

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ТЕПЛОТЕХНИКА

Методические указания
к выполнению расчетно-графической работы
для студентов всех форм обучения направления
23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических
машин и комплексов

Севастополь
СевГУ
2020

УДК 621.1.016.7
Т34

Р е ц е н з е н т:

В.А. Очеретяный – к.т.н., доцент кафедры
«Энергоустановки морских судов и сооружений»

Составители: А.А. Харченко, А.С. Домнина

Т34 Теплотехника : методические указания к выполнению расчетно-графической работы / Сост. А.А. Харченко, А.С. Домнина ; Министерство науки и высшего образования РФ, Севастопольский государственный университет, Политехнический институт. – Севастополь: СевГУ, 2020. – 15 с. – Текст : электронный.

Целью методических указаний является оказание помощи обучающимся в освоении методики и получении практических навыков теплотехнических расчетов. Изложены требования к содержанию и оформлению работы, даны индивидуальные задания, изложена методика расчета, приведен перечень рекомендуемой литературы

Рекомендованы в качестве методических указаний для обучающихся направления 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов.

УДК 621.1.016.7

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры «Автомобильный транспорт», протокол № 6 от 27 мая 2020 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Общие требования к структуре и оформлению работы.....	4
2. Краткие теоретические сведения	5
3. Порядок выполнения	7
4. Пример расчета	11
5. Рекомендуемая литература	14
Приложение А	15

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по направлению 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов (уровень бакалавриата), утвержденного приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от № 1470 от 14.12.2015 г., и рабочей программой дисциплины «Теплотехника», в ходе изучения дисциплины у студентов должна быть сформирована общепрофессиональная компетенция ОПК-3 - готовность применять систему фундаментальных знаний для идентификации, формулирования и решения технических и технологических проблем эксплуатации транспортно-технологических машин и комплексов. Применительно к дисциплине «Теплотехника» это означает, в частности, знание знаниям, в частности: знание термодинамических процессов и циклов, используемых в тепловых машинах; умение анализировать процессы взаимного преобразования теплоты и работы, проводить теплотехнические измерения и расчеты, пользоваться соответствующими справочными материалами; навыки проведения теплотехнических расчетов.

Целью РГР является закрепление практических навыков и расширение теоретических знаний, полученных при изучении дисциплины.

1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СТРУКТУРЕ И ОФОРМЛЕНИЮ РАБОТЫ

Расчетно-графическая работа (РГР) должна содержать:

- титульный лист;
- заполненный студентом и подписанный преподавателем бланк задания (Приложение А);
- содержание;
- перечень сокращений, условных обозначений, символов, единиц, терминов;
- исходные данные для расчета;
- основную (аналитическую) часть с необходимыми графиками;
- выводы;
- список использованных источников;
- приложения (при необходимости).

Все графики должны иметь масштаб, промаркированные оси с указанием наименований и размерностей отображаемых величин.

Работа оформляется на листах формата А4, брошюруется и регистрируется в журнале учета у секретаря кафедры.

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Поршневые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) широко применяются на всех видах транспорта.

Рабочим телом в ДВС являются в начале воздух или смесь воздуха с топливом, а в конце — смесь газов, образовавшаяся при сгорании топлива. Теплота к рабочему телу подводится от сжигаемого топлива внутри цилиндров двигателя, в которых расширяющийся от нагревания газ перемещает поршень. Полученная газом энергия частично расходуется на совершение механической работы, а остальная часть отдается окружающей среде.

Из описания работы ДВС видно, что процессы, протекающие в нем, необратимы: имеются трение, теплообмен при конечной разности температур, изменение качественного и количественного состава рабочего тела при его сгорании и т. п., а цикл не замкнут, так как рабочее тело поступает извне и выбрасывается в атмосферу по окончании цикла.

Анализ сложных необратимых процессов ДВС не может быть проведен методами термодинамики, основанными на обратимости процессов. Стремление же выявить основные причины, влияющие на экономичность работы двигателей, оценить совершенство протекающих в них процессов привело к необходимости идеализации процессов и отождествления их с обратимыми термодинамическими.

При термодинамическом анализе циклов ДВС приняты следующие допущения, позволяющие идеализировать работу двигателя:

- преобразование теплоты в механическую энергию осуществляется в замкнутом объеме неизменным по количеству и качеству составом рабочего тела;

- теплоемкость рабочего тела остается постоянной;
- теплота к рабочему телу подводится от внешнего горячего источника, а не за счет сжигания топлива, а отводится к внешнему холодному источнику, а не выбросом в атмосферу.

