

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»
Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота

Морской институт
Кафедра «Судовые энергетические установки»

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Методические указания
по выполнению РГР
для курсантов 26.03.01
«Управление водным транспортом и гидрографическое
обеспечение судоходства»
всех форм обучения

Калининград
Издательство БГАРФ
2022

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Содержание РГР.....	3
Описание теоретической части задания на РГР.....	3
Описание практического задания на РГР.....	4
Контрольные задания и критерии оценки РГР.....	20
Список использованных источников.....	30
Приложение	31

Введение

Основными целями и задачами дисциплины «Транспортная энергетика» и индикаторами достижения компетентности являются:

- знание основных законов технической термодинамики и теории теплообмена, необходимых для расчета и анализа работы теплоэнергетического оборудования;
- расчет параметров и анализ термодинамических циклов энергетических установок и тепловых двигателей, знание устройства и принципа действия транспортных энергетических устройств (ПКР-5.2);

В результате изучения данной дисциплины курсант (студент) должен:

- уметь осуществлять расчеты термодинамических процессов, производить выбор оптимальных параметров работы теплоэнергетических устройств;
- владеть методиками расчета термодинамических характеристик энергетических агрегатов.

Содержание РГР

В Методических указаниях по темам дисциплины «Транспортная энергетика» приводятся примеры решения задач по темам «Уравнению состояния идеального газа», «Нахождение основных параметров работы в термодинамических процессах», «Основы теории теплообмена», «Идеальные циклы тепловых машин», «Расчеты параметров, характеризующие работу тепловых машин».

В разделе Контрольные задания в таблице №1 курсант (студент) по номеру зачетной книжки (две последние цифры) должен выбрать номер задачи и номер варианта в этой задаче. Курсант (студент) РГР выполняет самостоятельно на отдельных листах.

Расчёты проводятся с использованием единиц измерения системы СИ. В отдельных случаях используются внесистемные единицы. Сведения о них даны в Приложении 1.

Описание теоретической части задания на РГР

В теории тепловых машин важное место занимают темы: «Термодинамические процессы и циклы идеальных тепловых машин» и «Основы теории теплообмена». Одной из задач термодинамики является установление связей между параметрами состояния рабочих тел и функциями состояния, а так же нахождение теплоты и работы в термодинамических процессах. Решение задач по данным темам позволяет Курсантам (студентам) закрепить знания, полученные на лекциях, об основных соотношениях, связывающих параметры состояния рабочего тела (давление, объём, температуру) и функции состояния (внутреннюю энергию, энтальпию, энтропию), а так же работу и теплоту процессов, протекающих в рабочей камере тепловой машины, при переходе рабочего тела из одного равновесного состояния в другое. Опыт проведения расчётов тех или иных физических величин в равновесных термодинамических процессах позволит в дальнейшем использовать полученные знания для определения работы за цикл той или иной тепловой машины, а затем для нахождения термического КПД машины. Полученные значения КПД служат ориентиром для изобретателей и конструкторов при совершенствовании данного типа тепловых машин. Теплообмен в рабочих телах тепловых машин, между рабочим телом и внешней средой (в том числе и через стенки), играет исключительно важную роль. Расчёты основных величин, используемых в теории теплообмена, позволяют получить сведения о видах процессов обмена теплом, протекающих между газом и внешней средой.

В реальных ДВС для нахождения основных параметров двигателей используется метод индцирования, позволяющий опытным путём определить эффективную мощность,

вращающий момент, работу за цикл, что позволяет рассчитать индикаторную мощность, КПД и др.

Описание практического задания на РГР

Тема 1: «Уравнение состояния идеального газа»

Задача №1. Найти плотность ρ и удельный объём ν газообразного хлора, находящегося в сосуде при давлении $P = 410$ кПа и температуре $t = 600^\circ\text{C}$. Молярная масса хлора $\mu = 71$ кг/кмоль.

Решение: Плотность определяется как величина, численно равная массе вещества, заключённой в единице объёма: $\rho = m / V$.

Параметры состояния идеального газа (плотность ρ , объём V и масса m) связаны уравнением Менделеева –Клапейрона: $P \cdot V = m / \mu \cdot R \cdot T$.

Уравнение можно переписать в виде: $P = (m \cdot R \cdot T) / (\mu \cdot V) = (\rho \cdot R \cdot T) / \mu$. Отсюда плотность: $\rho = (P \cdot \mu) / (R \cdot T)$.

В формулу входят:

- абсолютная температура Кельвина: $T\text{K} = t^\circ\text{C} + 273,15 = (t + 273)^\circ\text{K}$;

- универсальная газовая постоянная $R = 8314$ Дж/кмоль·град и

- молярная масса μ .

Проведём расчёты плотности хлора при заданных условиях:

$\rho = (410 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot 71 \text{ кг/кмоль}) / (8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град} \cdot 333 \text{ К}) = 10,51 \text{ кг/м}^3 \approx 10,5 \text{ кг/м}^3$.

$\text{Па} = \text{н/м}^2$; $\text{Дж} = \text{н} \cdot \text{м}$; отсюда $\text{Па} \cdot \text{м}^3 = \text{Дж}$.

Удельный объём $\nu = 1 / \rho = 0,0952 \text{ м}^3/\text{кг} = 0,1 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Ответ: $\rho = 10,5 \text{ кг/м}^3$; $\nu = 0,1 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Тема 2 «Нахождение основных параметров работы в термодинамических процессах»

В термодинамике изучаются четыре основных процесса перехода термодинамической системы (рабочего тела) из одного равновесного состояния в другое: изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный.

1. Процесс изохорный

Задача №2. В сосуде ёмкостью $V=800$ л содержится азот под давлением $P_1=3\text{МПа}$ и при температуре $t_1 = 80^\circ\text{C}$. Молярная масса азота $\mu = 28$ кг/кмоль. *Определить* количество теплоты, которое надо отвести от азота, чтобы понизить его давление при постоянном объёме до $P_2 = 300$ кПа. Необходимо также найти неизвестные параметры, функции состояния и работу процесса.

Решение:

а) Для нахождения неизвестных параметров состояния (P , V и T) используется уравнение процесса. Его можно получить, если записать уравнение Менделеева-Клапейрона для двух равновесных состояний газа:

$$P_1 \cdot V_1 = (m / \mu) \cdot (R \cdot T_1);$$

$P_2 \cdot V_2 = (m / \mu) \cdot (R \cdot T_2)$ и поделить первое уравнение на второе: $(P_1 \cdot V_1) / (P_2 \cdot V_2) = T_1 / T_2$.

Примечание:

это уравнение используется в трёх процессах: изохорном, изобарном и изотермическом.

Для изохорного процесса объёмы одинаковы и их можно сократить. Уравнение изохорного процесса: $P_1 / P_2 = T_1 / T_2$ или $P_2 / P_1 = T_2 / T_1$.

Из него можно найти неизвестное значение температуры T_2 .

$$T_2 = P_2 / P_1 \cdot T_1 = 300 \text{ кПа} / 3000 \text{ кПа} \cdot 353 \text{ К} = 35,3 \text{ К}.$$

б) В термодинамических процессах важное значение играют не сами функции состояния (внутренняя энергия, энтропия, энтальпия и др.), а их изменения в ходе того или иного термодинамического процесса.

в) Изменение внутренней энергии для идеального газа определяется следующим выражением: $\Delta U = (m / \mu) \cdot (C_v^\mu \cdot \Delta t)$.

Величину $C_v^\mu = 5/2 \cdot R$ (для двухатомных идеальных газов) называют молярной изохорной теплоёмкостью. Для одноатомных газов $C_v^\mu = 3/2 \cdot R$, для 3-х атомных газов $C_v^\mu = 3 \cdot R$.

$\Delta t^\circ\text{C} = \Delta T\text{K} = (T_2^0 - T_1^0) = (t_2^0 - t_1^0)$ - разница температур в градусах Цельсия и Кельвина одинакова.

Входящая в уравнение масса газа или известна, или её определяют из уравнения Менделеева-Клапейрона, записанного для начального состояния: $P_1 \cdot V_1 = (m / \mu) \cdot (R \cdot T_1)$.

Масса газа в сосуде: $m = (P_1 \cdot V_1 \cdot \mu) / (R \cdot T_1) = (3 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 0,8 \text{ м}^3 \cdot 28 \text{ кг/кмоль}) / (8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град} \cdot 353 \text{ град}) = 0,022897 \cdot 10^3 \text{ кг} = 23 \text{ кг}$.

$$\text{Па} \cdot \text{м}^3 = \text{Дж}$$

Изменение внутренней энергии: $\Delta U = (m / \mu) \cdot (C_v^\mu \cdot \Delta t)$;

$$\Delta U = 23 \text{ кг} / 28 \text{ кг/кмоль} \cdot 2,5 \cdot 8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град} \cdot (35,3 \text{ К} - 353 \text{ К}) =$$
$$= - 5424,2 \cdot 10^3 \text{ Дж}$$

$$\Delta U = - 54 \cdot 10^5 \text{ Дж} = - 5,4 \text{ МДж}$$

д) Изменение энтропии для газа определяется выражениями:

$$\Delta S = (m / \mu) \cdot (C_v^\mu \cdot \ln T_2 / T_1) + (m / \mu) \cdot (R \cdot \ln V_2 / V_1);$$

$$\Delta S = (m / \mu) \cdot (C_p^\mu \cdot \ln T_2 / T_1) - (m / \mu) \cdot (R \cdot \ln P_2 / P_1);$$

$$\Delta S = (m / \mu) \cdot (C_v^\mu \cdot \ln P_2 / P_1) + (m / \mu) \cdot (R \cdot \ln V_2 / V_1).$$

Молярная изобарная теплоёмкость: $C_p^\mu = C_v^\mu + R$.

В зависимости от процесса и известных параметров состояния выбирают одну из формул.

Для *изохорного* процесса можно взять первую или третью формулы. Здесь $\ln (V_2 / V_1) = \ln 1 = 0$.

Предпочтительнее третья формула, так как значения давлений заданы. $\Delta S = (m / \mu) \cdot (C_p^\mu \cdot \ln P_2 / P_1) = (23 \text{ кг} / 28 \text{ кг/кмоль}) \cdot (2,5 \cdot 8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град}) \cdot \ln (300 \text{ кПа} / 3000 \text{ кПа})$;

$$\Delta S = - 39,313 \cdot 10^3 \text{ Дж град} = - 39 \text{ кДж/град}$$

е) Работа по изменению объёма определяется следующим образом:

$$L = \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dV$$

Для *изохорного* процесса $dV = 0$ и $L = 0$.

ж) Теплота процесса определяется из первого начала термодинамики:

$$Q = \Delta U + L$$

Для *изохорного* процесса: $Q = \Delta U = - 5,4 \text{ МДж}$.

з) Теплоёмкость процесса, по определению $C_x = (\delta Q / dT)$;

x - общее обозначение процесса.

Для *изохорного* $x = v$, для *изобарного* $x = p$, для *изотермического* $x = t$, для *адиабатного* $x = s$.

В *адиабатном* процессе энтропия постоянна, поэтому его ещё называют *изоэнтропным* ($s = \text{const}$).

2. Процесс изотермический

Задача №3. В результате изотермического процесса 26 кг воздуха переводится из одного состояния с параметрами $P_1 = 10^5 \text{ Па}$, $V_1 = 22,3 \text{ м}^3$, $t_1^0 = 27^\circ\text{C}$ в другое с параметрами $P_2 = 41,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $t_2^0 = 27^\circ\text{C}$. Определить неизвестные значения термодинамических параметров, изменения внутренней энергии, энтропии, а также теплоту и работу процесса. Молярная масса газа $\mu = 29 \text{ кг/кмоль}$.

Решение:

а) Для нахождения неизвестных параметров состояния (P , V и T) используется уравнение процесса. Его получают, записывая уравнение Менделеева-Клапейрона для двух равновесных состояний газа: $P_1 \cdot V_1 = (m / \mu) \cdot (R \cdot T_1)$; $P_2 \cdot V_2 = (m / \mu) \cdot (R \cdot T_2)$.

Поделив первое уравнение на второе, получаем: $(P_1 \cdot V_1) / (P_2 \cdot V_2) = T_1 / T_2$. Для изотермического процесса температуры одинаковы и их можно сократить. Получаем уравнение процесса: $(P_1 \cdot V_1) / (P_2 \cdot V_2) = 1$; $P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$.

Неизвестные значения конечного объёма: $V_2 = (P_1 \cdot V_1) / P_2 = (1 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 22,3 \text{ м}^3) / 41,5 \cdot 10^5 \text{ Па} = 0,537 \text{ м}^3 = 0,54 \text{ м}^3$.

Остальные параметры известны.

б) Изменение внутренней энергии: $\Delta U = (m / \mu) \cdot (C_v^\mu \cdot \Delta t) = 0$, так как изменение температуры равно нулю.

в) Для нахождения изменения энтропии используем выражение:

$\Delta S = [(m / \mu) \cdot (C_p^\mu \cdot \ln T_2 / T_1) - (m / \mu) \cdot (R \cdot \ln P_2 / P_1)] = - (m / \mu) \cdot (R \cdot \ln P_2 / P_1)$, так как первое слагаемое равно нулю ($\ln T_2 / T_1 = \ln 1 = 0$).

$\Delta S = - (m / \mu) \cdot (R \cdot \ln P_2 / P_1) = - (26 \text{ кг} / 29 \text{ кг/кмоль}) \cdot 8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град} \cdot \ln (41,5 \cdot 10^5 / 1 \cdot 10^5)$;

$\Delta S = - 27771 \text{ Дж/град} = - 28 \text{ кДж/град}$.

г) Работа в изотермическом процессе: $L = \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dV$.

