

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ
Кафедра энергоустановок морских судов и сооружений

В.А. Тимофеев, О.В. Владецкий

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Методические указания
к выполнению курсовой работы по дисциплине
(Часть 1 – техническая термодинамика)
на тему «Расчет теоретических циклов ДВС и ГТУ»



Севастополь
СевГУ
2019

УДК 536.7
ББК 39.46
Т41

Р е ц е н з е н т:

С.Е.Тверская - канд. техн. наук, доцент кафедры ЭМСС

Ответственный за выпуск:

К.Ю. Федоровский - доктор технических наук,
профессор, заведующий кафедрой ЭМСС

Тимофеев В.А.

Т41 Техническая термодинамика и теплопередача: метод. указания к выполнению курсовой работы по дисциплине (Часть 1 – Техническая термодинамика) на тему «Расчет теоретических циклов ДВС и ГТУ» / В.А. Тимофеев, О.В. Владецкий. – Севастополь: СевГУ, 2019. – 27 с.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам в овладении навыков применения полученных теоретических знаний при решении практических инженерных задач. Требования и рекомендации, изложенные в методических указаниях, направлены на углубление знаний и умений, предусмотренных требованиями Международной Конвенции ПДМНВ 78/95 с поправками 1995 г. (Раздел А-III/2).

УДК 536.7
ББК 39.46

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры ЭМСС, протокол № 1 от 31 августа 2018 года.

Допущено к изданию ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» в качестве методических указаний для студентов направления подготовки 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» очной и заочной форм обучения.

© Тимофеев В.А., Владецкий О.В., 2019
© ФГАОУВО «Севастопольский
государственный университет», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

1.	Общие положения.....	4
2.	Выбор исходных данных.....	5
3.	Указания к расчетной части курсовой работы.....	5
3.1.	Расчет состава параметров рабочего тела.....	5
3.2.	Расчет теоретического цикла ГТУ.....	9
3.3.	Расчет теоретического цикла ДВС.....	11
4.	Указания к графической части.....	14
4.1.	Построение отдельных термодинамических процессов и цикла в координатах P - V	14
4.2.	Построение отдельных термодинамических процессов и цикла в координатах T - S	16
4.3.	Построение цикла в координатах T - S	21
	Библиографический список	24
	Приложение 1. Молекулярные массы, плотности, объемы	25
	Приложение 2. Интерполяционные формулы для средних массовых и объемных теплоемкостей газов.....	26
	Приложение 3 Пример оформления содержания пояснительной записки	27

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Студенты направления подготовки 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» по курсу «Техническая термодинамика и теплопередача» (часть 1 – техническая термодинамика) должны выполнить курсовую работу, целью которой является: закрепление, углубление и обобщение теоретических знаний, приобретение навыков самостоятельного решения инженерно-технических задач; обучение студентов правильному анализу процессов изменения состояния рабочего тела с точки зрения основных законов термодинамики; подготовка студента к непосредственному выполнению теплового расчета двигателя внутреннего сгорания и газотурбинной установки, которые производятся в курсовых проектах по дисциплинам «Судовые двигатели внутреннего сгорания», «Судовые турбомашини».

1.2. Выполняя курсовую работу, студент должен научиться пользоваться литературными источниками, методами определения основных параметров идеального газового цикла (поршневого двигателя внутреннего сгорания и газотурбинной установки).

1.3. В состав курсовой работы входят:

- а) расчет параметров газовой смеси (рабочего тела);
- б) расчет идеальных циклов ГТУ и ДВС;
- в) графическое выполнение циклов в диаграммах $P-V$ и $T-S$.

1.4. Расчет должен быть изложен кратко, но в необходимом объеме в соответствии с данными методическими указаниями. Чертежи должны быть четкими и выполнены (в карандаше) на листах ватмана или миллиметровой бумаги формата А4 с соблюдением требований ЕСКД.

1.5. Студент защищает выполненную им курсовую работу на кафедре. За несколько дней до защиты работа должна быть представлена для проверки руководителю курсовой работы. При выполнении работы следует обратить особое внимание на физический смысл и размерности термодинамических параметров.

1.6. Прежде чем приступить к расчету, необходимо детально изучить следующие вопросы курса: параметры и уравнение состояния идеальных газов, газовые смеси, теплоемкости идеальных газов и газовых смесей, основные термодинамические процессы, первый и второй законы термодинамики, циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установок.

1.7. В расчетной части курсовой работы определяются массовый (объемный) состав смеси, газовые постоянные компонентов и газовая постоянная смеси, средняя молекулярная масса смеси (через объемные или массовые доли), изобарная и изохорная теплоемкости компонентов и смеси, показатели адиабат сжатия и расширения; давление, удельный объем, температура, внутренняя

энергия, энтальпия рабочего тела в характерных точках цикла; изменение внутренней энергии, энтальпии, количество тепла, работу и коэффициент распределения энергии для каждого процесса, входящего в состав цикла; работу и термический КПД цикла, теоретическая мощность установки.

1.8. В графической части курсовой работы необходимо: построить циклы в диаграммах P - V и T - S ; дать схемы протекания каждого процесса, входящего в состав цикла.

2. ВЫБОР ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА

Исходные данные для выполнения курсовой работы определяются из таблицы 2.1 согласно номеру зачетной книжки студента.

3. УКАЗАНИЯ К РАСЧЕТНОЙ ЧАСТИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

3.1. Расчет состава и параметров рабочего тела

3.1.1. Определение состава газовой смеси

В общих положениях было отмечено, что в качестве рабочего тела в задании для выполнения курсовой работы дается газовая смесь.

Если газовая смесь задана объемными долями, тогда необходимо определить массовые доли по уравнению:

$$g_i = \frac{r_i \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n r_i \cdot m_i},$$

где r_i - объемная доля i -го компонента; μ_i - молекулярная масса i -го компонента, кг/кмоль.