- процессы сжатия и расширения происходят адиабатически;
- разность температур между источником теплоты и рабочим телом бесконечно мала.

- отсутствуют трение между элементами шатунно-поршневой группы и гидравлическое сопротивление в клапанах и подводящих трубопроводах;

Принятые допущения делают возможными сравнительно несложный анализ циклов ДВС и решение следующих практически важных задач:

- анализ влияния термодинамических параметров цикла на величину важнейших показателей цикла: термического КПД и среднего давления;
- сравнение различных теоретических циклов.

Большинство поршневых ДВС работают по циклу Отто и циклу Тринклера (циклу со смешанным подводом теплоты).

По циклу Отто (рисунок 1, а) работают двигатели с искровым зажиганием. В таких ДВС время сгорания очень мало, поэтому в цикле Отто принято, что подвод теплоты происходит при постоянном объеме.

По циклу со смешанным подводом теплоты (рисунок 1, б) работают современные дизельные двигатели. В нём часть теплоты q_1' подводится при постоянном объеме, часть q_1'' – при постоянном давлении.

Среднее давление цикла P_t (рисунок 1) представляет собой работу, полученную с единицы рабочего объема цилиндра $(V_a - V_c)$. Площади заштрихованных прямоугольников высотой P_t на рисунке 1 соответствуют работе, совершенной в соответствующих циклах, и численно равны площади замкнутого контура а-с-z-b для цикла Отто и а-с-z-z'-b для цикла со смешанным подводом теплоты.

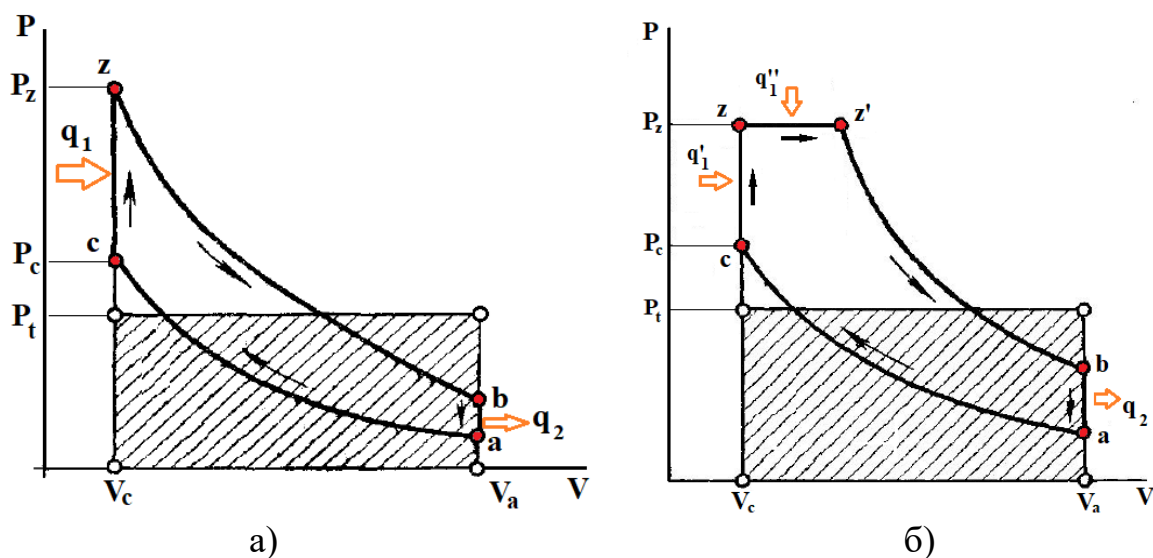


Рисунок 1 – Термодинамические циклы поршневых ДВС:
а – цикл Отто; б – цикл Тринклера

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ

Термодинамический анализ цикла ДВС рекомендуется выполнить в следующем порядке:

1) в соответствии с индивидуальным заданием (таблица 1) необходимо выбрать параметры термодинамического цикла и определиться с видом цикла. Номер варианта выбирается по сумме двух последних цифр зачетной книжки, давление P_a — в зависимости от предпоследней цифры. Степени сжатия ε выше 12 соответствует цикл со смешанным подводом теплоты.