Для нахождения интеграла необходимо знать зависимость объёма от давления. Заменяем давление через объём, используя уравнение Менделеева – Клапейрона: $P = [(m / \mu) \cdot (R \cdot T)] / V$.

В этом выражении делимое является постоянной величиной и его можно вынести за знак интеграла: $L = \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dV = (m / \mu) \cdot (R \cdot T) \int_{V_1}^{V_2} (dV / V) = (m / \mu) \cdot (R \cdot T \ln V_2 / V_1)$.

$L = (26 \text{ кг} / 29 \text{ кг/кмоль}) \cdot (8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град} \cdot 300 \text{ К} \cdot \ln (0,54 \text{ м}^3 / 22,3 \text{ м}^3)$;

$L = - 8,3203 \cdot 10^6 \text{ Дж} = - 8,3 \text{ МДж}$.

д) Теплота процесса: $Q = \Delta U + L = - 8,0 \text{ МДж}$.

Теплоёмкость изотермического процесса, по определению, равна ∞ .

$C_x = (\delta Q / dT)$; $dT = 0$ и $C_T = (\delta Q / 0) = \infty$.

3. Процесс изобарный

Задача № 4. 1 кг воздуха с начальным давлением $P_1 = 5 \text{ МПа}$ и начальной температурой $t_1 = 350^\circ \text{C}$ сжимается изобарно до $V_2 = 4 \text{ л}$. Молярная масса воздуха $\mu = 29 \text{ кг/кмоль}$. Определить неизвестные параметры и функции состояния, а так же работу и теплоту процесса.

Решение:

а) Находим неизвестные параметры состояния газа. Уравнение изобарного процесса имеет вид: $(P_1 \cdot V_1) / (P_2 \cdot V_2) = T_1 / T_2$;

При равенстве давлений: $V_1 / V_2 = T_1 / T_2$.

Из него следует, что при постоянном давлении уменьшение объёма приводит к уменьшению температуры. Отсюда можно найти только один параметр, например T_2 . Начальные значения параметров идеальных газов, как правило, находят из уравнения Менделеева-Клапейрона.

Так, начальный объём: $V_1 = [(m / \mu) / P_1] \cdot (R \cdot T_1) = [(1 \text{ кг} / 29 \text{ кг/кмоль}) / 5 \cdot 10^6 \text{ Па}] \cdot (8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град} \cdot 623 \text{ К})$;

$V_1 = 0,035722 \text{ м}^3 = 0,036 \text{ м}^3$.

Зная V_1 , можно найти значение температуры газа во втором состоянии: $T_2 = (V_2 / V_1) \cdot T_1 = (0,004 \text{ м}^3 / 0,036 \text{ м}^3) \cdot 623 \text{ К} = 69 \text{ К}$.

б) Изменение внутренней энергии:

$\Delta U = (m / \mu) \cdot (C_v^\mu \cdot \Delta t)$;

$\Delta U = (m / \mu) \cdot (C_v^\mu \cdot \Delta t) = (1 \text{ кг} / 29 \text{ кг/кмоль}) \cdot 2,5 \cdot 8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град} \cdot (69 \text{ К} - 623 \text{ К})$;

$\Delta U = - 397065 \text{ Дж} = - 400000 \text{ Дж} = - 400 \text{ кДж}$.

в) Изменение энтропии для изобарного процесса можно взять в форме:

$\Delta S = (m / \mu) \cdot [(C_v \mu \cdot \ln P_2 / P_1) + (m / \mu) (R \cdot \ln V_2 / V_1) - (m / \mu) \cdot (R \cdot \ln V_2 / V_1)]$. Первое слагаемое равно нулю.

$$\Delta S = (1 \text{ кг} / 29 \text{ кг/кмоль}) \cdot (8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град} \cdot \ln 0,004 \text{ м}^3 / 0,036 \text{ м}^3) = - 629,92 \text{ Дж/град} = - 630 \text{ Дж/град}.$$

г) Работа в изобарном процессе:

$$L = \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dV = P \cdot (V_2 - V_1).$$

Давление $P = \text{const}$, поэтому его можно вынести за знак интеграла, а $\int_{V_1}^{V_2} dV = (V_2 - V_1)$.

$$L = 5 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot (0,004 - 0,036) \text{ м}^3;$$

$$L = - 0,16 \cdot 10^6 \text{ Дж} = - 160 \text{ кДж} = - 0,16 \text{ МДж}.$$

д) Теплота процесса: $Q = \Delta U + L = - 400 \text{ кДж} + (- 160 \text{ кДж}) = - 560 \text{ кДж} = - 0,56 \text{ МДж}$.

Молярная изобарная теплоёмкость для идеальных газов: $C_p^m = C_v^m + R$.

Для воздуха: $C_p^m = 5/2 \cdot R + R = 3,5 \cdot 8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град} = 29099 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град}$.

$$C_p^m = 29100 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град} = 29,1 \text{ кДж/кмоль} \cdot \text{град}.$$

4. Процесс адиабатный

Задача № 5. 2 кг воздуха с начальным давлением $P_1 = 5 \text{ МПа}$ и начальной температурой $t_1 = 350^\circ\text{C}$ расширяются адиабатно до давления $P_2 = 10 \text{ кПа}$. Определить объём газа в начальном и конечном состояниях, конечную температуру, изменения внутренней энергии, энтропии, а так же работу расширения (изменения объёма). Воздух считать идеальным газом.

Решение:

а) Неизвестные параметры состояния газа в адиабатном процессе находятся из уравнения Пуассона. Его можно записать следующим образом:

$P_1 \cdot V_1^\gamma = P_2 \cdot V_2^\gamma$; $\gamma = 1,4$ –показатель адиабаты для идеального газа. Используя уравнение Менделеева-Клапейрона можно получить и другие формулы для связи параметров состояния:

$$T_1 \cdot V_1^{(\gamma-1)} = T_2 \cdot V_2^{(\gamma-1)}; T_1 \cdot P_1^{(1-\gamma)/\gamma} = T_2 \cdot P_2^{(1-\gamma)/\gamma}.$$

Во всех трёх формулах объём и давление возводятся в степень.

Объём газа в начальном состоянии:

$$V_1 = [(m / \mu) / P_1] \cdot (R \cdot T_1);$$

$$V_1 = [(2 \text{ кг} / 29 \text{ кг/кмоль}) / (5 \cdot 10^6 \text{ Па})] \cdot (8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град} \cdot 623 \text{ К}) = 0,07144 \text{ м}^3.$$

$$V_1 = 0,071 \text{ м}^3. \text{ Дж} = \text{Па} \cdot \text{м}^3.$$

Значения конечного объёма можно найти из формулы Пуассона в виде: $P_1 \cdot V_1^\gamma = P_2 \cdot V_2^\gamma$; $(V_2 / V_1)^\gamma = P_1 / P_2$.

Чтобы найти V_2 , надо освободиться от степени. С этой целью необходимо обе части уравнения возвести в степень $1 / \gamma$; получаем $V_2 / V_1 = (P_1 / P_2)^{1/\gamma}$.

$$V_2 = V_1 \cdot (P_1 / P_2)^{1/\gamma} = 0,071 \text{ м}^3 \cdot (5000 \text{ кПа} / 10 \text{ кПа})^{1/1,4} = 0,071 \text{ м}^3 \cdot (500)^{0,714}.$$

$$V_2 = 0,071 \text{ м}^3 \cdot 84,54 = 6,0024 \text{ м}^3 = 6,0 \text{ м}^3.$$

Конечное значение температуры воздуха можно найти из уравнения:

$$T_1 \cdot V_1^{\gamma-1} = T_2 \cdot V_2^{\gamma-1};$$

$$T_2 = T_1 \cdot (V_1 / V_2)^{\gamma-1} = 623 \text{ К} \cdot (0,071 \text{ м}^3 / 6,0 \text{ м}^3)^{0,4} = 623 \text{ К} \cdot 0,17 = 106 \text{ К}.$$

б) Изменение внутренней энергии:

$$\Delta U = (m / \mu) \cdot (C_v^m \cdot \Delta t);$$

$$\Delta U = (2 \text{ кг} / 29 \text{ кг/кмоль}) \cdot (2,5 \cdot 8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град}) \cdot (106 \text{ К} - 623 \text{ К}); \Delta U = - 741093 \text{ Дж} = - 740000 \text{ Дж} = - 740 \text{ кДж}.$$

в) В адиабатном процессе тепло не подводится и не отводится от воздуха в сосуде, $Q = 0$. Изменение энтропии, по определению, $(dS = \delta Q / dT = 0)$ так же равно нулю: $\Delta S = 0$.

г) Работу можно найти из первого начала термодинамики:

$$L = - \Delta U = - (- 740 \text{ кДж}) = 740 \text{ кДж}. \text{ При адиабатном расширении работа имеет положительное значение}.$$

Теплоёмкость адиабатного процесса равна нулю:

$$C_s = (\delta Q / dT) = 0 / dT = 0, \text{ так как } \delta Q = 0.$$

Тема 2: « Основы теории теплообмена»

Задача № 6. Найти количество тепла, проходящего за время $\tau = 600$ с через стенку, состоящую из 2-х слоёв, считая толщину слоёв равной $d_1 = 50$ см и $d_2 = 3$ см. Температура первого и последнего слоёв соответственно равна $t_1 = 24^\circ\text{C}$ и $t_2 = -20^\circ\text{C}$, а площадь стенки $F = 12 \text{ м}^2$. Коэффициент теплопроводности первой стенки $\zeta_1 = 0,24 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$, а второй $\zeta_2 = 1,0 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$.

Решение:

Тепловой поток через двухслойную твёрдую стенку определяется по формуле: $\Phi = [F \cdot (t_1 - t_2) / R_t]$. Здесь F – площадь стенки, t_1 и t_2 – начальная и конечная температуры стенки, R_t – термическое сопротивление стенки. Его определяют по формуле: $R_t = (d_1 / \zeta_1) + (d_2 / \zeta_2)$;

$$R_t = (0,5 \text{ м} / 0,24 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}) + (0,03 \text{ м} / 1,0 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}) = 2,1 \text{ град/Вт} \cdot \text{м}^2.$$

По определению тепловой поток $\Phi = Q / \tau$. Отсюда $Q = \Phi \cdot \tau$.

Рассчитываем тепловой поток через двухслойную стенку, а затем количество теплоты:

$$\Phi = 12 \text{ м}^2 \cdot [24^\circ\text{C} - (-20^\circ\text{C})] / 2,1 \text{ град/Вт} \cdot \text{м}^2 = 251,4286 \text{ Вт} = 251 \text{ вт}.$$

$$Q = 251 \text{ Вт} \cdot 600 \text{ сек} = 150600 \text{ Дж} = 151 \text{ кДж}.$$

Ответ: $\Phi = 251 \text{ Вт}$; $Q = 151 \text{ кДж}$.

Задача № 7. Найти конвективный коэффициент теплоотдачи от цилиндрического нагревателя длиной $x = 1$ м и диаметром $D = 50$ мм, если средняя температура его поверхности составляет $t_1 = 100^\circ\text{C}$, температура среды $t_2 = 20^\circ\text{C}$. Конвективный тепловой поток от нагревателя принять равным $\Phi = 120 \text{ Вт}$.

Решение:

Коэффициент теплоотдачи находится из уравнения Ньютона-Рихмана: $\Phi_k = \alpha_k \cdot F \cdot (t_1 - t_2)$; $F = \pi \cdot D \cdot x$ – площадь теплообмена, равняется площади боковой поверхности цилиндра; $t_1 = t_{\text{ст}}$ – температура стенки нагревателя; $t_2 = t_{\text{ж}}$ – температура среды (воздуха).

Площадь поверхности теплообмена: $F = \pi \cdot D \cdot x = 3,14 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot 1 \text{ м} = 157 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 = 0,16 \text{ м}^2$.

Конвективный коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_k = \Phi_k / [F \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}})] = 120 \text{ Вт} / [0,16 \text{ м}^2 \cdot (100 - 20) \text{ град}] = 9,4 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}.$$

Ответ: $\alpha_k = 9,4 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$

Задача № 8. Рассчитать лучистый тепловой поток от стальной окисленной трубы наружным диаметром $D = 12$ см, длиной $x = 2,4$ м. Температуру стенки трубы принять равной $t_{\text{ст}} = 120^\circ\text{C}$, среды $t_{\text{ж}} = 22^\circ\text{C}$, приведенная степень черноты поверхности трубы $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,8$.

Решение:

Лучистый тепловой поток от нагретой цилиндрической трубы в неограниченную среду определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot C_0 \cdot F \cdot [(T_{\text{ст}} / 100)^4 - (T_{\text{ж}} / 100)^4].$$

Здесь $F = \pi \cdot D \cdot x$ – площадь боковой поверхности цилиндра, площадь теплообмена.

$$F = 3,14 \cdot 0,12 \text{ м} \cdot 2,4 \text{ м} = 0,904 \text{ м}^2.$$

$\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты поверхности цилиндра;

$C_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ – постоянная излучения;

$T_{\text{ст}}$ – абсолютная температура поверхности стенки;

$T_{\text{ж}}$ – абсолютная температура среды (по шкале Кельвина).

Значение лучистого теплового потока:

$$\Phi_{\text{л}} = (0,8 \cdot 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4 \cdot 0,904 \text{ м}^2) \cdot [(393\text{К} / 100)^4 - (295\text{К} / 100)^4];$$

$$\Phi_{\text{л}} = 4,1 \cdot [238,5 - 75,73] \text{ Вт} = 667,357 \text{ Вт} = 670 \text{ Вт}.$$

Ответ: $\Phi_{\text{л}} = 670 \text{ Вт}$

Задача № 9. Рассчитать плотность теплового потока q от нагретой до температуры $t_1 = 84^\circ\text{C}$ жидкости (горячий теплоноситель внутри трубы большого диаметра) через твёрдую стенку трубы толщиной $d = 6,8 \text{ мм}$ к холодному теплоносителю, температура которого равна $t_2 = 18^\circ\text{C}$. Конвективный коэффициент теплоотдачи на границе первый теплоноситель-твёрдая стенка принять равным $\alpha_{\text{к1}} = 6600 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град}$, а на границе твёрдая стенка второй теплоноситель $\alpha_{\text{к2}} = 8 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град}$.