Если же газовая смесь задана массовыми долями, тогда необходимо определить объемные доли по уравнению

$$r_i = \frac{g_i \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n g_i \cdot m_i}.$$

Таблица 2.1 - Исходные данные для выполнения курсовой работы

Предпо- следние цифры номера зачетки	Ком- понент 1	Компо- нент 2	P_1 , МПа	t_1 , °C	Послед- няя цифра номера зачетки	r_1	r_2	t_3 ГТУ, °C	G , кг/с	$\pi_k = P_2/P_1$	$\varepsilon = V_1/V_2$	$\lambda = P_3/P_2$	$\rho = V_4/V_3$
0	N ₂	CO ₂	0,1	13	0	0,1	0,9	700	70	6,0	5	3,5	1,0
1	CO	N ₂	0,09	35	1	0,8	0,2	725	65	6,5	6	3,0	1,0
2	O ₂	CO ₂	0,106	0	2	0,3	0,7	750	60	7,0	7	2,5	1,0
3	N ₂	H ₂ O	0,092	25	3	0,6	0,4	775	55	7,5	13	2,0	1,2
4	CO	N ₂	0,108	10	4	0,5	0,5	800	50	8,0	14	1,8	1,3
5	CO ₂	N ₂	0,094	20	5	0,25	0,75	825	45	8,5	15	1,6	1,4
6	N ₂	CO	0,104	15	6	0,55	0,45	850	40	5,75	16	1,5	1,5
7	CO ₂	O ₂	0,098	5	7	0,65	0,35	875	35	6,25	17	1,0	1,8
8	H ₂ O	N ₂	0,102	30	8	0,15	0,85	900	30	7,25	18	1,0	2,0
9	N ₂	CO	0,096	8	9	0,9	0,1	715	25	6,75	19	1,0	2,2

3.1.2. Определение газовых постоянных компонентов и смеси

Для определения газовой смеси, необходимо вычислить газовые постоянные отдельных компонентов смеси. Их следует определять по формуле

$$R_i = 8314/\mu_i, \text{ Дж/(кг·К)} \quad .$$

Газовая постоянная смеси тогда определяется:

$$R_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot R_i \quad \text{или} \quad R_{\text{см}} = 8314 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{g_i}{m_i} .$$

Значение газовой постоянной смеси должно быть проверено по величине средней молекулярной массы смеси $m_{\text{см}}$, которая определяется по уравнениям:

а) при задании смеси в объемных долях

$$m_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot m_i ;$$

б) при задании смеси в массовых долях

$$m_{\text{см}} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{m_i} \right)^{-1} ;$$

Тогда

$$R_{\text{см}} = 8314/\mu_{\text{см}} .$$

3.1.3. Определение парциальных давлений

По величине давления смеси для заданной точки цикла определяются парциальные давления:

а) при задании смеси в объемных долях

$$P_i = P_{\text{см}} \cdot r_i ;$$

б) при задании смеси в массовых долях

$$P_i = P_{\text{см}} \cdot g_i \cdot (R_i/R_{\text{см}}) ;$$

Проверка осуществляется по уравнению

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_{\text{см}} .$$

3.1.4. Определение средних теплоемкостей рабочего тела в цикле

3.1.4.1. Средняя теплоемкость рабочего тела (газовой смеси) в цикле необходима для определения в каждом из процессов цикла изменений внутренней энергии ΔU , энтальпии Δh и энтропии ΔS , а также количества под-

веденного и отведенного тепла. Прежде чем приступить к определению численных значений средней теплоемкости смеси в цикле, необходимо определить средние теплоемкости отдельных компонентов газа. Эти теплоемкости могут быть определены по следующим уравнениям.

3.1.4.2. Средняя массовая изобарная теплоемкость компонента

$$C_{pm} \Big|_{t_{min}}^{t_{max}} = \left(C_{pm} \Big|_0^{t_{max}} \cdot t_{max} - C_{pm} \Big|_0^{t_{min}} \cdot t_{min} \right) / (t_{max} - t_{min}),$$

где: $C_{pm} \Big|_0^{t_{max}}$ и $C_{pm} \Big|_0^{t_{min}}$ - средние массовые изобарные теплоемкости компонента газа в интервалах температур соответственно от 0 °С до t_{max} (t_{max} – максимальная температура газа в цикле) и от 0 °С до t_{min} (t_{min} – минимальная температура газа в цикле).

Значение теплоемкостей для данного компонента газа берутся из таблиц, помещенных в теплотехнической литературе.

3.1.4.3. Средняя массовая изохорная теплоемкость компонента

$$C_{vm} \Big|_{t_{min}}^{t_{max}} = \left(C_{vm} \Big|_0^{t_{max}} \cdot t_{max} - C_{vm} \Big|_0^{t_{min}} \cdot t_{min} \right) / (t_{max} - t_{min}),$$

где $C_{vm} \Big|_0^{t_{max}}$ и $C_{vm} \Big|_0^{t_{min}}$ - средние массовые изохорные теплоемкости компонента газа в тех же интервалах температур.

3.1.4.4. При использовании таблиц для определения значения теплоемкостей при температурах, кратных 100 градусам Цельсия, применить метод интерполяции в предположении линейной зависимости теплоемкости от температуры в том или ином стоградусном интервале ее изменения.

3.1.4.5. Средняя массовая изобарная и изохорная теплоемкости смеси в цикле определяются по уравнениям:

$$C_{pm}^{cm} \Big|_{t_{min}}^{t_{max}} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot C_{pm}^i;$$

$$C_{vm}^{cm} \Big|_{t_{min}}^{t_{max}} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot C_{vm}^i,$$

где g_i - массовая доля данного компонента газа; C_{pm}^i и C_{vm}^i - средние массовые изобарная и изохорная теплоемкости данного компонента газа в интервале температур от t_{min} до t_{max} определены выше.

3.1.5 Определение показателя адиабаты K

Показатели адиабаты для процессов сжатия и расширения принимаются равными, и определяются по формуле:

$$K = \frac{C_{\text{pm}}^{\text{CM}} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}}}{C_{\text{vm}}^{\text{CM}} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}}}.$$

3.2. Расчет теоретического цикла ГТУ

3.2.1. Определение термических параметров узловых точек цикла ГТУ

1 точка: $T_1 = t_1 + 273,15;$ $V_1 = (R_{\text{CM}} \cdot T_1) / P_1.$

2 точка: $P_2 = P_1 \cdot \pi_k;$

$$V_2 = (R_{\text{CM}} \cdot T_2) / P_2; \quad T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}.$$

3 точка: $P_3 = P_2;$ $T_3 = t_3 + 273,15;$

$$V_3 = (R_{\text{CM}} \cdot T_3) / P_3.$$

4 точка: $P_4 = P_1;$ $V_4 = (R_{\text{CM}} \cdot T_4) / P_4;$ $T_4 = T_3 \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}.$

Промежуточные точки процесса 1-2:

$$\Delta P = (P_2 - P_1) / 4;$$

$$P_2' = P_1 + \Delta P; \quad V_2' = V_1 \cdot \left(\frac{P_2'}{P_1} \right)^{-\frac{1}{\kappa}};$$

$$P_2'' = P_2' + \Delta P; \quad V_2'' = V_1 \cdot \left(\frac{P_2''}{P_1} \right)^{-\frac{1}{\kappa}};$$

$$P_2''' = P_2'' + \Delta P; \quad V_2''' = V_1 \cdot \left(\frac{P_2'''}{P_1} \right)^{-\frac{1}{\kappa}}.$$