2) Рассчитайте по формулам (таблица 2) термический КПД цикла, полезную удельную работу, удельное количество подведенной и отведенной теплоты, среднее давление цикла.

3) Постройте рассчитанный цикл в соответствующем масштабе в координатах P - V ;

4) Варьируя значение параметра ε и используя формулы таблицы 2, оцените влияние повышения степени сжатия на термический КПД цикла. Постройте соответствующий график, сделайте выводы о целесообразности и возможности практической реализации такого повышения.

5) Используя формулы в таблице 2, оцените влияние начального давления цикла P_a на среднее давление и удельную работу цикла. Постройте соответствующий график.

6) Сделайте общие выводы по работе.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета

№ варианта	P_a , МПа	T_a , К	V_a , дм ³	Степень сжатия, ε	степень повышения давления, λ	степень предварительного расширения, ρ	Рабочее тело
0	0,1X, где X – пред- последняя цифра зачетной книжки	273	0,40	8	3,2	1,0	Воздух с газовой постоянной $R=287$ Дж/(кг·К), показатель адиабаты $k=1,4$. Теплоемкость рабочего тела $c_p = 1,005$ кДж/кг
1		293	0,45	9	3,5	1,0	
2		263	0,50	10	4,0	1,0	
3		303	0,30	11	3,5	1,0	
4		298	0,35	13	1,8	1,3	
5		300	0,50	14	2,0	1,2	
6		253	0,55	16	2,2	1,4	
7		283	0,60	8	3,4	1,0	

Продолжение таблицы 1

№ варианта	P_a , МПа	T_a , К	V_a , дм ³	Степень сжатия, ε	степень повышения давления, λ	степень предваритель ного расширения, ρ	Рабочее тело
8	0,1X, где X – пред- последняя цифра зачетной книжки	303	0,70	9	3,6	1,0	Воздух с газовой постоянной $R=287$ Дж/(кг·К), показатель адиабаты $k=1,4$. Теплоемкость рабочего тела $c_p = 1,005$ кДж/кг
9		293	0,40	10	3,8	1,0	
10		278	0,35	11	4,0	1,0	
11		288	0,25	13	1,7	1,3	
12		298	0,35	14	1,9	1,2	
13		273	0,50	16	2,0	1,4	
14		268	0,70	8	3,3	1,0	
15		278	0,80	9	3,5	1,0	
16		288	0,45	10	3,7	1,0	
17		298	0,50	11	3,9	1,0	
18		303	0,55	13	1,6	1,3	
19		293	0,35	14	2,1	1,2	

Формулы для расчета показателей циклов сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Расчетные зависимости

	Цикл Отто	Цикл Тринклера
Степень сжатия	$\varepsilon = V_a / V_c$	
Степень предварительного расширения	$\rho = 1$	$\rho = V_z / V_c$
Степень повышения давления	$\lambda = P_z / P_c$	
Давление в характерных точках цикла	$P_c = P_a \varepsilon^k$	
	$P_z = P_a \lambda \cdot \varepsilon^k, P_{z'} = P_z$	
	$P_b = P_a \lambda$	$P_b = P_a \lambda \cdot \rho^k$
Давление в промежуточных точках адиабаты сжатия, P_i	$P_i = P_a \left(\frac{V_a}{V_i} \right)^k$	
Давление в промежуточных точках адиабаты расширения, P_i	$P_i = P_b \left(\frac{V_a}{V_i} \right)^k$	$P_i = P_b \left(\frac{V_b}{V_i} \right)^k$
Температура в характерных точках цикла	$T_c = T_a \varepsilon^{k-1}$	
	$T_z = T_c \lambda$	
	-	$T_{z'} = T_z \rho$
	$T_b = T_a \lambda$	$T_b = T_a \lambda \rho^k$
Подведенное количество теплоты	$q_1 = c_v (T_z - T_c)$	$q_1 = q_1' + q_1'' = c_v (T_z - T_c) + c_p (T_{z'} - T_z)$
Отведенное количество теплоты	$q_2 = c_v (T_b - T_a)$	

Продолжение таблицы 2

	Цикл Отто	Цикл Тринклера
Термический КПД цикла, η_t	$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$	$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \cdot \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)}$
Среднее давление цикла, P_t	$P_t = \frac{P_a \varepsilon^k (\lambda - 1)}{(k - 1)(\varepsilon - 1)} \eta_t$	$P_t = \frac{P_a \varepsilon^k (\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1))}{(k - 1)(\varepsilon - 1)} \eta_t$
Удельная работа цикла	$L_0 = P_a \frac{\varepsilon^k}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)}{k - 1} \eta_t$	$L_0 = P_a \frac{\varepsilon^k}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)}{k - 1} \eta_t$

4. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Выполним термодинамический анализ цикла ДВС со следующими параметрами: $P_a = 0,12$ МПа $T_a = 293$ К, $\varepsilon = 15$, $\lambda = 2,0$, $\rho = 1,25$, $V_a = 0,4$ дм³.