Коэффициент теплопроводности материала трубы: $\zeta = 51,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$.

Примечание: в случае труб большого диаметра внутреннюю и внешнюю поверхности трубы можно считать примерно одинаковыми; плотность теплового потока q от более нагретого теплоносителя к менее нагретому рассчитывается по формуле: $q = (t_1 - t_2) \cdot \theta$.

Решение:

Коэффициент теплопередачи θ определяется из соотношения:

$$\theta = 1 / [(1 / \alpha_{\text{к1}}) + (1 / \alpha_{\text{к2}}) + (d / \zeta)] = 1 / [(1 / 6600 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град}) + (1 / 8 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град}) + (0,0068 \text{ м} / 51,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{град})];$$

$$\theta = 1 / (0,12647 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град}) = 7,907 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град} = 7,9 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град}.$$

Плотность теплового потока:

$$q = (t_1 - t_2) \cdot \theta = 66^\circ\text{C} \cdot 7,9 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град} = 521 \text{ Вт/м}^2.$$

Ответ: $q = 521 \text{ Вт/м}^2$.

Тема 3: «Идеальные циклы тепловых машин»

Задача № 10. Двигатель работает по циклу Отто (подвод тепла осуществляется при $v = \text{const}$). Начальное состояние рабочего тела $P_1 = 0,9 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Степень сжатия $\varepsilon = 6$. При сгорании выделяется энергия $q_1 = 1287 \text{ кДж/кг}$.

Определить полезную работу за цикл, а также термический КПД двигателя и отведённую энергию (q_2).

Примечание: при расчётах идеальных циклов удобно использовать удельные значения энергии и работы. В этом случае нет необходимости знать массу рабочего тела ($q_1 = Q_1 / m$, $v = V / m$ и т.д.).

Решение:

Цикл Отто на диаграмме P - v имеет следующий вид:

а - 1 (1-й такт) – в цилиндр через всасывающий клапан поступает смесь воздуха и паров горючего (процесс в цикл не входит);

1 - 2 (2-ой такт) – адиабатное сжатие (повышается температура);

2 - 3 – сгорание горючей смеси, давление быстро возрастает при постоянном объеме (подвод теплоты q_1);

3 - 4 (3-й такт) – адиабатное расширение (рабочий процесс, совершается полезная работа);

4 - 1- открывается выхлопной клапан и отработанные газы покидают цилиндр, давление в цилиндре падает (отводится тепло q_2).

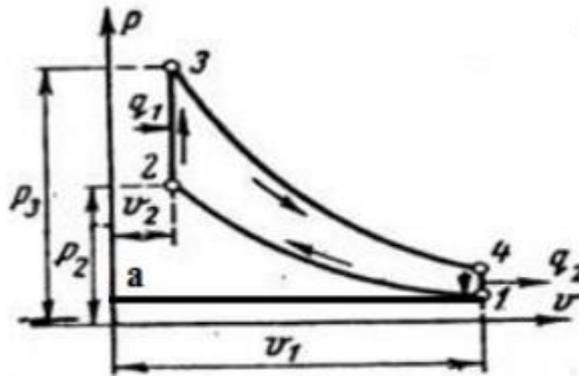


Диаграмма цикла Отто

а) Термический КПД двигателя определяется как отношение количества тепла ($q_1 - q_2$), превращённого в полезную работу ($l_{ц}$), к теплоте, выделяемой при сгорании топлива q_1 :
 $\eta_T = (q_1 - q_2) / q_1 = l_{ц} / q_1$.

Преобразование формулы с помощью уравнений термодинамики позволяет получить следующее выражение для термического КПД двигателя:

$$\eta_T = 1 - [1 / \varepsilon^{(\gamma-1)}], \text{ где } \varepsilon = v_1 / v_2 = V_1 / V_2 - \text{степень сжатия рабочего тела.}$$

В цикле Отто рабочим телом считается идеальный воздух.

$$\text{В данной задаче: } \eta_T = 1 - [1 / \varepsilon^{(\gamma-1)}] = [1 - 1 / 6^{(1,4-1)}] = 1 - (1 / 2,05) = 0,51.$$

б) Используя формулы термодинамики для расчёта параметров и функций состояния, а так же работы для изохорных и адиабатных процессов, входящих в цикл Отто, определим тот же термический КПД через работу за цикл ($l_{ц}$) и подведенную теплоту (q_1):
 $\eta_T = l_{ц} / q_1$.

$$\text{Отведенная теплота: } q_2 = q_1 - l_{ц}.$$

Работа за цикл $l_{ц}$ равна сумме работ на всех участках цикла:

$$l_{ц} = (l_{1-2}) + (l_{2-3}) + (l_{3-4}) + (l_{4-1}) = (l_{1-2}) + (l_{3-4}).$$

Работа в изохорных процессах 2 - 3 и 4 - 1 не совершается, по определению: полная работа $L = \int_{v_1}^{v_2} P \cdot dv$; удельная работа $l = L / m = \int_{v_1}^{v_2} P \cdot dv$.

При равенстве объёмов ($v_1 = v_2 = \text{const}$) $dv=0$.

Работу в адиабатном процессе для идеального газа можно определить разными способами.

1. из первого начала термодинамики:

$l_{1-2} = - \Delta u$, $\Delta u = (1 / \mu) \cdot C_v^m \cdot \Delta t = (5 / 2) \cdot (R / \mu) \cdot \Delta t$ – изменение удельной внутренней энергии. Для нахождения изменения удельной внутренней энергии надо знать температуру t_2 . При адиабатном сжатии уравнения процесса имеют вид:

$$P_1 \cdot v_1^\gamma = P_2 \cdot v_2^\gamma; T_1 \cdot P_1^{(1-\gamma)/\gamma} = T_2 \cdot P_2^{(1-\gamma)/\gamma}; T_1 \cdot v_1^{(\gamma-1)} = T_2 \cdot v_2^{(\gamma-1)}.$$

Вначале определим удельный объём в первом состоянии из уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$v_1 = [8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град} / (0,9 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 29 \text{ кг кмоль})] \cdot 293 \text{ К} = 0,933 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Так как степень сжатия известна, можно найти конечный объём при сжатии: $v_2 = v_1 / \varepsilon = (0,933 \text{ м}^3/\text{кг} / 6) = 0,156 \text{ м}^3/\text{кг}$. Температура (в градусах Кельвина) в конце процесса сжатия определяется из уравнения для адиабатного процесса:

$$T_2 = T_1 \cdot (v_1 / v_2)^{\gamma-1} = 293 \text{ К} \cdot [(0,933 \text{ м}^3/\text{кг} / 0,156 \text{ м}^3/\text{кг})]^{1,4-1} = 293 \text{ К} \cdot (6)^{0,4} = 600 \text{ К}.$$

Давление в конце процесса сжатия:

$$P_1 \cdot v_1^\gamma = P_2 \cdot v_2^\gamma;$$

$$P_2 = P_1 \cdot (v_1 / v_2)^\gamma = 0,9 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot (6)^{1,4} = 11,06 \cdot 10^5 \text{ Па} = 1,1 \text{ МПа}.$$

Работа сжатия: $l_{1-2} = - \Delta u = - (1 / 29 \text{ кг/кмоль}) \cdot 2,5 \cdot 8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град} \cdot (600 \text{ К} - 293 \text{ К});$

$$l_{1-2} = - 220034 \text{ Дж/кг} = - 220 \text{ кДж/кг}$$

2. Работу в адиабатном процессе можно найти и из выражения:

$$I_{ад} = I_{1-2} = [(P_1 \cdot v_1) / (\gamma - 1)] \cdot [1 - (P_2 / P_1)^{(\gamma-1)/\gamma}] = (R \cdot T_1) / (\gamma - 1) \cdot \mu \cdot [1 - (P_2/P_1)^{(\gamma-1)/\gamma}].$$

Значения удельной работы получаются примерно одинаковыми,

$$I_{1-2} = (1 / 29 \text{ кг/кмоль} \cdot 0,4) \cdot 8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град} \cdot 293 \text{ К} \cdot (1 - 2,0461) = - 219,7 \text{ кДж/кг}.$$

Округление до двух значащих цифр даёт $I_{1-2} = - 220 \text{ кДж/кг}$.

Работа расширения:

$I_{3-4} = [R \cdot T_3 / (\gamma - 1) \cdot \mu] \cdot [1 - (P_4 / P_3)^{(\gamma-1)/\gamma}]$. Здесь неизвестны значения давления в конце подвода теплоты P_3 и в конце процесса расширения P_4 , а так же температуры в начале расширения.

В изохорном процессе подвода теплоты согласно первому началу термодинамики $q_1 = \Delta u = (1 / \mu) \cdot C_v^{\mu} \cdot \Delta t = (5 / 2) \cdot (R / \mu) \cdot \Delta t$.

Отсюда: $\Delta t = q_1 / (5 / 2) \cdot (R / \mu) = (q_1 \cdot \mu) / (2,5 \cdot R) = (1287 \text{ кДж/кг} \cdot 29 \text{ кг/кмоль}) / (2,5 \cdot 8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град}) = 1795,67 \text{ град}$;

$\Delta t = \Delta T = 1800 \text{ град}$. Так как 1 град. Цельсия равен 1 град. Кельвина, то разницу температур можно записывать как в К, так и в $^{\circ}\text{C}$.

$$T_3 = T_2 + 1800\text{К} = 2400 \text{ К}.$$

$$t_3 = t_2^{\circ}\text{C} + 1800^{\circ}\text{C} = 327^{\circ}\text{C} + 1800^{\circ}\text{C} = 2127^{\circ}\text{C}.$$

$$\text{Проверяем: } T_3 = (2127 + 273,15) = 2400 \text{ К}.$$

Из уравнения изохорного процесса для участка диаграммы 2-3:

$$(P_3 / P_2) = (T_3 / T_2); \text{ Отсюда } P_3 = P_2 \cdot (T_3 / T_2) = 1,11 \text{ МПа} \cdot (2400 \text{ К} / 600 \text{ К}) = 4,440 \text{ МПа}.$$

Давление в конце процесса расширения P_4 :

$$(P_3 \cdot v_3^{\gamma}) = P_4 \cdot v_4^{\gamma}; P_4 = P_3 \cdot (1 / \varepsilon)^{\gamma} = 4,44 \text{ МПа} \cdot (1 / 6)^{1,4} = 0,361 \text{ МПа}.$$

Удельная работа расширения на участке 3-4:

$$I_{3-4} = (R \cdot T_3) / (\gamma - 1) \cdot \mu \cdot [1 - (P_4 / P_3)^{(\gamma-1)/\gamma}];$$

$$I_{3-4} = (8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град} \cdot 2400 \text{ К}) / (0,4) \cdot 29 \text{ кг/кмоль} \cdot [1 - (0,361 \text{ МПа} / 4,440 \text{ МПа})^{0,286}] = 881 \text{ кДж/кг}.$$

Удельная работа за цикл: $I_{ц} = I_{1-2} + I_{2-3} + I_{3-4} + I_{4-1} = I_{1-2} + I_{3-4} = - 220 \text{ кДж/кг} + 0 + 881 \text{ кДж/кг} + 0$.

$$I_{ц} = 661 \text{ кДж/кг}.$$

$$\text{КПД цикла: } \eta_{\tau} = I_{ц} / q_1 = (661 \text{ кДж/кг}) / (1287 \text{ кДж/кг}) = 0,51.$$

в) Отводимая в изохорном процессе (4-1) теплота:

$$q_2 = q_1 - I_{ц} = 1287 \text{ кДж/кг} - 661 \text{ кДж/кг} = 626 \text{ кДж/кг}.$$

г) Температура в конце процесса расширения:

$$(T_4 \cdot v_4)^{(\gamma-1)} = T_3 \cdot v_3^{(\gamma-1)};$$

$$T_4 = T_3 \cdot (v_2 / v_1)^{\gamma-1} = T_3 \cdot (1 / \varepsilon)^{\gamma-1} = 2400 \text{ К} (1 / 6)^{0,4}.$$

$$T_4 = 2400\text{К} \cdot 0,488 = 1170 \text{ К}.$$

Ответ: $q_2 = 626 \text{ кДж/кг}$; $I_{ц} = 661 \text{ кДж/кг}$; $\eta_{\tau} = 0,51$.

Проведен полный расчёт идеального цикла Отто (рабочее тело -идеальный воздух).

Задача 11. Для цикла с подводом тепла при $P = \text{const}$ (цикл Дизеля) определить полезную работу (за цикл) и термический КПД, если $P_1 = 0,98 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $t_1 = 50^{\circ}\text{C}$, степень сжатия $\varepsilon = 16$, а степень предварительного расширения $\psi = 1,6$.

Цикл Дизеля (компрессорный дизель) протекает следующим образом: а-1 (1-ый такт) изобарный впуск воздуха. В цикл не входит 1-2 (2-ой такт). Сжатие осуществляется по адиабате, как и в цикле Отто, с той лишь разницей, что степень сжатия и давление в конце такта значительно выше.

2-3 - горение топлива (подвод тепла q_1). В конце такта сжатия происходит впрыск топлива и начинается его горение (подвод теплоты), которое осуществляется по изобаре, т. е. при постоянном давлении. В этом заключается принципиальное отличие цикла Дизеля от цикла Отто, где теплота подводится изохорно (при постоянном объеме), поскольку топливо сгорает очень быстро, а его воспламенение (от искры) начинается чуть раньше (опережение зажигания), чем поршень достигал верхнего положения.