Промежуточные точки процесса 3-4:

$$\Delta P = (P_3 - P_4) / 4;$$

$$P_4' = P_3 - \Delta P ; \quad V_4' = V_3 \cdot \left(\frac{P_4'}{P_3} \right)^{-\frac{1}{k}} ;$$

$$P_4'' = P_4' - \Delta P ; \quad V_4'' = V_3 \cdot \left(\frac{P_4''}{P_3} \right)^{-\frac{1}{k}} ;$$

$$P_4''' = P_4'' - \Delta P ; \quad V_4''' = V_3 \cdot \left(\frac{P_4'''}{P_3} \right)^{-\frac{1}{k}} .$$

3.2.2. Определение калорических параметров узловых точек цикла ГТУ

$$1 \text{ точка: } S_1 = C_{pm}^{CM} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} \cdot \ln \left(\frac{T_1}{T_{\text{н.у.}}} \right) + R_{CM} \cdot \ln \left(\frac{P_1}{P_{\text{н.у.}}} \right) .$$

Условно принимаем нулевое значение внутренней энергии и энтальпии при 0 °К и нулевое значение энтропии - при нормальных условиях: давление 760 мм рт. ст. (101 325 Па), температура для газов, равная 273,15 К (0° С).

$$2 \text{ точка: } S_2 = S_1 .$$

$$3 \text{ точка: } S_3 = S_2 + C_{pm}^{CM} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} \cdot \ln \left(\frac{T_3}{T_2} \right) .$$

$$4 \text{ точка: } S_4 = S_3 .$$

Промежуточные точки процесса 2-3:

$$\Delta T = (T_3 - T_2)/4 ; \quad T_3' = T_2 + \Delta T ;$$

$$T_3'' = T_2 + 2\Delta T ; \quad T_3''' = T_2 + 3\Delta T ;$$

$$S_3' = S_2 + C_{pm}^{CM} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} \cdot \ln \left(\frac{T_3'}{T_2} \right) ;$$

$$S_3'' = S_2 + \Delta S_{2-3''} = S_2 + C_{pm}^{CM} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} \cdot \ln \left(\frac{T_3''}{T_2} \right) ;$$

$$S_3''' = S_2 + \Delta S_{2-3'''} = S_2 + C_{pm}^{CM} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} \cdot \ln \left(\frac{T_3'''}{T_2} \right) .$$

Промежуточные точки процесса 4-1:

$$\Delta T = (T_4 - T_1)/4 ; \quad T_1' = T_4 - \Delta T ;$$

$$T_1'' = T_4 - 2\Delta T; \quad T_1''' = T_4 - 3\Delta T;$$

$$S_1' = S_4 + C_{pm}^{CM} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} \cdot \ln \left(\frac{T_1'}{T_4} \right);$$

$$S_1'' = S_4 + \Delta S_{4-1''} = S_4 + C_{pm}^{CM} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} \cdot \ln \left(\frac{T_1''}{T_4} \right);$$

$$S_1''' = S_2 + \Delta S_{4-1'''} = S_4 + C_{pm}^{CM} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} \cdot \ln \left(\frac{T_1'''}{T_4} \right).$$

3.2.3. Определение энергетических характеристик цикла ГТУ

$$q_1 = C_{pm}^{CM} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} (t_3 - t_2); \quad q_2 = C_{pm}^{CM} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} (t_1 - t_4);$$

$$q_0 = |q_1| - |q_2|;$$

$$l_{\text{сж}} = k \cdot l_{\text{сж}}^{\text{ад}} = \frac{k}{k-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2) = \frac{R_{\text{см}} \cdot k}{k-1} (T_1 - T_2);$$

$$l_{\text{расш}} = \frac{R_{\text{см}} \cdot k}{k-1} (T_3 - T_4); \quad l_0 = |l_{\text{расш}}| - |l_{\text{сж}}|;$$

$$\eta_t^{\text{ГТУ}} = \frac{l_0}{q_1}; \quad \eta_t^{\text{ГТУ}} = \frac{q_0}{q_1};$$

$$h_t^{\text{ГТУ}} = 1 - \frac{1}{p^{\left(\frac{k-1}{k}\right)}} = 1 - p^{\left(\frac{1-k}{k}\right)};$$

$$N_{\text{ГТУ}} = \frac{l_0 \cdot G}{h_t}.$$

3.3. Расчет теоретического цикла ДВС

3.3.1. Определение термических параметров узловых точек цикла ДВС (со смешанным подводом теплоты)

1 точка: из цикла ГТУ.

2 точка: $V_2 = V_1/\epsilon; \quad P_2 = P_1 \cdot (V_1/V_2)^k = P_1 \cdot \epsilon^k;$

$$T_2 = T_1 \cdot (V_1/V_2)^{k-1} = T_1 \cdot \epsilon^{k-1}.$$

3 точка: $V_3 = V_2$; $P_3 = P_2 \cdot \lambda$; $T_3 = T_2 \cdot \lambda$.

4 точка: $P_4 = P_3$; $V_4 = V_3 \cdot \rho$; $T_4 = T_3 \cdot \rho$.

5 точка: $V_1 = V_5$; $P_5 = P_4 \cdot (V_4/V_5)^k$; $T_5 = P_5 \cdot V_5 / R_{\text{смеси}}$.

Промежуточные точки процесса 1-2:

$$\Delta P = (P_2 - P_1)/4;$$

$$P_2' = P_1 + \Delta P; \quad V_2' = V_1 \cdot \left(\frac{P_2'}{P_1} \right)^{-\frac{1}{k}};$$

$$P_2'' = P_1 + 2\Delta P; \quad V_2'' = V_1 \cdot \left(\frac{P_2''}{P_1} \right)^{-\frac{1}{k}};$$

$$P_2''' = P_1 + 3\Delta P; \quad V_2''' = V_1 \cdot \left(\frac{P_2'''}{P_1} \right)^{-\frac{1}{k}}.$$

Промежуточные точки процесса 4-5:

$$\Delta P = (P_4 - P_5)/4;$$

$$P_5' = P_4 - \Delta P; \quad V_5' = V_4 \cdot \left(\frac{P_5'}{P_4} \right)^{-\frac{1}{k}};$$

$$P_5'' = P_4 - 2\Delta P; \quad V_5'' = V_4 \cdot \left(\frac{P_5''}{P_4} \right)^{-\frac{1}{k}};$$

$$P_5''' = P_4 - 3\Delta P; \quad V_5''' = V_4 \cdot \left(\frac{P_5'''}{P_4} \right)^{-\frac{1}{k}}.$$

3.3.2. Определение калорических параметров состояния узловых точек цикла ДВС

1 точка: $S_1 = C_{pm}^{cm} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} \cdot \ln \left(\frac{T_1}{T_{\text{н.у.}}} \right) + R_{\text{см}} \cdot \ln \left(\frac{P_1}{P_{\text{н.у.}}} \right).$

2 точка: $S_1 = S_2$.

