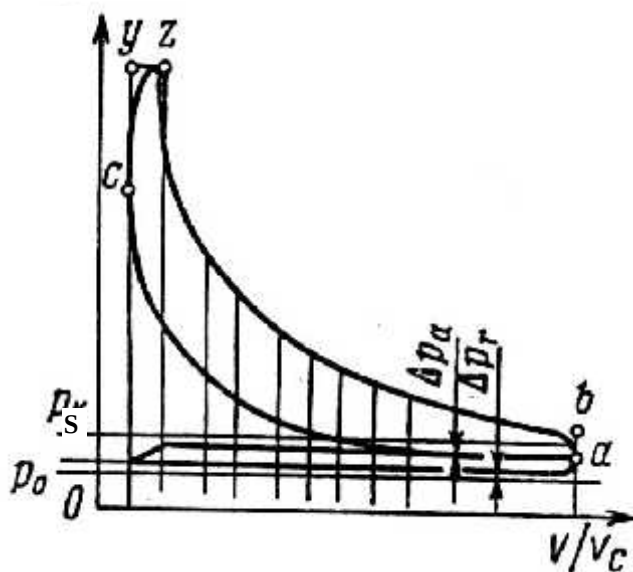


Рисунок 1 – Теоретическая индикаторная диаграмма четырехтактных двигателей с наддувом

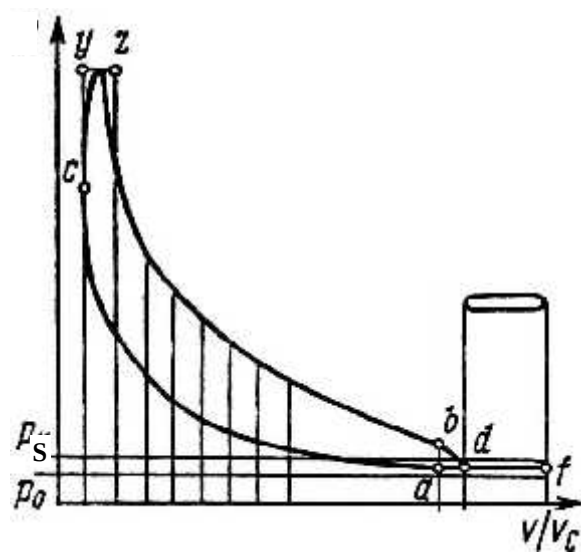


Рисунок 2 – Теоретическая индикаторная диаграмма двухтактных двигателей с наддувом

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ваншейдт В.А. Судовые двигатели внутреннего сгорания / В.А. Ваншейдт. – Л.: Судостроение, 1977. – 392 с.
2. Фомин Ю.Я. Судовые двигатели внутреннего сгорания: Учебник / Ю.Я. Фомин, А.И. Горбань, В.В. Добровольский, А.И. Лукин и др. – Л.: Судостроение, 1989. – 344 с.
3. Самсонов В.И. Двигатели внутреннего сгорания морских судов / В.И. Самсонов, М.И. Худов. – М.: Транспорт, 1990. – 308 с.

Учебное издание

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ
СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

Учебно-методическое пособие

Составители: **Гоголев** Геннадий Вениаминович,
Очеретяный Владимир Анатольевич, **Бабышев** Сергей Евгеньевич

В авторской редакции

Изд. № 10/2022. Объем 1,25 п.л. Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,23.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»