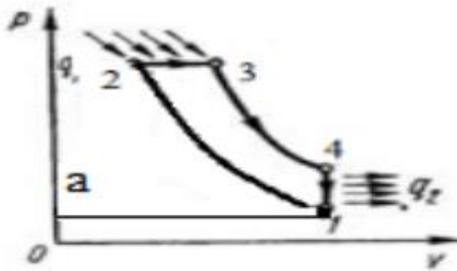


Диаграмма цикла Дизеля

Изобарное сжигание топлива в дизельном двигателе связано с относительно медленным (лавинообразным) воспламенением – сначала сгорают легкие фракции, затем более тяжелые. В результате процесс горения растягивается во времени и поршень успевает "убежать" от верхней мертвой точки, при этом давление в цилиндре остается неизменным.

3-4- следующий такт, третий, рабочий ход. Как и в цикле Отто, следовало адиабатическое расширение.

4-1- (4-ый такт) изохорный отвод теплоты q_2 (выпуск газов и продувка цилиндра после открывания клапанов). а) Коэффициент полезного действия цикла Дизеля можно определить следующим образом:

$\eta_T = 1 - (1 / \varepsilon^{\gamma-1}) \cdot [(\psi_\gamma - 1) / \gamma \cdot (\rho - 1)]$; $\psi = V_3 / V_2 = v_3 / v_2$ - степень предварительного расширения рабочего тела в результате горения при постоянном давлении; $\varepsilon = (v_1 / v_2)$ - степень сжатия, $\gamma = 1,4$ - показатель адиабаты.

$\eta_T = 1 - (1 / \varepsilon^{\gamma-1}) \cdot [\psi_\gamma - 1 / \gamma \cdot (\rho - 1)] = 1 - (1 / 3,031) \cdot [1,931 - 1 / 1,4 \cdot (1,6 - 1)] = 1 - 0,37 = 0,63$.

б) Параметры состояния для характерных точек цикла (1,2,3,4) рассчитываются аналогично задаче № 10.

Удельный объём в начальном состоянии:

$v_1 = 1 / (P_1 \cdot \mu) \cdot R \cdot T_1 = 1 / (P_1 \cdot \mu) \cdot R \cdot T_1 = (8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град}) / (0,98 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 29 \text{ кг/кмоль}) \cdot 323 \text{ К}$;

$v_1 = 0,945 \text{ м}^3/\text{кг}$.

$v_2 = v_1 / \varepsilon = (0,945 \text{ м}^3/\text{кг}) / 16 = 0,059 \text{ м}^3/\text{кг}$;

$v_3 = 1,6 \cdot v_2 = 0,095 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Давление в конце адиабатного процесса сжатия:

$P_1 \cdot v_1^\gamma = P_2 \cdot v_2^\gamma$; $P_2 = P_1 \cdot (1 / \varepsilon)^\gamma = 0,098 \text{ МПа} \cdot (16)^{1,4} = 4,75 \text{ МПа}$.

При изобарном подводе тепла $P_2 = P_3 = 4,75 \text{ МПа}$. В процессе адиабатного расширения (рабочий ход) давление определяется из формулы Пуассона:

$P_3 \cdot v_3^\gamma = P_4 \cdot v_4^\gamma$; $v_4 = v_1$; $P_4 = P_3 \cdot (v_3 / v_1)^\gamma = 4,75 \text{ МПа} \cdot [(0,095 \text{ м}^3/\text{кг}) / (0,945 \text{ м}^3/\text{кг})]^{1,4}$.

$P_4 = 0,191 \text{ МПа}$.

Температура в конце процесса сжатия:

$T_2 = T_1 \cdot (v_1 / v_2)^{\gamma-1} = 323 \text{ К} \cdot [(0,945 \text{ м}^3/\text{кг}) / (0,059 \text{ м}^3/\text{кг})]^{1,4-1} = 323 \text{ К} \cdot (16)^{0,4} = 979$

К.

В конце изобарного подвода тепла температура определяется из формулы изобарного процесса:

$T_3 = T_2 \cdot (v_3 / v_2) = 979 \text{ К} \cdot 1,6 = 1570 \text{ К}$.

Температура в конце адиабатного процесса расширения:

$T_4 = T_3 \cdot (v_3 / v_4)^{\gamma-1} = 1570 \text{ К} \cdot [(0,095 \text{ м}^3/\text{кг}) / (0,945 \text{ м}^3/\text{кг})]^{1,4-1} = 1570 \text{ К} \cdot (0,101)^{0,4}$;

$T_4 = 1570 \text{ К} \cdot 0,399 = 630 \text{ К}$; $v_4 = v_1$;

Температуру T_4 так же можно найти, используя уравнение для изохорного процесса:

$P_1 / P_4 = T_1 / T_4$;

$T_4 = T_1 \cdot (0,191 \text{ МПа}) / (0,098 \cdot \text{МПа}) = 323 \text{ К} \cdot 1,949 = 630 \text{ К}$.

При округлении до двух значащих цифр между данными по T_4 расхождений нет, что позволяет использовать оба способа расчёта температуры.

Работа за цикл: $l_{ц} = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4} + l_{4-1}$; $l_{ц} = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4} + 0$.

$l_{ц} = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4}$.

Работа адиабатного сжатия:

$$l_{1-2} = (R \cdot T_1) / (\gamma - 1) \cdot \mu \cdot [1 - (P_2 / P_1)^{(\gamma-1)/\gamma}];$$

$$l_{1-2} = [(8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град} \cdot 323 \text{ К}) / (0,4) \cdot 29 \text{ кг кмоль}] \cdot [1 - (4,75 \text{ МПа} / 0,098 \text{ МПа})^{0,286}];$$

$$l_{1-2} = 231,5 \text{ кДж/кг} \cdot (-2,034) = -471 \text{ кДж/кг}.$$

В изобарном процессе работа: $l_{2-3} = P_2 \cdot (v_3 - v_2)$.

$$l_{2-3} = 4,75 \text{ МПа} \cdot (0,095 \text{ м}^3/\text{кг} - 0,059 \text{ м}^3/\text{кг}) = 4,75 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 0,36 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$l_{2-3} = 1,71 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг} = 171 \text{ кДж/кг}.$$

При адиабатном расширении удельная работа:

$$l_{3-4} = (R \cdot T_3 / (\gamma - 1) \cdot \mu) \cdot [1 - (P_4 / P_3)^{(\gamma-1)/\gamma}];$$

$$l_{3-4} = (8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град} \cdot 1570 \text{ К}) / (0,4 \cdot 29 \text{ кг/кмоль}) \cdot [1 - (0,191 \text{ МПа} / 4,75 \text{ МПа})^{0,286}];$$

$$l_{3-4} = 1125 \text{ кДж/кг} \cdot [1 - 0,399] = 676 \text{ кДж/кг}.$$

Полезная работа за цикл: $l_{ц} = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4}$;

$$l_{ц} = -471 \text{ кДж/кг} + 171 \text{ кДж/кг} + 676 \text{ кДж/кг} = 376 \text{ кДж/кг}.$$

в) Полезная работа за цикл и термический КПД позволяют найти подводённую теплоту: $\eta_T = l_{ц} / q_1$; $q_1 = l_{ц} / \eta_T = (376 \text{ кДж/кг}) / (0,63) = 597 \text{ кДж/кг}$;

$$\text{Отведённая теплота } q_2 = q_1 - l_{ц} = 597 \text{ кДж/кг} - 376 \text{ кДж/кг} = 221 \text{ кДж/кг}.$$

$$\text{Ответ: } q_1 = 597 \text{ кДж/кг}; q_2 = 221 \text{ кДж/кг}; l_{ц} = 376 \text{ кДж/кг}; \eta_T = 0,63.$$

Задача 12. В цикле поршневого двигателя внутреннего сгорания с комбинированным подводом тепла (цикл Тринклера) начальное давление $P_1 = 0,085 \text{ МПа}$ и начальная температура $T_1 = 323 \text{ К}$. Степень сжатия $\varepsilon = v_1 / v_2 = 16$, степень предварительного расширения $\psi = V_3 / V_2 = 1,6$ и степень повышения давления: $\pi = P_3 / P_2 = 2,0$.

Определить параметры во всех характерных для цикла точках (1,2,3,4,5), количество подведенного и отведенного теплот, полезную работу за цикл и термический КПД цикла.

Решение:

Цикл Тринклера имеет следующий вид:

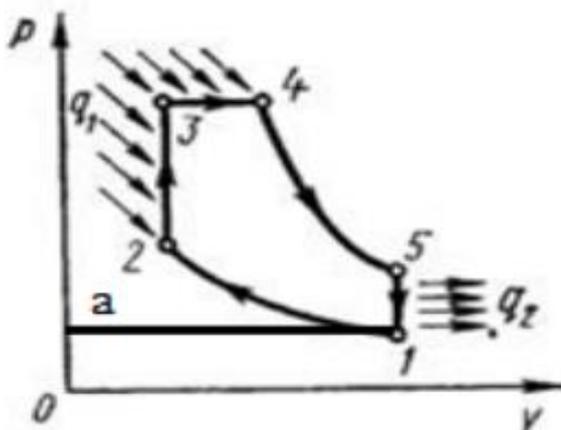


Диаграмма цикла Тринклера

а -1- (1-ый такт) воздух поступает в цилиндр при постоянном давлении. В цикл не входит.

1- 2 – (2-ой такт) чистый воздух с температурой T_1 сжимается до температуры T_2 , которая больше температуры воспламенения воздуха. В этот момент в цилиндр через форсунки под давлением впрыскивается топливо;

2 - 3 – горячая смесь самовоспламеняется и к рабочему телу подводится тепло q_1^* , давление повышается до P_3 ;

3-4 – поршень перемещается обратно, поступление и сгорание топлива продолжается при постоянном давлении и подводится тепло q_1^{**} . Теплота $q_1 = q_1^* + q_1^{**}$;

4-5 – (третий такт) поршень продолжает перемещаться в нижнюю мертвую точку, давление падает (адиабатное расширение, рабочий ход);

5 -1 – (4-ый такт) процесс отвода теплоты q_2 при постоянном объеме (через выпускной клапан цилиндр покидают отработанные газы).

Термический КПД цикла определяется по формуле: $\eta_T = 1 - (1 / \varepsilon^{\gamma-1}) \cdot (\chi \cdot \psi^\gamma - 1) / [(\chi-1) + \chi \cdot \gamma \cdot (\psi-1)]$.

Здесь $\varepsilon = v_1 / v_2$ – степень сжатия, $\psi = V_4 / V_2$ – степень предварительного расширения газа в результате изобарного подвода тепла, $\chi = P_3 / P_2$ – степень повышения давления.

а) Рассчитать значения термического КПД цикла бескомпрессорного дизеля (цикл Тринклера):

$$\eta_T = 1 - [1 / 16^{(1,4-1)}] \cdot (2 \cdot 1,6^{1,4} - 1) / [(2-1) + 2 \cdot 1,4 \cdot (1,6-1)];$$

$$\eta_T = 1 - (1 / 3,03) \cdot (2,86 / 2,68);$$

$$\eta_T = 1 - 0,35 = 0,65.$$

б) Удельный объем в начальном состоянии:

$$v_1 = (1 / P_1 \cdot \mu) \cdot R \cdot T_1 = (1 / P_1 \cdot \mu) \cdot R \cdot T_1 = (8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град} / 0,85 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 29 \text{ кг/кмоль}) \cdot 323 \text{ К};$$

$$v_1 = 1,089 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad v_2 = v_1 / \varepsilon = (1,089 \text{ м}^3/\text{кг}) / 16 = 0,068 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad v_3 = v_2;$$

$$v_4 = 1,6 \cdot v_2 = 0,109 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Температура в конце процесса сжатия:

$$T_2 = T_1 \cdot (v_1 / v_2)^{\gamma-1} = 323 \text{ К} \cdot (1,089 \text{ м}^3/\text{кг} / 0,068 \text{ м}^3/\text{кг})^{1,4-1} = 323 \text{ К} \cdot (16)^{0,4} = 980 \text{ К}.$$

Давление в конце процесса сжатия: $P_1 \cdot v_1^\gamma = P_2 \cdot v_2^\gamma$;

$$P_2 = P_1 \cdot (v_1 / v_2)^\gamma = 0,85 \cdot 10^5 \text{ Па} (16)^{1,4} = 41,23 \cdot 10^5 \text{ Па} = 4,12 \text{ МПа}.$$

Давление в конце изохорного подвода тепла определяется из формулы для степени повышения давления:

$$\chi = P_3 / P_2; \quad P_3 = \chi \cdot P_2 = 2 \cdot 4,12 \text{ МПа} = 8,24 \text{ МПа}.$$

Из уравнения изохорного процесса для участка диаграммы 2-3;

$$P_3 / P_2 = T_3 / T_2; \quad \text{Отсюда } T_3 = T_2 \cdot (P_3 / P_2) = 980 \text{ К} \cdot 2 = 1960 \text{ К}.$$

В т.4 заканчивается процесс подвода тепла.