3 точка: $S_3 = S_2 + C_{vm}^{cm} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} \cdot \ln \left(\frac{T_3}{T_2} \right).$

4 точка: $S_4 = S_3 + C_{pm}^{cm} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} \cdot \ln \left(\frac{T_3}{T_4} \right).$

5 точка: $S_5 = S_4.$

Промежуточные точки процесса 2-3:

$$\Delta T = (T_3 - T_2)/4; \quad T_3' = T_2 + \Delta T;$$

$$T_3'' = T_2 + 2\Delta T; \quad T_3''' = T_2 + 3\Delta T;$$

$$S_3' = S_2 + C_{vm}^{cm} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} \cdot \ln \left(\frac{T_3'}{T_2} \right);$$

$$S_3'' = S_2 + \Delta S_{2-3'} = S_2 + C_{vm}^{cm} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} \cdot \ln \left(\frac{T_3''}{T_2} \right);$$

$$S_3''' = S_2 + \Delta S_{2-3''} = S_2 + C_{vm}^{cm} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} \cdot \ln \left(\frac{T_3'''}{T_2} \right).$$

Промежуточные точки процесса 3-4:

$$\Delta T = (T_4 - T_3)/4; \quad T_4' = T_3 + \Delta T;$$

$$T_4'' = T_3 + 2\Delta T; \quad T_4''' = T_3 + 3\Delta T;$$

$$S_4' = S_3 + C_{pm}^{cm} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} \cdot \ln \left(\frac{T_4'}{T_3} \right);$$

$$S_4'' = S_3 + C_{pm}^{cm} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} \cdot \ln \left(\frac{T_4''}{T_3} \right);$$

$$S_4''' = S_3 + C_{pm}^{cm} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} \cdot \ln \left(\frac{T_4'''}{T_3} \right).$$

Промежуточные точки процесса 5-1:

$$\Delta T = (T_5 - T_1)/4; \quad T_1' = T_5 - \Delta T;$$

$$T_1'' = T_5 - 2\Delta T; \quad T_1''' = T_5 - 3\Delta T;$$

$$S_1' = S_5 + C_{vm}^{cm} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} \cdot \ln \left(\frac{T_1'}{T_5} \right);$$

$$S_1'' = S_5 + C_{vm}^{CM} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} \cdot \ln \left(\frac{T_1''}{T_5} \right);$$

$$S_1''' = S_5 + C_{vm}^{CM} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} \cdot \ln \left(\frac{T_1'''}{T_5} \right).$$

3.3.3. Определение энергетических характеристик цикла ДВС (со смешанным подводом теплоты)

$$q_1^V = C_{vm}^{CM} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} (t_3 - t_2); \quad q_1^P = C_{pm}^{CM} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} (t_4 - t_3);$$

$$q_2^V = C_{vm}^{CM} \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} (t_5 - t_1); \quad q_0 = |q_1| - |q_2|;$$

$$l_{сж} = \frac{k}{k-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2) - V_2 (P_3 - P_2);$$

$$l_{расш} = \frac{k}{k-1} (P_4 V_4 - P_5 V_5) + V_1 (P_5 - P_1);$$

$$l_0 = |l_{расш}| - |l_{сж}|;$$

$$h_t^{ДВС} = 1 - \left\{ \frac{l \cdot r^k - 1}{(l-1) + k \cdot l(r-1)} \right\} \frac{1}{e^{k-1}};$$

$$h_t^{ДВС} = \frac{l_0}{q_1}; \quad h_t^{ДВС} = \frac{q_0}{q_1};$$

$$N_{ДВС} = \frac{l_0 \cdot G}{h_t^{ДВС}}.$$

4. УКАЗАНИЯ К ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

4.1. Построение отдельных термодинамических процессов и цикла в координатах P - V

4.1.1. Определив основные параметры в характерных точках цикла, можно приступить к построению отдельных процессов цикла в координатах P - V .

4.1.2. Перед тем, как начать построение процессов цикла необходимо выбрать масштабы давлений m_p , бар/мм и удельных объемов m_v , м³/(кг·мм).

Эти масштабы следует принять такими, чтобы получить высоту диаграммы, равной 1,5...1,8 ее основания.

4.1.3. Построение изохорного и изобарного процессов в координатах P - V не представляет особого труда – они будут представлены прямыми.

Сжатие или расширение рабочего тела в идеальных газовых циклах происходит, как правило, по адиабате.

4.1.4. Рассмотрим графическое построение этого процесса в координатах P и V (рис. 1).

В принятом масштабе на график наносятся параметры одной из точек процесса. Построение удобнее начинать с точки, соответствующей минимальному объему т.е. с начала расширения или с конца сжатия. Из начала координат проводится луч под произвольным углом α к оси абсцисс (этот угол рекомендуется принимать таким, чтобы тангенс угла его равнялся 0,3). К оси координат из начала координат проводится луч под углом β связанным с углом α зависимостью:

$$\operatorname{tg} \beta = (1 + \operatorname{tg} \alpha)^k - 1,$$

где k - показатель адиабаты сжатия и расширения.