Значения степени сжатия, давления впуска и степени последующего расширения показывают, что двигатель с наддувом и работает по циклу со смешанным подводом теплоты.

Используя формулы таблицы 2, рассчитаем:

- термический КПД цикла

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \cdot \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)} = 1 - \frac{1}{15^{1,4-1}} \cdot \frac{2 \cdot 1,25^{1,4} - 1}{2 - 1 + 1,4 \cdot 2(1,25 - 1)} = 0,655$$

- полезную удельную работу

$$L_0 = P_a \frac{\varepsilon^k}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)}{k - 1} \eta_t = 0,12 \cdot 10^6 \frac{15^{1,4}}{15 - 1} \cdot \frac{2 - 1 + 1,4 \cdot 2 \cdot (1,25 - 1)}{1,4 - 1} \cdot 0,655 = 0,815 \text{ (МДж/кг)}.$$

Для того, чтобы рассчитать удельное количество подведенной и отведенной теплоты, необходимо найти температуры T_b , T_z , $T_{z'}$

$$T_b = T_a \lambda \rho^k = 293 \cdot 2 \cdot 1,25^{1,4} = 800,9 \text{ К.}$$

$$T_c = T_a \varepsilon^{k-1} = 293 \cdot 15^{1,4-1} = 865 \text{ К.}$$

$$T_z = T_c \lambda = 1731 \text{ К.}$$

$$T_{z'} = T_z \rho = 1731 \cdot 1,25 = 2164 \text{ К.}$$

Количество теплоты

$$q_1 = q_1' + q_1'' = c_v(T_z - T_c) + c_p(T_{z'} - T_z) = (1005 - 287)(1731 - 865) + 1005 \cdot (2164 - 1731) = 1\,056\,309 \text{ (Дж/кг)} \approx 1,056 \text{ (МДж/кг)}.$$

$$q_2 = c_v(T_b - T_a) = 718 \cdot (800,9 - 293) = 364\,591 \text{ (Дж/кг)} \approx 0,365 \text{ (МДж/кг)}.$$

Вычислив количество подведенной и отведенной теплоты, найдём значение термического КПД цикла, используя его определение

$$\eta_t = (q_1 - q_2) / q_1 = (1,056 - 0,365) : 1,056 = 0,655.$$

Значение термического КПД совпадает с ранее найденным.

Рассчитаем среднее давление цикла

$$P_t = \frac{P_a \varepsilon^k (\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1))}{(k-1)(\varepsilon - 1)} \eta_t = \frac{1,2 \cdot 10^6 \cdot 15^{1,4} (2 - 1 + 1,4 \cdot 2(1,25 - 1))}{(1,4 - 1)(15 - 1)} \cdot 0,655 = 1,057 \text{ (МПа)}.$$

Построим рассчитанный цикл в соответствующем масштабе в координатах P-V.

Для этого рассчитаем давление в основных точках цикла c, z, z', b .

$$P_c = P_a \varepsilon^k = 1,2 \cdot 10^6 \cdot 15^{1,4} = 5,318 \cdot 10^6 \text{ (Па)},$$

$$P_z = P_a \lambda \cdot \varepsilon^k = 1,2 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 15^{1,4} = 10\,635\,037 \text{ (Па)} \approx 10,64 \text{ (МПа)},$$

$$P_{z'} = P_z = 10,64 \text{ (МПа)},$$

$$P_b = P_a \lambda \cdot \rho^k = 1,2 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 1,25^{1,4} = 0,328 \text{ (МПа)}.$$

Затем по соответствующим формулам из таблицы 2 рассчитаем промежуточные точки на политропах сжатия и расширения, полученные результаты отразим на графике, рисунок 2, и в таблице 3.