Температура в т.4 определяется из уравнения для изобарного процесса:

$$T_4 = T_3 \cdot (v_4 / v_3) = 1960 \text{ К} \cdot 1,6 = 3140 \text{ К}.$$

В т.5 (конец адиабатного расширения, $v_5 = v_1$) температура:

$$T_5 = T_4 \cdot (v_4 / v_5)^{\gamma-1} = 3140 \text{ К} \cdot (0,109 \text{ м}^3/\text{кг} / 1,089 \text{ м}^3/\text{кг})^{1,4-1} = 3140 \text{ К} \cdot (0,1)^{0,4} = 1250 \text{ К}.$$

Давление в т.5 ($P_4 = P_3$; $v_5 = v_1$);

$$P_5 = P_4 \cdot (v_4 / v_5)^\gamma = 82,4 \cdot 10^5 \text{ Па} (0,109 \text{ м}^3/\text{кг} / 1,089 \text{ м}^3/\text{кг})^{1,4} = 82,4 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0,4 = 3,30 \text{ МПа}.$$

Работа за цикл: $l_{ц} = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4} + l_{4-5} + l_{5-1}$

$$l_{ц} = l_{1-2} + 0 + l_{3-4} + l_{4-5} + 0; \quad l_{ц} = l_{1-2} + l_{3-4} + l_{4-5}.$$

Работа адиабатного сжатия:

$$l_{1-2} = (R \cdot T_1) / (\gamma - 1) \cdot \mu \cdot [1 - (P_2 / P_1)^{(\gamma-1)/\gamma}];$$

$$l_{1-2} = (8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град} \cdot 323 \text{ К}) / (0,4) \cdot 29 \text{ кг/кмоль} \cdot [1 - (4,12 \text{ МПа} / 0,085 \text{ МПа})^{(0,286)}];$$

$$l_{1-2} = 231,5 \text{ кДж/кг} \cdot (-2,034) = -471 \text{ кДж/кг}.$$

В изобарном процессе работа: $l_{3-4} = P_3 \cdot (v_4 - v_3)$.

$$l_{3-4} = 8,24 \text{ МПа} \cdot (0,109 \text{ м}^3/\text{кг} - 0,068 \text{ м}^3/\text{кг}) = 8,24 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 0,041 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$l_{3-4} = 3,378 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг} = 338 \text{ кДж/кг}.$$

При адиабатном расширении удельная работа:

$$l_{4-5} = (R \cdot T_4) / (\gamma - 1) \cdot \mu \cdot [1 - (P_5 / P_4)^{(\gamma-1)/\gamma}];$$

$$l_{4-5} = (8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град} \cdot 3140 \text{ К}) / (0,4 \cdot 29 \text{ кг/кмоль}) \cdot [1 - (3,30 \text{ МПа} / 8,24 \text{ МПа})^{0,286}];$$

$$l_{4-5} = 2251 \text{ кДж/кг} \cdot [1 - 0,77] = 518 \text{ кДж/кг}.$$

Полезная работа за цикл:

$$l_{ц} = l_{1-2} + l_{3-4} + l_{4-5};$$

$$l_{ц} = -471 \text{ кДж/кг} + 338 \text{ кДж/кг} + 518 \text{ кДж/кг} = 385 \text{ кДж/кг}.$$

в) Полезная работа за цикл и термический КПД позволяют найти подведённую теплоту:

$$\eta_{т} = l_{ц} / q_1; q_1 = l_{ц} / \eta_{т} = (385 \text{ кДж/кг}) / 0,65 = 590 \text{ кДж/кг};$$

$$г) \text{ Отведённая теплота } q_2 = q_1 - l_{ц} = 590 \text{ кДж/кг} - 385 \text{ кДж/кг} = 205 \text{ кДж/кг}.$$

$$\text{Ответ: } q_1 = 590 \text{ кДж/кг}; q_2 = 205 \text{ кДж/кг}; l_{ц} = 385 \text{ кДж/кг}; \eta_{т} = 0,65.$$

Проведен полный расчёт цикла Тринклера.

Задача 13. Начальные параметры воздуха, поступающего в компрессор газотурбинной установки (ГТУ) $P_1 = 10^5 \text{ Па}$, $t_1 = 20^\circ \text{C}$. Степень повышения давления в компрессоре ГТУ $\pi = 6$. Температура газа перед соплами турбины $t_3 = 700^\circ \text{C}$. Компрессор засасывает $M = 2 \cdot 10^5 \text{ кг/ч}$ воздуха. Определить параметры всех точек цикла, термический КПД идеальную мощность компрессора, турбины и всей ГТУ. Рабочим телом ГТУ считать идеальный воздух.

Решение:

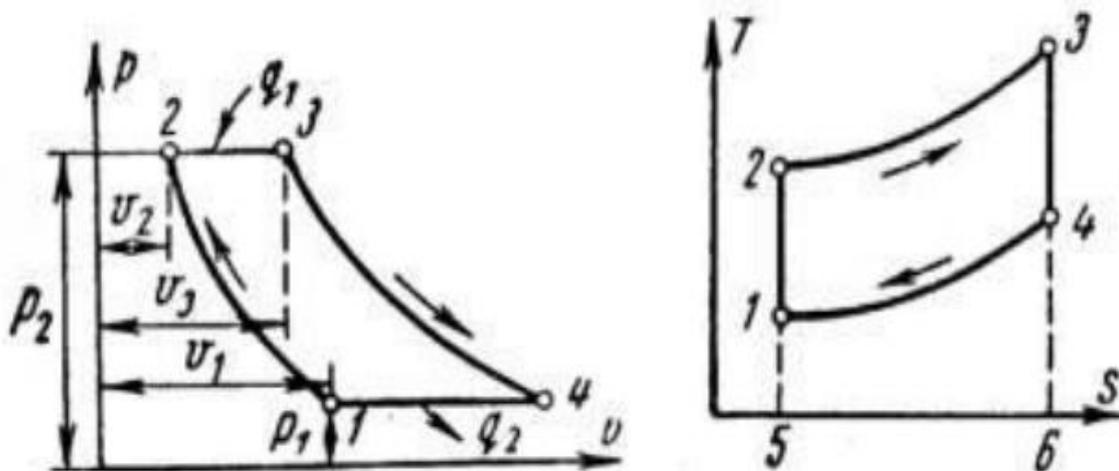
Цикл ГТУ в P-υ и T-S диаграммах имеет следующий вид:

1-2 - адиабатное сжатие воздуха в компрессоре до давления P_2 ;

2-3 – подвод теплоты q_1 при постоянном давлении P_2 (сгорание топлива);

3-4 – адиабатное расширение газо-воздушной смеси до начального давления P_1 ;

4-1 – охлаждение рабочего тела при постоянном давлении P_1 (отвод теплоты q_2).



Цикл ГТУ в P-υ и T-S диаграммах

Характеристиками цикла являются: степень повышения давления

$$\chi = P_2 / P_1; \text{ степень изобарного расширения } \psi = V_3 / V_2.$$

$$\text{Удельная работа турбины: } l_{т}^* = i_3 - i_4.$$

$$\text{Удельная работа компрессора: } l_{к}^* = i_2 - i_1.$$

$$\text{Удельная полезная работа ГТУ равна разности работ турбины и компрессора: } l_{ГТУ}^* = l_{т}^* - l_{к}^*.$$

$$\text{Теоретическая мощность газовой турбины, компрессора и установки (ГТУ): } N_{т} = l_{т}^* \cdot M = (i_3 - i_4) \cdot M.$$

M-расход газа (кг/ч) или (кг/с).

$$N_{к} = l_{к}^* \cdot M = (i_2 - i_1) \cdot M;$$

$$N_{ГТУ} = l_{ГТУ}^* \cdot M = [(i_3 - i_4) - (i_2 - i_1)] \cdot M.$$

Примечания:

а) в компрессорах и турбинах газ, перед попаданием на рабочие органы, совершает дополнительную работу по преодолению внешнего, по отношению к рабочей камере, давления. Работа в этом случае будет больше, чем при изменении объёма, как это происходит в ДВС. Её называют технической работой l^* и она для идеальных компрессоров и турбин в $\gamma = 1,4$ раз больше работы по изменению объёма $l_k^* = 1,4 \cdot l_k$. $l_t^* = 1,4 \cdot l_t$.

б) Первое начало термодинамики для таких тепловых машин можно записать в виде: $q = \Delta i + l^*$ - удельная теплота процесса равна сумме изменения энтальпии и технической работы.

Удельная энтальпия определяется как сумма удельной внутренней энергии и произведения давления на удельный объём: $i = u + P \cdot v$. Значение удельной внутренней энергии определяется величиной абсолютной температуры: $u = c_v \cdot T$.

Здесь c_v - удельная изохорная теплоёмкость газа.

В этом случае для идеального газа:

$$P \cdot v = R_\mu \cdot T; \quad R_\mu = R / \mu;$$

$$i = c_v \cdot T + P \cdot v = c_v \cdot T + (R / \mu) \cdot T = T \cdot (c_v + R / \mu) = c_p \cdot T.$$

Термический КПД цикла ГТУ:

$$\eta_{\text{ГТУ}} = 1 - 1 / \chi^{(\gamma-1)/\gamma}; \quad \gamma = 1,4$$

$$\eta_{\text{ГТУ}} = 1 - 1 / 6^{0,286} = 1 - 0,60 = 0,40.$$

Техническая работа по сжатию воздуха в компрессоре:

$$l_k^* = i_2 - i_1; \quad i_1 = u_1 + P_1 \cdot v_1.$$

$i_1 = u_1 + R_\mu \cdot T_1 = c_p \cdot T_1$. $c_p = c_v + R_\mu = (7 / 2) \cdot (R / \mu)$ для идеальных двухатомных газов, к которым относится воздух.

Для идеального воздуха: $c_p = (7 / 2) \cdot (8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{град}) / (29 \text{ кг/кмоль}) = 1003 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$.

$$\text{Аналогично можно записать: } i_2 = c_p \cdot T_2; \quad i_3 = c_p \cdot T_3; \quad i_4 = c_p \cdot T_4.$$

Для процесса адиабатного сжатия газа и преодоления внешнего давления:

$$l_k^* = - (i_2 - i_1) = - (c_p \cdot T_2 - c_p \cdot T_1) = c_p \cdot (T_1 - T_2).$$

Работа сжатия отрицательна. Но для компрессоров её принято считать положительной, поэтому знак (-) в формуле меняют на обратный:

$$l_k^* = c_p \cdot (T_2 - T_1).$$

При нахождении полной работы ГТУ работу, затрачиваемую на привод компрессора, вычитают из работы, совершаемой турбиной.

Для адиабатного сжатия уравнение процесса имеет вид:

$$T_1 \cdot P_1^{(1-\gamma)/\gamma} = T_2 \cdot P_2^{(1-\gamma)/\gamma}; \quad T_2 = T_1 \cdot (P_1 / P_2)^{(1-\gamma)/\gamma};$$

$$T_2 = 293 \text{ К} \cdot (1/6)^{-0,286} = 489 \text{ К};$$

$$T_3 = (700 + 273) \text{ К} = 973 \text{ К}.$$

Нахождение T_4 можно упростить:

$$T_4 \cdot P_4^{(1-\gamma)/\gamma} = T_3 \cdot P_3^{(1-\gamma)/\gamma}$$

Для изобарных процессов $P_2 = P_3$, а $P_4 = P_1$.

Преобразование уравнения Пуассона даёт:

$$T_4 = (T_1 \cdot T_3) / T_2;$$

$$T_4 = (293 \cdot 973) / 489 \text{ К} = 583 \text{ К}.$$

Удельная техническая работа по сжатию воздуха в компрессоре:

$$l_k^* = c_p \cdot (T_2 - T_1) = 1,003 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град} \cdot (489 - 293) \text{ К} = 196 \text{ кДж/кг}.$$

Удельная техническая работа по расширению газов в турбине:

$$l_t^* = c_p \cdot (T_3 - T_4) = 1,003 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град} \cdot (973 - 583) \text{ К} = 391 \text{ кДж/кг}.$$

Удельная техническая работа установки: $l_{\text{ГТУ}}^* = l_t^* - l_k^* = 391 \text{ кДж/кг} - 196 \text{ кДж/кг} = 195 \text{ кДж/кг}$.

в) Теоретическая мощность компрессора: $N_k = l_k^* \cdot M = 195 \text{ кДж/кг} \cdot (2 \text{ кг} / 3600 \text{ с}) \cdot 10^5 = 10830 \text{ кВт} = 10,8 \text{ МВт}$.

г) Теоретическая мощность турбины: $N_T = I_T^* \cdot M = 391 \text{ кДж/кг} \cdot (2 \text{ кг} / 3600 \text{ с}) \cdot 10^5 = 21700 \text{ кВт} = 21,7 \text{ МВт}$.

д) Теоретическая мощность ГТУ:

$$N_{ГТУ} = N_T - N_k = 21700 \text{ кВт} - 10800 \text{ кВт} = 10900 \text{ кВт} = 10,9 \text{ МВт}.$$

Параметры состояния газа (идеальный воздух) рассчитываются аналогично приведенным ранее для термодинамических процессов.

Подведенную при изобарном горении теплоту можно найти по формуле $q_1 = (i_3 - i_2)$, а отведенную при изобарном охлаждении теплоту $q_2 = (i_4 - i_1)$;

$$q_1 = (i_3 - i_2) = c_p \cdot (T_3 - T_2) = 1003 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град} \cdot (973 \text{ К} - 489 \text{ К}) = 485 \text{ МДж/кг}.$$

$$q_2 = (i_4 - i_1) = c_p \cdot (T_4 - T_1) = 1003 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град} \cdot (583 \text{ К} - 293 \text{ К}) = 291 \text{ МДж/кг}.$$

$$q_1 - q_2 = I_{ГТУ}^* = 194 \text{ МДж/кг}.$$

Данные совпадают в пределах погрешности расчётов.

Ответ: $\eta_{ГТУ} = 0,40$; $I_{ГТУ}^* = 195 \text{ кДж/кг}$; $N_{ГТУ} = 10900 \text{ кДж/кг} = 10,9 \text{ МВт}$.