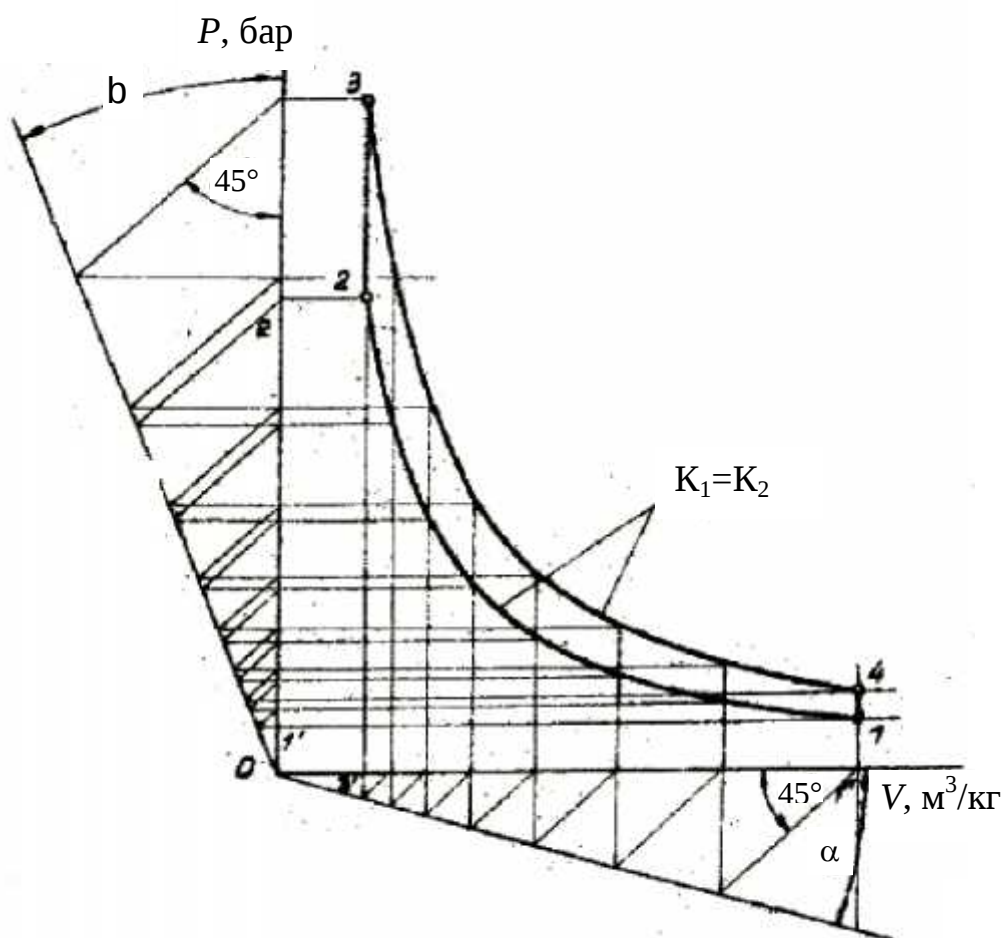


Рисунок 1— Пример графоаналитического построения цикла

Из точки, соответствующей концу сжатия или началу расширения (например, точки 2) проводятся две линии: одна - параллельно оси абсцисс до встречи с осью ординат, другая - параллельно оси ординат до встречи с лучом, проведенным к оси абсцисс. Из точки пересечения с осью ординат первой линии под углом 45° к оси ординат проводится линия до встречи с лучом, проведенным под углом b . Из полученной точки проводится горизонтальная прямая. Из точки пересечения второй прямой с лучом, проведенным под углом a , проводится прямая под углом 45° к оси абсцисс до встречи с ней, и из этой точки проводится вертикальная прямая до пересечения с ранее проведенной горизонтальной прямой. Эта точка лежит на адиабате сжатия. Из точки пересечения горизонтальной прямой с осью ординат вновь проводим прямую под углом 45° до пересечения с лучом, проведенным под углом b . Из точки пересечения проводим горизонтальную прямую до встречи с ординатой, проведенной с точки А и т.д.

4.1.5. Аналогичным образом строится и адиабата расширения. Построение адиабат сжатия и расширения может быть выполнено также аналитическим способом, с использованием уравнения адиабаты.

4.1.6. Для каждого из построенных процессов определяется графически величина внешней L и располагаемой L_0 работы, а для процессов сжатия и расширения - показатель адиабаты.

4.1.7. Определение работ L и L_0 рассмотрим на примере адиабатного процесса 1'-2'. Точки 1 и 2 начала и конца процесса проектируем на ось координат; проекции их обозначаем: 1 и 2 на оси абсцисс и 1'' и 2'' на оси ординат.

4.1.8. Внешняя работа выражается площадью фигуры, ограниченной осью абсцисс, крайними ординатами и кривой процесса т.е.

$$L = \text{пл.}(1-2-2'-1').$$

4.1.9. Располагаемая работа выражается площадью, ограниченной осью ординат, крайними абсциссами и кривой процесса т.е.

$$L_0 = \text{пл.}(1-2-2''-1'').$$

4.1.10. После построения отдельных процессов в координатах строится цикл путем переноса на график кривых каждого из процессов, составляющих цикл. Площадь замкнутой фигуры, ограниченной кривыми цикла, выражает работу газов за цикл.

$$L_{\text{ц}} = \text{пл.}(1-2-3-4).$$

4.2. Построение отдельных термодинамических процессов и цикла в координатах $T-S$

4.2.1. Наряду с аналитическими методами решения задач по термодинамическим процессам широко применяются графические методы. Наиболее рас-

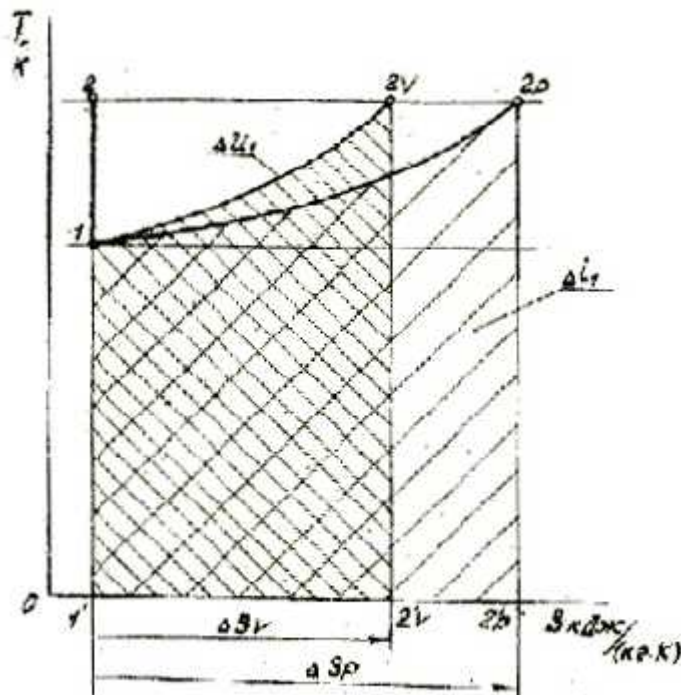


Рисунок 2 – Адиабатный процесс сжатия

пространственным из них является метод, основанный на использовании T - S диаграммы.

4.2.2. Метод графического решения задач рассмотрим на конкретном примере, приняв в качестве составляющих термодинамические процессы, составляющие цикл. При этом следует помнить, что диаграмма T - S строится по рассчитанным параметрам основных точек цикла.

Обычно при решении задач по термодинамическим процессам не требуется определять абсолютное значение энтропии для какого-либо состояния; достаточно определить только изменение энтропии в процессе; поэтому начало отсчета энтропии выбирают условно.