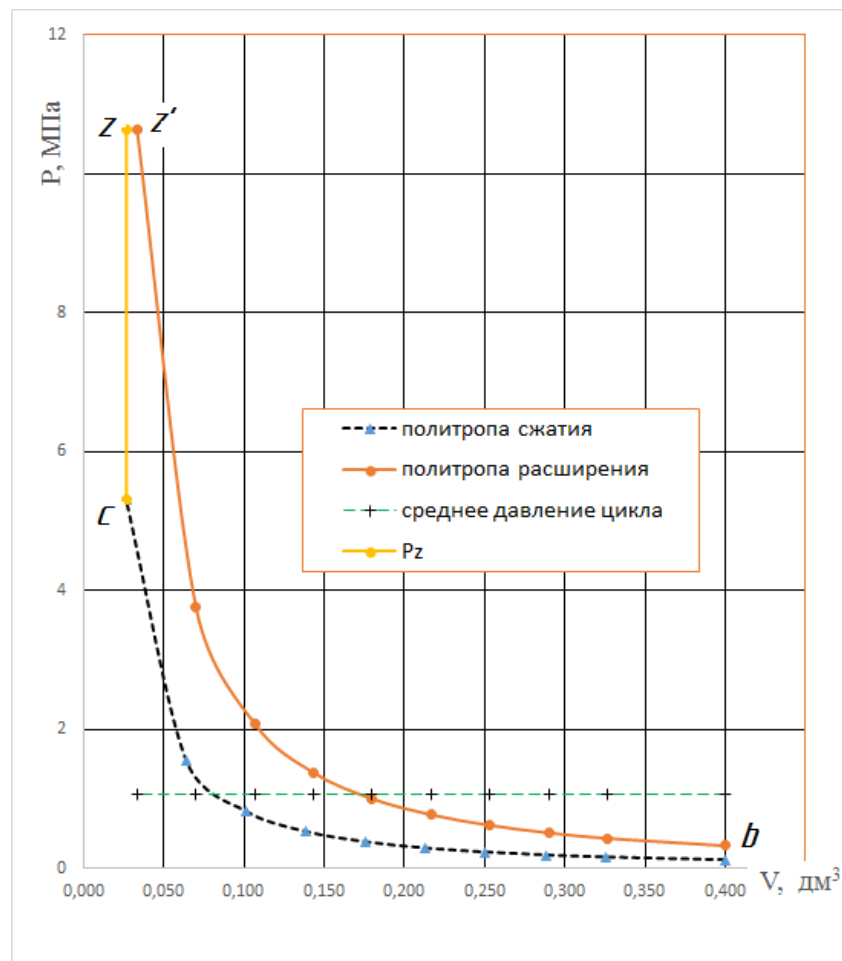


Рисунок 2 – Термодинамический цикл со смешанным подводом теплоты

Таблица 3 — Результаты расчета процессов сжатия и расширения

№ точки	Политропа сжатия		Политропа расширения	
	V, дм ³	P, МПа	V, дм ³	P, МПа
1	0,4000	0,120	0,400	0,328
2	0,3253	0,160	0,327	0,436
3	0,2880	0,190	0,290	0,515
4	0,2507	0,231	0,253	0,622
5	0,2133	0,289	0,217	0,774
6	0,1760	0,379	0,180	1,003
7	0,1387	0,529	0,143	1,380
8	0,1013	0,820	0,107	2,087
9	0,0640	1,561	0,070	3,764
10	0,0267	5,318	0,033	10,635

Оценим влияние повышения степени сжатия на термический КПД цикла.

При исходных начальных параметрах будем изменять значение параметра ε от 15 до 20 единиц. Результаты показаны в таблице 4 и на графике 3. Расчет показывает, что рост термического КПД по мере повышения степени сжатия рассматриваемом интервал замедляется приблизительно в 1,4 раза. При этом степень сжатия увеличивается в 1,333 раза, а КПД – в 1,06 раз. Таким образом, в данном случае существенное повышение степени сжатия приводит к незначительному росту КПД.