Тема 3: «Индикаторные диаграммы. Расчёт параметров, характеризующие работу тепловых машин»

Задача № 14. Определить среднее индикаторное давление P_i и индикаторную мощность N_i четырёхцилиндрового четырёхтактного дизельного двигателя, если диаметр цилиндра $D = 16 \text{ см}$, ход поршня $h = 20 \text{ см}$, частота вращения коленчатого вала равна $\omega = 1400 \text{ об/мин}$. С помощью эксперимента получена индикаторная диаграмма полезной площадью $2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, длиной 15 см при масштабе давлений $y = 0,7 \cdot 10^8 \text{ Па/м}$.

Решение:

Индикаторная диаграмма ДВС состоит из процессов, характеристики которых рассчитать теоретически сложно. Поэтому индикаторную диаграмму получают экспериментально при стендовых испытаниях двигателя. На диаграмме $P - v$ индикаторная работа L_i за цикл, согласно определению, численно равна площади диаграммы. Индикаторная мощность определяется как работа, совершаемая за единицу времени (1 с). Чтобы найти индикаторную работу за 1 сек. необходимо работу за цикл умножить на число циклов за сек. Для 4-х тактного двигателя ($k = 4$), имеющего z цилиндров при частоте вращения коленчатого вала ω , значение индикаторной мощности равно:

$$N_i = 2/k \cdot L_i \cdot \omega \cdot z = 2/k \cdot P_i \cdot V_h \cdot \omega \cdot z.$$

Площадь индикаторной диаграммы можно заменить площадью прямоугольника, у которого одна сторона есть разность начального v_1 и конечного v_2 объёмов. Она равна рабочему объёму цилиндра V_h . За вторую сторону принимают условно постоянное давление, произведение которого на рабочий объём даст ту же площадь (индикаторную работу), что и площадь индикаторной диаграммы. Это условно постоянное давление называют средним индикаторным давлением $P_i = N_i / V_h$.

$$P_i = (F / x) \cdot y = (2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 / 0,15 \text{ м}) \cdot 0,7 \cdot 10^8 \text{ Па/м} = 9,3 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

$$\text{Рабочий объём цилиндра: } V_h = (\pi / 4) D^2 \cdot h = (3,14 / 4) \cdot (0,16 \text{ м})^2 \cdot 0,2 \text{ м} = 0,0040 \text{ м}^3 = 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Индикаторная мощность:

$$N_i = (2 / 4) \cdot 9,3 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0,004 \text{ м}^3 \cdot (1400 / 60 \text{ с}) \cdot 4;$$

$$N_i = 173600 \text{ Вт} = 174 \text{ кВт}.$$

Ответ: $P_i = 9,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $N_i = 174 \text{ кВт}$.

Задача № 15. Определить удельный эффективный расход топлива шести цилиндрового четырёхтактного дизельного двигателя, если среднее эффективное давление $P_e = 8,1 \cdot 10^5 \text{ Па}$, полный объём цилиндра $V_a = 8,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$, объём камеры сгорания $V_c = 7,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$, частота вращения коленчатого вала $\omega = 40(1/\text{с})$ и расход топлива $B = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$.

Решение:

Для нахождения удельного эффективного расхода топлива необходимо вначале рассчитать эффективную мощность двигателя:

$$N_e = 2/k \cdot L_e \cdot \omega \cdot z = 2/k \cdot P_e \cdot V_h \cdot \omega \cdot z.$$

Здесь L_e – эффективная работа за цикл (передаваемая на вал двигателя), ω – число оборотов, z – число цилиндров, k – число тактов.

Полный объём цилиндра V_a складывается из рабочего объёма V_h и объёма камеры сгорания V_c .

$$\text{Рабочий объём цилиндра равен: } V_h = V_a - V_c = (8,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 - 7,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3) = 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot (84 - 7,2); \quad V_h = 76,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Эффективная мощность:

$$N_e = 2/k \cdot P_e \cdot V_h \cdot \omega \cdot z.$$

$$N_e = 2/4 \cdot 8,1 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot (76,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3) \cdot 40 \text{ 1/с} \cdot 6;$$

$$N_e = 74649,6 \text{ Вт} = 74,6 \text{ кВт}.$$

Удельный эффективный расход топлива (расход топлива на единицу эффективной мощности):

$$b_e = B / N_e = (4,1 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}) / (74,6 \text{ кВт}) = (4,1 \cdot 10^{-3} \text{ кг/ч}) / (74,65 \text{ кВт}) \cdot 3600 = 0,198 \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч}.$$

$$b_e = 198 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}.$$

$$\text{Ответ: } N_e = 74,6 \text{ кВт}; \quad b_e = 198 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}.$$

Задача № 16. Определить литровую мощность и удельный эффективный расход топлива восьмицилиндрового четырёхтактного карбюраторного двигателя, если среднее индикаторное давление $P_i = 7,6 \cdot 10^5$ Па, диаметр цилиндра $D = 0,14$ м, ход поршня $h = 0,12$ м, угловая скорость вращения коленчатого вала 380 рад/с, механический КПД $\eta_m = 0,82$ и расход топлива $B = 15 \cdot 10^{-3}$ кг/с.

Решение:

Для нахождения удельного эффективного расхода топлива $b_e = B \cdot N_e$, необходимо определить среднюю эффективную мощность $N_e = 2/k \cdot P_e \cdot V_h \cdot \omega \cdot z$. В данной формуле неизвестными являются среднее эффективное давление P_e и рабочий объём цилиндра V_h .

Среднее эффективное давление можно найти, используя данные по механическому КПД и среднему индикаторному давлению: $P_e = P_i \cdot \eta_m = 7,6 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0,82 = 6,23 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

$$\text{Рабочий объём цилиндра } V_h = (\pi/4) D^2 \cdot h = (3,14/4) \cdot (0,14 \text{ м})^2 \cdot 0,12 \text{ м} = 0,00185 \text{ м}^3.$$

$$\text{Число оборотов } \omega = 380 \text{ (1/2}\pi\text{с)} = 60,5 \text{ (1/с)}.$$

Средняя эффективная мощность:

$$N_e = (2/4) \cdot 6,23 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0,00185 \text{ м}^3 \cdot 60,5 \text{ (1/с)} \cdot 8 = 279 \text{ кВт}.$$

Удельный эффективный расход топлива:

$$b_e = B \cdot N_e = [(15 \cdot 10^{-3} \text{ кг/ч}) / (279 \text{ кВт})] \cdot 3600 = 0,194 \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч} = 194 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}.$$

Литровая мощность двигателя:

$$N_l = N_e / (z \cdot V_h) = 279 \text{ кВт} / (8 \cdot 0,00185 \text{ м}^3) = 18900 \text{ кВт/м}^3 = 18,9 \text{ кВт/л}.$$

$$\text{Ответ. } N_l = 18,9 \text{ кВт/л}; \quad b_e = 194 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}.$$

Задача № 17. Определить диаметр цилиндра и ход поршня четырёхцилиндрового четырёхтактного дизельного двигателя, если эффективная мощность $N_e = 80$ кВт, среднее эффективное давление $P_e = 6 \cdot 10^5$ Па, частота вращения коленчатого вала $\omega = 1800$ об/мин, а средняя скорость поршня $C_m = 9,6$ м/с.

Решение:

Диаметр цилиндра и ход поршня позволяют определить рабочий объём цилиндра:

$$V_h = (\pi/4) \cdot D^2 \cdot h.$$

Но из одного выражения нельзя найти три неизвестных величины, необходимо привлечь и другие соотношения, связывающие данные величины с условиями задачи. Так, в формулу для эффективной мощности входит рабочий объём:

$$N_e = (2/k) \cdot P_e \cdot V_h \cdot \omega \cdot z.$$

Из неё можно найти значения V_h , остальные величины здесь известны. Со скоростью поршня C_m связано число оборотов. Действительно, за один оборот коленвала поршень пройдёт путь, равный $2 \cdot h$. Это займёт время $\tau = 1/\omega$ (1/с).

По определению средней скорости: $C_m = 2 \cdot h / \tau = 2 \cdot h \cdot \omega$ (1/с).

Отсюда $h = C_m / (2 \cdot \omega)$ (1/с);

$$h = (9,6 \text{ м/с}) / (2 \cdot 1800 \cdot (1/60 \text{ с})) = (9,6 \text{ м/с} \cdot 60 \text{ с}) / (2 \cdot 1800) = 0,16 \text{ м}.$$

Рабочий объём цилиндра:

$$V_h = (N_e \cdot \kappa) / (2 \cdot P_e \cdot \omega \cdot z);$$

$$V_h = (80 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot 4) / (2 \cdot 6 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 60 \text{ 1/с} \cdot 4) = 0,00111 \text{ м}^3 = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Диаметр цилиндра:

$$D^2 = (4 \cdot V_h) / (\pi \cdot h) = (4 \cdot 0,0011 \text{ м}^3) / (3,14 \cdot 0,16 \text{ м}) = 8,76 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

$$D = \sqrt{(0,876 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2)} = 0,094 \text{ м}.$$

$$\text{Ответ: } D = 0,094 \text{ м}; h = 0,16 \text{ м}; V_h = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = 1,1 \text{ л}.$$

Задача № 18. Определить мощность механических потерь восьмицилиндрового четырёхтактного двигателя с искровым зажиганием, если среднее индикаторное давление $P_i = 7,5 \cdot 10^5$ Па, диаметр цилиндра $D = 0,1$ м, ход поршня $h = 0,095$ м, частота вращения коленчатого вала $\omega = 50$ об/с и механический КПД $\eta_m = 0,8$.

Решение:

Мощность механических потерь равна разности индикаторной (под поршнем в цилиндре) и эффективной (на валу) мощностей:

$$N_M = N_i - N_e.$$

Отношение эффективной мощности к индикаторной определяет механический КПД: $\eta_m = N_e / N_i$.

Индикаторная мощность:

$$N_i = (2 / \kappa) \cdot P_i \cdot V_h \cdot \omega \cdot z;$$

$$V_h = (\pi / 4) \cdot D^2 \cdot h = (3,14 / 4) \cdot (0,1 \text{ м})^2 \cdot 0,095 \text{ м} = 7,46 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

$$N_i = (2 / 4) \cdot 7,5 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot (7,46 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3) \cdot 50 \text{ 1/с} \cdot 8 = 112 \text{ кВт}.$$

$$N_e = N_i \cdot \eta_m = 112 \text{ кВт} \cdot 0,8 = 90 \text{ кВт}.$$

$$N_M = N_i - N_e = 112 \text{ кВт} - 90 \text{ кВт} = 22 \text{ кВт}.$$

$$\text{Ответ: } N_M = 22 \text{ кВт}.$$

Задача 19. Определить среднюю скорость поршня и степень сжатия четырёхцилиндрового четырёхтактного двигателя (κ – число тактов) с искровым зажиганием, если эффективная мощность $N_e = 51,5$ кВт, среднее эффективное давление $P_e = 6,45 \cdot 10^5$ Па, ход поршня $h = 0,092$ м, частота вращения коленчатого вала $\omega = 50$ об/с и объём камеры сгорания $V_c = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$.

Решение:

Средняя скорость поршня связана с числом оборотов коленвала и ходом поршня соотношением:

$$C_m = (2 \cdot h) / \tau = 2 \cdot h \cdot \omega$$
 (1/с).

$$\text{Отсюда: } C_m = 2 \cdot 0,092 \text{ м} \cdot 50 \text{ (1/с)} = 9,2 \text{ м/с}.$$

Степень сжатия есть отношение объёма цилиндра к объёму камеры сгорания:

$$\varepsilon = (V_h + V_c) / V_c = V_h / V_c + 1.$$

Рабочий объём цилиндра находится из формулы для эффективной мощности:

$$V_h = (N_e \cdot \kappa) / (2 \cdot P_e \cdot \omega \cdot z) = (51,5 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot 4) / (2 \cdot 6,45 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 50 \text{ 1/с} \cdot 4) = 7,98 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

$$\varepsilon = V_h / V_c + 1 = (7,98 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3) / (1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3) + 1 = 9.$$

$$\text{Ответ: } C_m = 9,2 \text{ м/с}; \varepsilon = 9.$$

Задача 20. Определить экономию топлива в процентах, которую даёт замена инжекторного бензинового двигателя дизельным при средней индикаторной мощности $N_i = 148$ кВт, если индикаторный КПД инжекторного двигателя $\eta_{i1} = 0,39$, КПД дизельного

двигателя $\eta_{i2} = 0,45$. Низшая рабочая теплота сгорания бензина $Q_{н1}^P = 44$ МДж/кг , а дизельного топлива $Q_{н2}^P = 43$ МДж/кг.

Решение:

Индикаторный КПД бензинового двигателя:

$$\eta_{i1} = N_i / (B_1 \cdot Q_{н1}^P).$$

$$\text{Отсюда: } B_1 = N_i / (Q_{н1}^P \cdot \eta_{i1}) = (148 \cdot 10^3 \text{ Вт}) / (44 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг} \cdot 0,39) = 8,62 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}.$$

$$B_2 = N_i / (Q_{н2}^P \cdot \eta_{i2}) = (148 \cdot 10^3 \text{ Вт}) / (43 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг} \cdot 0,45) = 7,65 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}.$$

$$B_1 - B_2 = (8,62 - 7,65) \cdot 10^{-3} \text{ кг/с} = 0,97 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}.$$

$$[(B_1 - B_2) / B_1] \cdot 100\% = 0,113 \cdot 100\% = 11,3\%.$$

Ответ: экономия топлива составит 11,3%.

Контрольные задания и критерии оценки РГР

Для выполнения РГР курсант (студент) должен по номеру зачетной книжки (две последние цифры) в таблице №1 выбрать номер задачи и номер варианта в этой задаче.

Оценка за РГР выставляется по 1 баллу за каждую правильно выполненную задачу.