а) Адиабатный процесс сжатия 1-2 (рисунок 2)

4.2.3 Адиабатный процесс в координатах T - S изображается вертикальной прямой. Эта прямая проводится между точками 1 и 2, которые находятся по значениям температур T_1 и T_2 .

Построив адиабату 1-2 приступаем к построению изобары и изохоры в заданном для адиабаты интервале температур.

Для этого из точки 1, отложив значения $\Delta S_p = C_{pm}^{CM} \cdot \ln(T_1/T_2)$ и в сторону возрастания энтропии $\Delta S_v = C_{vm}^{CM} \cdot \ln(T_1/T_2)$ определяем положение точек $2p$ и $2v$.

Промежуточные точки кривых наносятся на график по значениям изменений энтропии ΔS , которые определяются из выражений:

$$\Delta S'_p = C_{pm}^{CM} \cdot \ln(T_2/T'_1) \text{ и } \Delta S'_v = C_{vm}^{CM} \cdot \ln(T_2/T'_1),$$

4.3.4. Отношение этих площадей равно термическому коэффициенту полезного действия цикла:

$$\eta_t = (1-2-3-4)/(2-3-1-1).$$

Общая компоновка графиков, оформление и их взаимное размещение приведены на рисунках 7, 9, 10, 11.

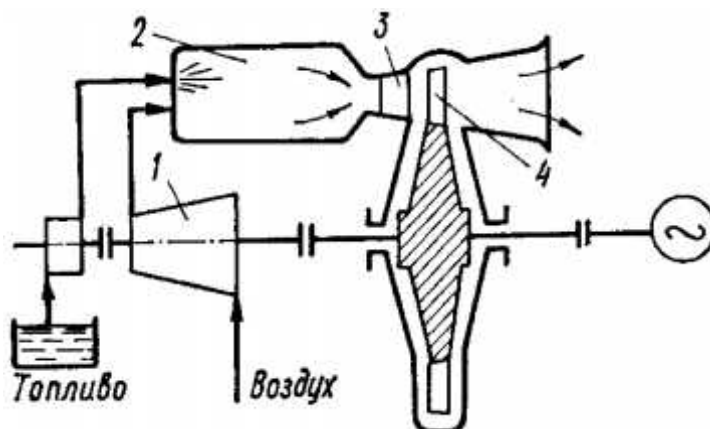


Рисунок 6 – Схема ГТУ: 1 – компрессор; 2 – камера сгорания; 3 – сопловой аппарат; 4 – рабочие лопатки турбины

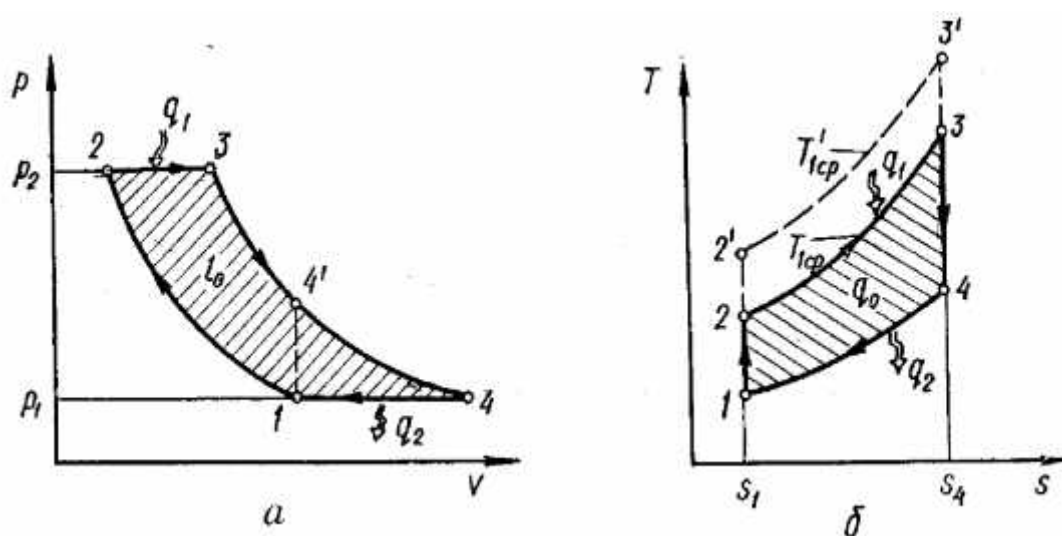


Рисунок 7 – Цикл ГТУ с изобарным подводом теплоты:
а – в $P-V$ координатах; б – в $T-S$ координатах

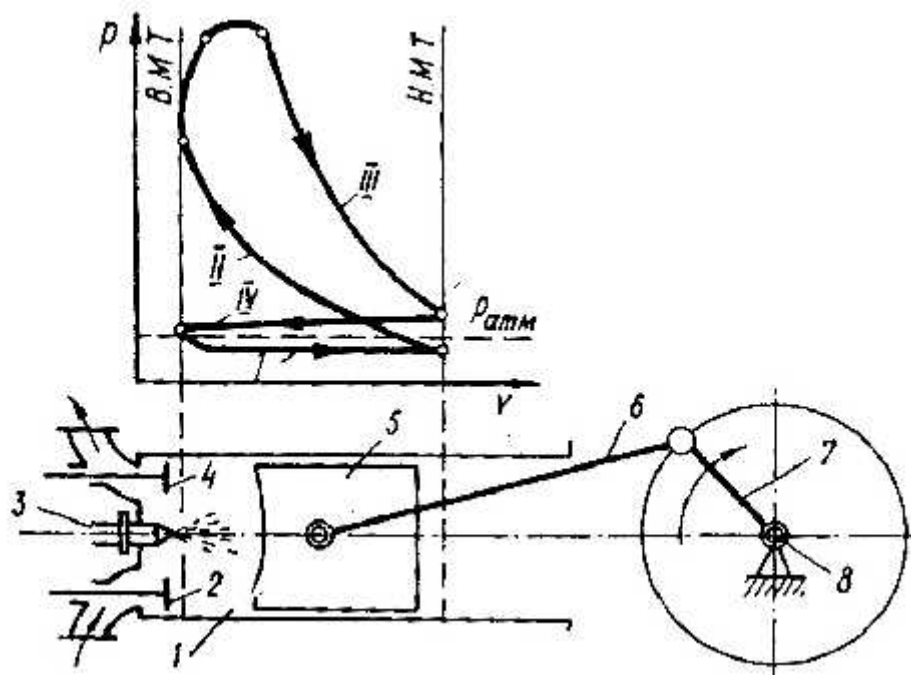


Рисунок 8 – Схема устройства и диаграмма рабочего процесса четырехтактного дизельного ДВС: 1 – рабочий цилиндр; 2 – впускной клапан; 3 – форсунка; 4 – выпускной клапан; 5 – поршень; 6 – шатун; 7 – кривошип; 8 – коленвал