Таблица 4 — Результаты расчета влияния степени сжатия на термический КПД

ε	η_t	Абсолютное приращение η_t	Относительное приращение η_t , %
15,0	0,6548	-	-
15,5	0,6593	0,0045	0,69
16,0	0,6636	0,0043	0,65
16,5	0,6678	0,0041	0,62
17,0	0,6717	0,0039	0,59
17,5	0,6755	0,0038	0,56
18,0	0,6791	0,0036	0,54
18,5	0,6826	0,0035	0,52
19,0	0,6860	0,0034	0,49
19,5	0,6892	0,0032	0,47
20,0	0,6924	0,0031	0,45

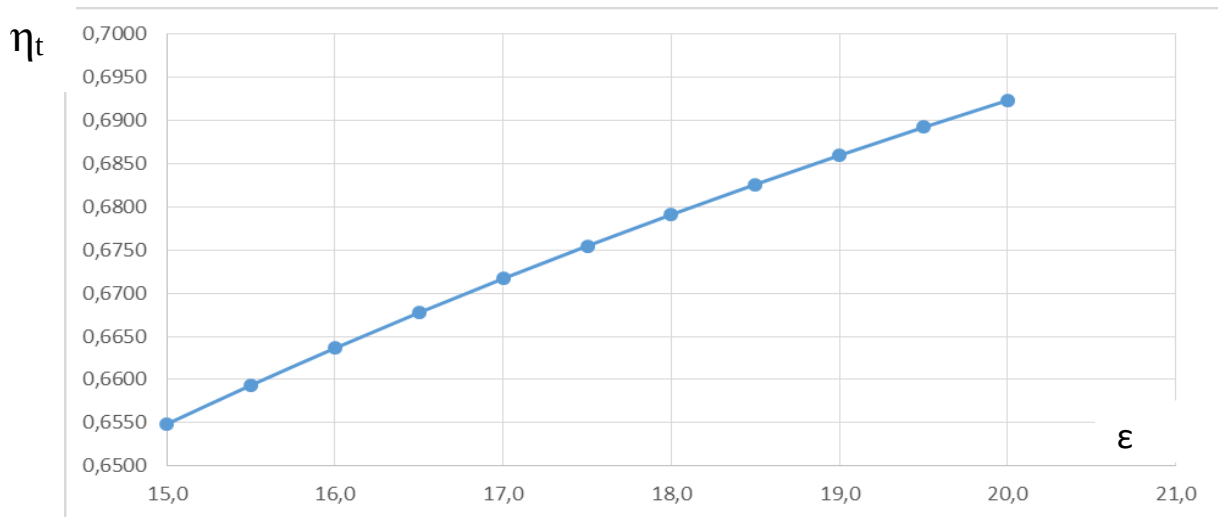


Рисунок 3 — Влияние степени сжатия ϵ на термический КПД η_t

Аналогично оценивается влияние начального давления цикла P_a на среднее давление и удельную работу цикла.

5. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Семенов, Ю.П. Техническая термодинамика [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ю.П. Семенов, А.Б. Левин. — Электрон. дан. — Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. — 156 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/104589>. — Загл. с экрана.
2. Цветков, О.Б. Термодинамика. Теплопередача [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие / О.Б. Цветков, Ю.А. Лаптев. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2013. — 54 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/71120>. — Загл. с экрана.
3. Теплотехника: Учеб. для вузов / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт и др.; под ред. А.П. Баскакова. — 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1991. — 224 с.
4. Замалеев, З.Х. Основы гидравлики и теплотехники [Электронный ресурс] : учебное пособие / З.Х. Замалеев, В.Н. Посохин, В.М. Чефанов. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2018. — 352 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/100922>. — Загл. с экрана.
5. Цирельман, Н.М. Техническая термодинамика [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н.М. Цирельман. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2018. — 352 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/107965>. — Загл. с экрана.

ПРИЛОЖЕНИЕ А**Бланк задания на расчетно-графическую работу**

Министерство науки и высшего образования РФ
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Политехнический институт

Кафедра «Автомобильный транспорт»

Дисциплина Теплотехника

Направление подготовки 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов

Курс 2 Группа ЭТ/б – 18-1-о Семестр 4

Задание на расчетно-графическую работу

Студенту _____
фамилия, имя, отчество

Номер зачетной книжки _____

Вариант _____

Тема работы Термодинамический анализ цикла поршневого ДВС

Задание: в соответствии с индивидуальным заданием рассчитать параметры цикла, найти КПД и удельную работу цикла, оценить возможность повышения КПД и удельной работы, сделать выводы.

Студент _____
(подпись)

Выдал: к.т.н., доцент _____ А.А. Харченко

Дата выдачи _____

ТЕПЛОТЕХНИКА

*Методические указания
к выполнению расчетно-графической работы*

*Составители: Харченко Андрей Александрович,
Домнина Анна Сергеевна*

В авторской редакции

Изд. № 221/2020. Объем 1 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»