Таблица №1 Контрольные задания на РГР

№ зач.кн	Номер задачи и вариантов (1.1 – задача 1, вариант 1 и т.д)					№ зач.кн	Номер задачи и вариантов (1.1 – задача 1, вариант 1 и т.д)					
	1	2	3	4	5		6	7	8	9	10	11
01	1.1	2.1	7.1	14.1	18.1	42	1.1	3.1	6.1	10.1	17.1	
02	1.2	2.2	7.2	14.2	18.2	43	1.2	3.2	6.2	10.2	17.2	
03	1.3	2.3	7.3	14.3	18.3	44	1.3	3.3	6.3	10.3	17.3	
04	1.4	2.4	7.4	14.4	18.4	45	1.4	3.4	6.4	10.4	17.4	
05	1.5	2.5	7.5	14.5	18.5	46	1.5	3.5	6.5	10.5	17.5	
06	1.6	2.6	7.6	14.6	18.6	47	1.6	3.6	6.6	10.6	17.6	
07	1.7	2.7	7.7	14.7	18.7	48	1.7	3.7	6.7	10.7	17.7	
08	1.8	2.8	7.8	14.8	18.8	49	1.8	3.8	6.8	10.8	17.8	
09	1.9	2.9	7.9	14.9	18.9	50	1.9	3.9	6.9	10.9	17.9	
10	1.10	2.10	7.10	14.10	18.10	51	1.10	3.10	6.10	10.10	17.10	
11	1.1	3.1	8.1	12.1	19.1	52	1.1	4.1	7.1	12.1	18.1	
12	1.2	3.2	8.2	12.2	19.2	53	1.2	4.2	7.2	12.2	18.2	
13	1.3	3.3	8.3	12.3	19.3	54	1.3	4.3	7.3	12.3	18.3	
14	1.4	3.4	8.4	12.4	19.4	55	1.4	4.4	7.4	12.4	18.4	
15	1.5	3.5	8.5	12.5	19.5	56	1.5	4.5	7.5	12.5	18.5	
16	1.6	3.6	8.6	12.6	19.6	57	1.6	4.6	7.6	12.6	18.6	
17	1.7	3.7	8.7	12.7	19.7	58	1.7	4.7	7.7	12.7	18.7	
18	1.8	3.8	8.8	12.8	19.8	59	1.8	4.8	7.8	12.8	18.8	
19	1.9	3.9	8.9	12.9	19.9	60	1.9	4.9	7.9	12.9	18.9	
20	1.10	3.10	8.10	12.10	19.10	61	1.10	4.10	7.10	12.10	18.10	
21	1.1	4.1	9.1	13.1	20.1	62	1.1	5.1	8.1	13.1	19.1	
22	1.2	4.2	9.2	13.2	20.2	63	1.2	5.2	8.2	13.2	19.2	
23	1.3	4.3	9.3	13.3	20.3	64	1.3	5.3	8.3	13.3	19.3	
24	1.4	4.4	9.4	13.4	20.4	65	1.4	5.4	8.4	13.4	19.4	
25	1.5	4.5	9.5	13.5	20.5	66	1.5	5.5	8.5	13.5	19.5	
26	1.6	4.6	9.6	13.6	20.6	67	1.6	5.6	8.6	13.6	19.6	
27	1.7	4.7	9.7	13.7	20.7	68	1.7	5.7	8.7	13.7	19.7	
28	1.8	4.8	9.8	13.8	20.8	69	1.8	5.8	8.8	13.8	19.8	
29	1.9	4.9	9.9	13.9	20.9	70	1.9	5.9	8.9	13.9	19.9	
30	1.10	4.10	9.10	13.10	20.10	71	1.10	5.10	8.10	13.10	19.10	
31	1.1	5.1	10.1	9.1	19.1	72	1.1	7.1	9.1	14.1	20.1	
32	1.2	5.2	11.1	9.2	19.2	73	1.2	7.2	9.2	14.2	20.2	
33	1.3	5.3	11.2	9.3	19.3	74	1.3	7.3	9.3	14.3	20.3	
34	1.4	5.4	11.3	9.4	19.4	75	1.4	7.4	9.4	14.4	20.4	
35	1.5	5.5	11.4	9.5	19.5	76	1.5	7.5	9.5	14.5	20.5	
36	1.6	5.6	11.5	9.6	19.6	77	1.6	7.6	9.6	14.6	20.6	
37	1.7	5.7	11.6	9.7	19.7	78	1.7	7.7	9.7	14.7	20.7	
38	1.8	5.8	11.7	9.8	19.8	79	1.8	7.8	9.8	14.8	20.8	
39	1.9	5.9	11.8	9.9	19.9	80	1.9	7.9	9.9	14.9	20.9	
40	1.10	5.10	11.9	9.10	19.10	81	1.10	7.10	9.10	14.10	20.10	
41	1.1	6.1	11.10	10.1	20.1	82	1.1	8.1	10.1	15.1	19.9	

Продолжение таблицы №1

№ зач.кн	Номер задачи и вариантов (1.1 – задача 1, вариант 1 и т.д)					№ зач.кн	Номер задачи и вариантов (1.1 – задача 1, вариант 1 и т.д)				
	2	3	4	5	6		7	8	9	10	11
83	1.2	4.1	7.1	15.1	19.1	92	1.2	3.1	6.1	16.1	20.1
84	1.3	4.2	7.2	15.2	19.2	93	1.3	3.2	6.2	16.2	20.2
85	1.4	4.3	7.3	15.3	19.3	94	1.4	3.3	6.3	16.3	20.3
86	1.5	4.4	7.4	15.4	19.4	95	1.5	3.4	6.4	16.4	20.4
87	1.6	4.5	7.5	15.5	19.5	96	1.6	3.5	6.5	16.5	20.5
88	1.7	4.6	7.6	15.6	19.6	97	1.7	3.6	6.6	16.6	20.6
89	1.8	4.7	7.7	15.7	19.7	98	1.8	3.7	6.7	16.7	20.7
90	1.9	4.8	7.8	15.8	19.8	99	1.9	3.8	6.8	16.8	20.8
91	1.10	4.9	7.9	15.9	19.9	-	-	-	-	-	-

Задача 1. Найти удельный объём воздуха v ($v = V / m$) при давлении P и температуре $t^\circ\text{C}$. Молярная масса газа $\mu = 29$ кг/кмоль. Воздух считать идеальным газом.

Таблица 2 Варианты задачи 1

Вариант	Давление P кПа	Температура t $^\circ\text{C}$
1	150	24
2	400	40
3	300	62
4	200	30
5	180	70
6	250	48
7	700	54
8	120	68
9	130	26
10	245	36

Задача №2. В сосуде ёмкостью V содержится азот под давлением P_1 и при температуре t_1 . Молярная масса азота $\mu = 28$ кг/кмоль. Считая азот идеальным газом, определить количество теплоты, которое надо отвести от азота, чтобы понизить его давление при постоянном объёме до P_2 . Найти так же неизвестные параметры, функции состояния и работу процесса.

Таблица 3 Варианты задачи 2

Вариант	Давление P_1 кПа	Температура t_1 $^\circ\text{C}$	Давление P_2 кПа	Ёмкость сосуда V
1	150	24	100	10 л
2	400	40	130	0,02 м ³
3	300	62	200	43 л
4	200	30	120	0,03 м ³
5	180	70	110	17 л
6	250	48	140	26 л
7	700	54	300	0,05 м ³
8	120	68	220	34 л
9	130	26	100	0,015 м ³
10	245	36	160	18 л

Задача № 3. В результате изотермического процесса $m=1$ кг воздуха переводится из одного состояния с параметрами P_1, t_1 в другое с параметрами $P_2, t_2 = t_1$. Определить неизвестные значения термодинамических параметров, изменения внутренней энергии, энтропии, а также теплоту и работу процесса. Молярная масса газа $\mu = 29$ кг/кмоль.

Таблица 4 Варианты задачи 3

Вариант	Давление P_1 кПа	Температура t_1 °С	Давление P_2 кПа
1	150	20	1000
2	400	40	100
3	300	12	800
4	200	30	1200
5	180	60	110
6	250	42	140
7	700	54	300
8	420	63	220
9	130	26	500
10	245	38	110

Задача № 4. 1 кг воздуха с начальным давлением P_1 и начальной температурой t_1 сжимается изобарно до V_2 . Молярная масса воздуха $\mu= 29$ кг/кмоль . Определить неизвестные параметры и функции состояния, а так же работу и теплоту процесса.

Таблица 5 Варианты задачи 4

Вариант	Давление P_1 кПа	Температура t_1 °С	Емкость V
1	250	20	0,1 м ³
2	400	40	0,08 м ³
3	300	12	0,12 м ³
4	200	30	600 л
5	180	60	0,16 м ³
6	250	42	0,14 м ³
7	700	54	600 л
8	420	63	400 л
9	130	26	500 л
10	245	38	0,15 м ³

Задача № 5. 1 кг воздуха с начальным давлением P_1 и начальной температурой t_1 переходит адиабатно в другое равновесное состояние с давлением P_2 . Определить объём газа в начальном и конечном состояниях, конечную температуру, изменения внутренней энергии, энтропии, а так же работу расширения (изменения объёма). Воздух считать идеальным газом.

Таблица 6 Варианты задачи 5

Вариант	Давление P_1 кПа	Температура t_1 °С	Давление P_2 кПа
1	1300	20	200
2	600	40	100
3	100	80	800
4	200	30	1200

Продолжение таблицы 6

5	680	60	1100
6	250	68	140
7	700	54	220
8	420	63	120
9	130	26	500
10	620	38	110

Задача № 6. Найти количество тепла, проходящего за время τ сек через стенку, состоящую из 2-х слоёв, считая толщину слоёв равной d_1 и d_2 . Температура первого и последнего слоёв соответственно равна t_1 и t_2 , а площадь стенки F . Коэффициент теплопроводности первой стенки ζ_1 , а второй ζ_2 .

Таблица 7 Варианты задачи 6

Вариант	Время прохождения тепла τ , сек	Коэфф теплопроводности, Вт/м·град		Площадь стенки, F , м ²	Толщина слоя, м		Температура слоя, °С	
		ζ_1	ζ_2		d_1	d_2	t_1	t_2
1	100	0,1	0,5	4	0,2	0,4	20	- 10
2	600	0,2	0,6	6	0,5	0,3	28	- 20
3	500	0,7	0,06	9	0,5	0,03	26	- 30
4	360	0,5	0,14	6,8	0,1	0,25	21	- 24
5	240	0,3	0,05	2,5	0,15	0,04	18	- 28
6	300	0,24	2,2	5,6	0,2	0,26	19	- 15
7	400	0,32	0,2	2,4	0,16	0,38	22	0
8	720	0,7	0,4	3,6	0,6	0,56	25	2
9	540	0,2	0,6	10	0,04	0,32	32	4
10	900	0,3	0,9	12	0,46	0,6	27	6

Задача № 7. Найти конвективный тепловой поток Φ_k от цилиндрического нагревателя длиной x и диаметром D , если средняя температура его поверхности составляет $t_1 = t_{ст}$, температура среды $t_2 = t_{ж}$. Конвективный коэффициент теплоотдачи от нагревателя принять равным α_k

Таблица 8 Варианты задачи 7

Вариант	Конвективный коэффициент теплоотдачи, α_k , Вт/м ² ·град	Диаметр D , м	Длина x , м	Средняя температура поверхности $t_{ст}$, °С	Температура среды $t_{ж}$, °С
1	6,2	0,24	0,9	70	10
2	8,4	0,5	1,3	78	20
3	9,6	0,32	2,06	86	30
4	6,8	0,2	1,25	81	24
5	7,5	0,15	2,4	76	28
6	5,6	0,2	1,26	69	15
7	12,4	0,24	2,38	72	0
8	9,6	0,74	3,56	85	12
9	16	0,12	2,32	62	14
10	18	0,5	1,6	77	16

Задача № 8. Рассчитать лучистый тепловой поток от стальной окисленной трубы наружным диаметром D , длиной x . Температуру стенки трубы принять равной $t_{ст}$, среды $t_{ж}$, приведенная степень черноты поверхности трубы $\epsilon_{пр}$.

Таблица 9 Варианты задачи 8

Вариант	Приведенная степень черноты поверхности трубы, $\epsilon_{пр}$	Средняя температура поверхности $t_{ст}$, °C	Температура среды $t_{ст}$, °C	Наружный диаметр трубы D , м	Длина трубы x , м
1	0,9	100	15	3,2	1,0
2	0,8	120	20	2,5	1,6
3	0,7	140	25	7,4	0,8
4	0,6	210	30	1,5	1,8
5	0,95	80	15	10,0	2,4
6	0,85	60	10	11,0	2,0
7	0,72	180	12	12,0	0,72
8	0,92	160	24	3,2	2,4
9	0,66	170	36	2,5	3,6
10	0,76	130	18	1,6	0,5

Задача № 9. Рассчитать плотность теплового потока q от нагретой до температуры t_1 жидкости (горячий теплоноситель внутри трубы большого диаметра) через твёрдую стенку трубы толщиной d к холодному теплоносителю, температура которого равна t_2 . Конвективный коэффициент теплоотдачи на границе первый теплоноситель - твёрдая стенка принять равным $\alpha_{к1} = 6600$ Вт/м²·град, а на границе твёрдая стенка-второй теплоноситель $\alpha_{к2} = 8$ Вт/м²·град. Коэффициент теплопроводности материала трубы принять равным ζ .