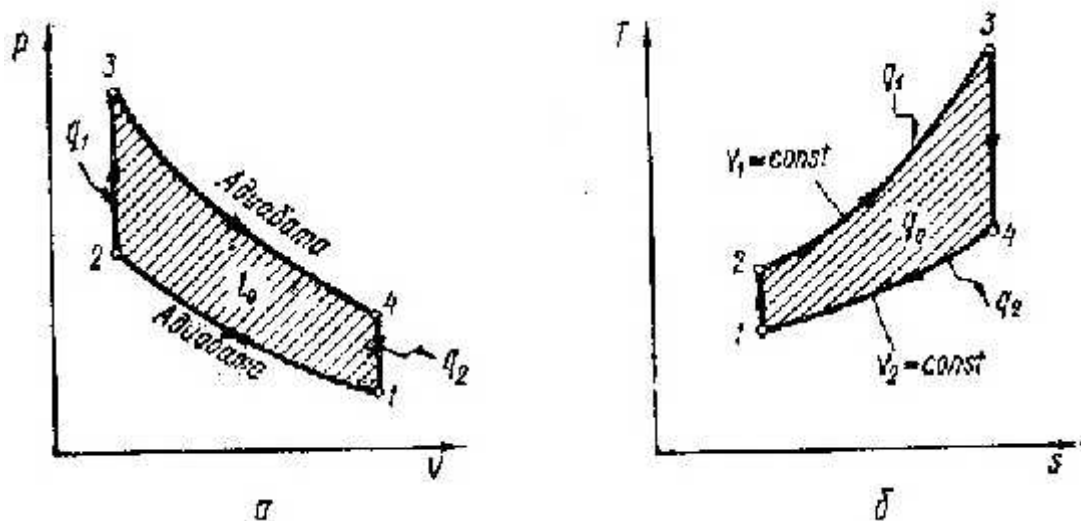


Рисунок 9 – Цикл ДВС с изохорным подводом теплоты:
а – в P - V координатах; б – в T - S координатах

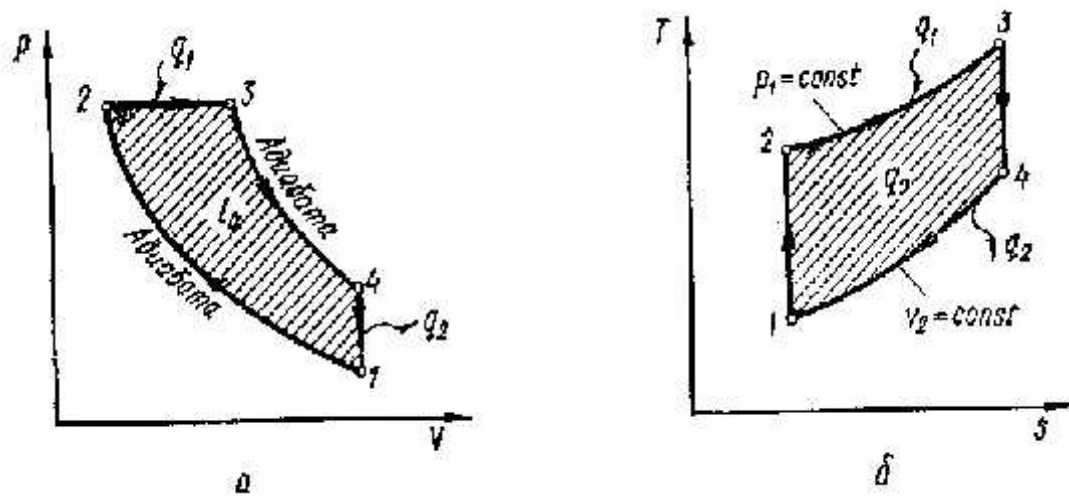


Рисунок 10 – Цикл ДВС с изобарным подводом теплоты:
 а – в P - V координатах; б – в T - S координатах

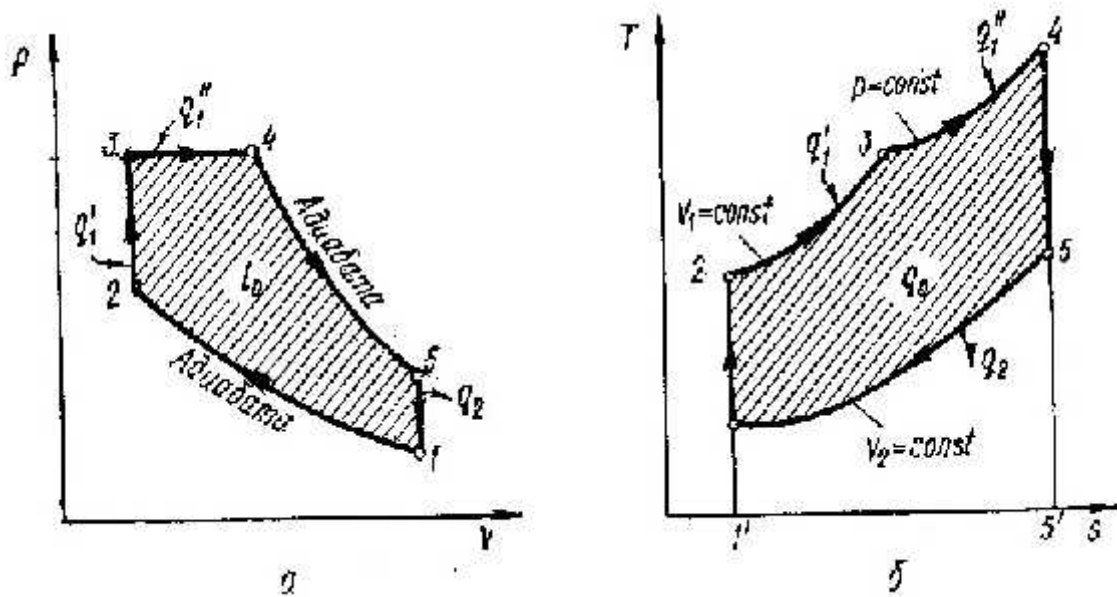


Рисунок 11 – Цикл ДВС со смешанным подводом теплоты:
 а – в P - V координатах; б – в T - S координатах

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудинов В.А. Техническая термодинамика / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов. – М.: Высшая школа. 2000.- 261 с.: ил.
2. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике / О.М. Рабинович. – М.: Машиностроение, 1969. – 375 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

(справочное)

Молекулярные массы, плотности и объемы киломолей при нормальных условиях и газовые постоянные важнейших газов

Вещество	Химическое обозначение	Молекулярная масса μ , кг/кмоль	Плотность ρ , кг/м ³	Объем киломоля ν , м ³ /кг	Газовая постоянная, Дж/(кг·град)
Воздух	-	28,96	1,293	22,40	287,0
Кислород	O ₂	32,00	1,429	22,39	259,8
Азот	N ₂	28,026	1,251	22,40	296,8
Атмосферный азот ¹	N ₂	28,16	(1,257)	(22,40)	(295,3)
Гелий	He	4,003	0,179	22,42	2078,0
Аргон	Ar	39,994	1,783	22,39	208,2
Водород	H ₂	2,016	0,090	22,43	4124,01
Оксид углерода	CO	28,01	1,250	22,40	296,8
Двуокись углерода	CO ₂	44,01	1,977	22,26	188,9
Сернистый газ	SO ₂	64,06	2,926	21,89	129,8
Метан	CH ₄	16,032	0,717	22,39	518,8
Этилен	C ₂ H ₄	28,052	1,251	22,41	296,6
Коксовый газ	-	11,50	0,515	22,33	721,0
Аммиак	NH ₃	17,032	0,771	22,08	488,3
Водяной пар ²	H ₂ O	18,016	(0,804)	(22,40)	(461)

¹ Атмосферный азот – условный газ, состоящий из азота воздуха вместе с двуокисью углерода и редкими газами, содержащимися в воздухе.

² Приведение водяного пара к нормальному состоянию является условным.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Интерполяционные формулы для средних массовых и объемных теплоемкостей газов

Газ	Массовая теплоемкость, кДж/(кг·град)	Объемная теплоемкость, кДж/(м ³ ·град)	Массовая теплоемкость, ккал/(кг·град)	Объемная теплоемкость, ккал/(м ³ ·град)
<i>В пределах от 0 до 1000 °C</i>				
O ₂	$c_{pm} = 0,9127 + 0,00012724t$ $c_{vm} = 0,6527 + 0,00012724t$	$c'_{pm} = 1,3046 + 0,00018183t$ $c'_{vm} = 0,9337 + 0,00018183t$	$c_{pm} = 0,2180 + 0,00003039t$ $c_{vm} = 0,1559 + 0,00003039t$	$c'_{pm} = 0,3116 + 0,00004343t$ $c'_{vm} = 0,2230 + 0,00004343t$
N ₂	$c_{pm} = 1,0258 + 0,00008382t$ $c_{vm} = 0,7289 + 0,00008382t$	$c'_{pm} = 1,2833 + 0,00010492t$ $c'_{vm} = 0,9123 + 0,00010492t$	$c_{pm} = 0,2450 + 0,00002002t$ $c_{vm} = 0,1741 + 0,00002002t$	$c'_{pm} = 0,3065 + 0,00002506t$ $c'_{vm} = 0,2179 + 0,00002506t$
CO	$c_{pm} = 1,0304 + 0,00009575t$ $c_{vm} = 0,7335 + 0,00009575t$	$c'_{pm} = 1,2833 + 0,00011966t$ $c'_{vm} = 0,9173 + 0,00011966t$	$c_{pm} = 0,2461 + 0,00002287t$ $c_{vm} = 0,1752 + 0,00002287t$	$c'_{pm} = 0,3077 + 0,00002858t$ $c'_{vm} = 0,2191 + 0,00002858t$
Воздух	$c_{pm} = 0,9952 + 0,00009349t$ $c_{vm} = 0,7084 + 0,00009349t$	$c'_{pm} = 1,2870 + 0,00012091t$ $c'_{vm} = 0,9161 + 0,00012091t$	$c_{pm} = 0,2377 + 0,00002233t$ $c_{vm} = 0,1692 + 0,00002233t$	$c'_{pm} = 0,3074 + 0,00002888t$ $c'_{vm} = 0,2188 + 0,00002888t$
H ₂ O	$c_{pm} = 1,8401 + 0,00029278t$ $c_{vm} = 1,3783 + 0,00029278t$	$c'_{pm} = 1,4800 + 0,00023551t$ $c'_{vm} = 1,1091 + 0,00023551t$	$c_{pm} = 0,4395 + 0,00006993t$ $c_{vm} = 0,3292 + 0,00006993t$	$c'_{pm} = 0,3535 + 0,00005625t$ $c'_{vm} = 0,2649 + 0,00005625t$
SO ₂	$c_{pm} = 0,6314 + 0,00015541t$ $c_{vm} = 0,5016 + 0,00015541t$	$c'_{pm} = 1,8472 + 0,00004547t$ $c'_{vm} = 1,4763 + 0,00004547t$	$c_{pm} = 0,1508 + 0,00003712t$ $c_{vm} = 0,1198 + 0,00003712t$	$c'_{pm} = 0,4412 + 0,00001086t$ $c'_{vm} = 0,3526 + 0,00001086t$
<i>В пределах от 0 до 1500 °C</i>				
H ₂	$c_{pm} = 14,2494 + 0,00059574t$ $c_{vm} = 10,1214 + 0,00059574t$	$c'_{pm} = 1,2803 + 0,00005355t$ $c'_{vm} = 0,9094 + 0,00005355t$	$c_{pm} = 3,4034 + 0,00014229t$ $c_{vm} = 2,4181 + 0,00014229t$	$c'_{pm} = 0,3058 + 0,00001279t$ $c'_{vm} = 0,2172 + 0,00001279t$
CO ₂	$c_{pm} = 0,8725 + 0,00024053t$ $c_{vm} = 0,6837 + 0,00024053t$	$c'_{pm} = 1,7250 + 0,00004756t$ $c'_{vm} = 1,3540 + 0,00004756t$	$c_{pm} = 0,2084 + 0,00005745t$ $c_{vm} = 0,1633 + 0,00005745t$	$c'_{pm} = 0,4120 + 0,00001136t$ $c'_{vm} = 0,3234 + 0,00001136t$

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

(справочное)

Пример оформления содержания пояснительной записки**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ****Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Севастопольский государственный университет»****Морской институт
Кафедра энергоустановок морских судов и сооружений****КУРСОВАЯ РАБОТА
по дисциплине
«Техническая термодинамика и теплопередача»
(часть 1 – техническая термодинамика)
на тему «Расчет теоретических циклов ДВС и ГТУ»****Выполнил студент группы**_____

Проверил_____**Севастополь
2019**

**Тимофеев В. А.
Владецкий О.В.**

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА
И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**

*Методические указания
к выполнению курсовой работы по дисциплине*

Издается в авторской редакции

Изд. № 28/19. Объем 1,75 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»