Примечание: в случае труб большого диаметра внутреннюю и внешнюю поверхности трубы можно считать примерно одинаковыми; плотность теплового потока q от более нагретого теплоносителя к менее нагретому рассчитывается по формуле: $q = (t_1 - t_2) \cdot \theta$;

Таблица 10 Варианты задачи 9

Вариант	Конвективный коэффициент теплоотдачи, Вт/м ² ·град		Толщина трубы, d , мм	Коэффициент теплопроводности материала трубы принять равным, ζ , Вт/м·град	Температура, °C	
	$\alpha_{к1}$	$\alpha_{к2}$			t_1	t_2
1	5600	9,50	2,0	50,4	80	10
2	6200	7,65	1,5	60,3	78	20
3	7100	6,06	2,5	40,3	76	30
4	5200	8,14	3,1	55,2	81	24
5	7200	7,05	4,1	62,0	88	28
6	6125	9,20	5,2	64,6	79	15
7	6550	10,2	2,0	58,3	82	20
8	6380	10,4	4,6	51,6	75	21
9	7320	9,65	2,8	53,3	82	24
10	6650	8,94	5,6	60,6	77	16

Задача № 10. Двигатель работает по циклу Отто (подвод тепла осуществляется при $v = \text{const}$). Начальное состояние рабочего тела P_1, t_1 . Степень сжатия ε . При сгорании выделяется энергия q_1 . Определить параметры цикла в характерных точках (1,2,3,4), полезную работу за цикл, а также термический КПД двигателя и отведённую энергию (q_2). Изобразить цикл в P-V диаграмме и назвать процессы, из которых он состоит.

Таблица 11 Варианты задачи 10

Вариант	Начальное состояние рабочего тела		Выделяемая энергия при сгорании $q_1, \text{кДж/кг}$	Степень сжатия ε
	$P_1, 10^5 \text{Па}$	$t_1, ^\circ\text{C}$		
1	0,80	20	1200	6,0
2	0,82	30	1240	6,3
3	0,84	18	1260	6,9
4	0,86	16	1268	7,1
5	0,88	10	1270	7,4
6	0,90	28	1276	7,8
7	0,92	24	1288	8,2
8	0,94	13	1290	8,6
9	0,95	16	1310	8,9
10	0,98	23	1320	9,0

Задача 11. Для цикла с подводом тепла при $P = \text{const}$ (цикл Дизеля) определить параметры состояния в характерных точках (1,2,3,4), полезную работу (за цикл) и термический КПД, если начальное давление рабочего тела P_1 , начальная температура t_1 , степень сжатия ε , а степень предварительного расширения ψ . Изобразить цикл в P-V диаграмме и назвать процессы, из которых он состоит.

Таблица 12 Варианты задачи 11

Вариант	Начальное состояние рабочего тела		Степень предварительного расширения ψ	Степень сжатия ε
	$P_1, 10^5 \text{Па}$	$t_1, ^\circ\text{C}$		
1	0,80	20	1,5	9
2	0,82	30	1,6	10
3	0,84	18	1,7	11
4	0,86	16	1,8	13
5	0,88	10	1,9	15
6	0,90	28	1,4	16
7	0,92	24	1,3	12
8	0,94	13	1,2	14
9	0,95	16	1,1	17
10	0,98	23	1,6	18

Задача 12. В цикле поршневого двигателя внутреннего сгорания с комбинированным подводом тепла (цикл Тринклера) начальное давление P_1 и начальная температура t_1 . Степень сжатия ε , степень предварительного расширения ψ и степень повышения давления χ . Определить параметры во всех характерных для цикла точках (1,2,3,4,5), количество подведенного и отведенного теплот, полезную работу за цикл и термический КПД цикла. Изобразить цикл в P-V диаграмме и назвать процессы, из которых он состоит.

Таблица 13 Варианты задачи 12

Вариант	Начальное давление P_1 , МПа	Начальная температура t_1 , °С	Степень предварительного расширения ψ	Степень сжатия ε	Степень повышения давления χ
1	0,080	30	1,5	12	1,70
2	0,092	40	1,6	10	1,76

Продолжение таблицы 13

3	0,094	48	1,7	11	1,80
4	0,096	46	1,8	13	1,84
5	0,098	50	1,9	15	1,88
6	0,086	38	1,4	16	1,90
7	0,092	44	1,3	12	1,96
8	0,095	53	1,2	14	1,98
9	0,097	56	1,1	17	2,10
10	0,090	44	1,3	16	2,00

Задача 13. Начальные параметры воздуха, поступающего в компрессор газотурбинной установки (ГТУ) P_1, t_1 . Степень повышения давления в компрессоре ГТУ χ . Температура газа перед соплами турбины t_3 . Компрессор засасывает M кг/ч воздуха. Определить параметры всех точек цикла, термический КПД идеальные мощности компрессора, турбины и всей ГТУ. Рабочим телом ГТУ считать идеальный воздух. Изобразить цикл в P - V диаграмме и назвать процессы, из которых он состоит.

Таблица 14 Варианты задачи 13

Вариант	Начальное давление P_1 , МПа	Начальная температура t_1 , °С	Количество воздуха, засасываемого компрессором, $M \cdot 10^5$ кг/ч	Температура газа перед соплами турбины t_3 , °С	Степень повышения давления χ
1	0,095	30	1,5	712	6
2	0,092	20	1,6	610	7
3	0,094	18	1,7	651	8
4	0,096	16	1,8	636	5
5	0,098	10	1,9	658	9
6	0,086	18	1,4	660	6
7	0,092	14	1,3	716	5
8	0,095	13	1,2	644	7
9	0,097	16	1,1	676	8
10	0,092	15	1,3	660	7

Задача 14. Определить среднее индикаторное давление P_i и индикаторную мощность N_i четырёхцилиндрового четырёхтактного дизельного двигателя, если диаметр цилиндра D , ход поршня h , частота вращения коленчатого вала равна ω . С помощью эксперимента получена индикаторная диаграмма полезной площадью F , длиной x при масштабе давлений y .

Таблица 15 Варианты задачи 14

Вариант	Диаметр цилиндра D , см	Ход поршня h , см	Вращения коленчатого вала ω , об/мин	Давление y , 10^8 Па/м	Площадь F , 10^{-3} м ²	Длина x , см
1	14	22	1380	0,6	2,1	16
2	15	23	1360	0,7	2,2	14
3	16	19	1390	0,5	2,3	15
4	19	24	1410	0,4	2,4	13
5	17	20	1420	0,8	2,5	17
6	13	19	1430	0,9	2,6	18

Продолжение таблицы 13

7	11	18	1440	0,6	2,7	14
8	18	24	1460	0,7	2,8	16
9	16	22	1370	0,8	2,9	12
10	15	20	1420	0,6	2,2	11

Задача № 15. Определить удельный эффективный расход топлива шести цилиндрического четырёхтактного дизельного двигателя, если среднее эффективное давление P_e , полный объём цилиндра V_a , объём камеры сгорания V_c , частота вращения коленчатого вала ω и расход топлива B .

Таблица 16 Варианты задачи 15

Вариант	Среднее эффективное давление P_e , 10^5 Па	Полный объём цилиндра V_a , 10^{-4} м ³	Вращения коленчатого вала ω , об/с	Расход топлива B , 10^{-3} кг/с	Объём камеры сгорания V_c , 10^{-5} м ³
1	8,2	8,3	40	4,1	7,0
2	8,3	8,2	42	4,7	6,9
3	8,4	8,4	43	4,5	6,8
4	7,9	8,5	44	4,4	6,7
5	7,8	8,8	46	3,8	7,1
6	8,5	8,6	48	3,9	7,2
7	8,6	8,9	52	4,6	7,3
8	7,8	8,1	41	3,7	7,4
9	7,7	8,0	45	3,8	7,5
10	7,5	7,9	49	4,6	7,6

Задача № 16. Определить литровую мощность и удельный эффективный расход топлива восьмицилиндрового четырёхтактного карбюраторного двигателя, если среднее индикаторное давление P_i , диаметр цилиндра D , ход поршня h , угловая скорость вращения коленчатого вала ω , механический КПД η_m и расход топлива B .

Таблица 17 Варианты задачи 16

Вариант	Среднее индикаторное давление P_i , 10^5 Па	Диаметр цилиндра D , м	Скорость вращения коленчатого вала ω , об/с	Расход топлива B , 10^{-3} кг/с	Ход поршня h , м	Механический КПД, η_m
1	7,2	0,13	60	4,1	0,15	0,80
2	8,3	0,12	42	4,7	0,14	0,79
3	8,4	0,11	53	4,5	0,13	0,78
4	7,9	0,14	54	4,4	0,12	0,81
5	7,8	0,15	56	3,8	0,16	0,82
6	8,5	0,16	58	3,9	0,17	0,84
7	8,6	0,17	52	4,6	0,18	0,80
8	7,8	0,12	61	3,7	0,19	0,83
9	7,7	0,13	65	3,8	0,16	0,79
10	7,5	0,14	59	4,6	0,15	0,81

Задача № 17. Определить диаметр цилиндра и ход поршня четырёхцилиндрового четырёхтактного дизельного двигателя, если эффективная мощность N_e , среднее

эффективное давление P_e , частота вращения коленчатого вала ω , а средняя скорость поршня C_m .

Таблица 18 Варианты задачи 17

Вариант	Среднее эффективное давление P_e , 10^5 Па	Вращения коленчатого вала ω , об/с	Средняя скорость поршня C_m , м/с	Эффективная мощность N_e , кВт
1	5,6	1800	9,1	81
2	5,4	1900	8,8	76
3	5,9	1700	9,5	82
4	6,1	1600	8,2	83
5	6,3	1750	9,3	84
6	6,5	1859	9,0	85
7	6,0	1635	8,9	79
8	7,4	1835	8,7	78
9	6,7	1800	8,8	77
10	5,5	1900	9,0	76

Задача № 18. Определить мощность механических потерь восьмицилиндрового четырёхтактного двигателя с искровым зажиганием, если среднее индикаторное давление P_i , диаметр цилиндра D , ход поршня h , частота вращения коленчатого вала ω и механический КПД η_m .

Таблица 19 Варианты задачи 18

Вариант	Среднее индикаторное давление P_i , 10^5 Па	Диаметр цилиндра D , м	Скорость вращения коленчатого вала ω , об/с	Расход топлива B , 10^{-3} кг/с	Ход поршня h , м	Механический КПД, η_m
1	7,2	0,13	60	4,1	0,095	0,80
2	8,3	0,12	42	4,7	0,094	0,79
3	8,4	0,11	43	4,5	0,093	0,78
4	7,9	0,14	44	4,4	0,092	0,81
5	7,8	0,15	46	3,8	0,091	0,82
6	8,5	0,16	48	3,9	0,089	0,84
7	8,6	0,17	52	4,6	0,088	0,80
8	7,8	0,12	41	3,7	0,096	0,83
9	7,7	0,13	45	3,8	0,097	0,79
10	7,5	0,14	49	4,6	0,098	0,81

Задача 19. Определить среднюю скорость поршня и степень сжатия четырёхцилиндрового четырёхтактного двигателя с искровым зажиганием, если эффективная мощность N_e , среднее эффективное давление P_e , ход поршня h , частота вращения коленчатого вала ω и объём камеры сгорания V_c .

Таблица 20 Варианты задачи 19

Вариант	Среднее индикаторное давление P_i , 10^5 Па	Скорость вращения коленчатого вала ω , об/с	Мощность N_e , кВт	Ход поршня h , м	Объём камеры сгорания V_c , 10^{-4} м ³
---------	---	--	----------------------	--------------------	--

1	6,65	51	51	0,093	1,1
2	6,45	52	52	0,092	1,2
3	5,96	53	53	0,091	1,3
4	6,15	54	53	0,090	0,9

Продолжение таблицы 19

5	6,32	55	54	0,089	0,8
6	6,52	49	55	0,088	0,7
7	6,01	48	59	0,087	0,8
8	6,42	47	58	0,086	0,9
9	6,71	50	57	0,085	1,0
10	6,50	51	56	0,088	1,1

Задача 20. Определить экономию топлива в процентах, которую даёт замена инжекторного бензинового двигателя дизельным при средней индикаторной мощности N_i , если индикаторный КПД инжекторного двигателя η_{i1} , КПД дизельного двигателя η_{i2} . Низшая рабочая теплота сгорания бензина $Q_{н1}^P$, а дизельного топлива $Q_{н2}^P$.

Таблица 21 Варианты задачи 20

Вариант	Индикаторная мощность N_i , кВт	Индикаторный КПД инжекторного двигателя η_{i1}	Индикаторный КПД дизельного двигателя η_{i2}	Теплота сгорания бензина $Q_{н1}^P$	Теплота сгорания дизельного топлива $Q_{н2}^P$
1	148	0,39	0,45	44	43
2	147,5	0,38	0,44	43,9	42,9
3	148,2	0,37	0,43	43,5	42,6
4	147,9	0,36	0,42	44	43
5	148,5	0,39	0,43	44,2	43,2
6	147,8	0,37	0,42	44	43
7	147	0,35	0,40	43,5	42,5
8	142	0,33	0,41	43,6	42,6
9	140	0,35	0,45	43,8	42,8
10	142	0,38	0,46	43,7	42,7

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей/Н.Б.Варгафтик. – М.: Издательский центр «Наука», 1972.- 720 с.
2. Крутов, В.И. Теплотехника / В.И. Крутов. – М.: Машиностроение, 2009. – 246 с.
3. Киреев Б.Н. Теплотехника: учебно-методическое пособие /Б.Н.Киреев.- Елабуга:Изд-во ЕГПУ, 2010.- 196 с.
4. Седёлкин В.М.Исследование работы воздушного компрессора: Методуказания по выполнению лабораторного практикума/В.М.Седёлкин и др..- Саратов: Издательство Саратовского ГТУ, -2010.- 15 с.
5. Автомобильные двигатели:учебник/М.Г.Шатров [и др]; под ред.М.Г.Шатрова. - М.: «Академия»,2010.- 464 с.
6. <http://www.autoshcool.ru/>
7. http://www.gdi.su/audi_vw.php
8. <http://rus-auto.net/articles/p.101.html>
9. www.dvs-vgsha.ru/pdf/posobieispitania/.
10. <http://www.sibadi.org/upload/praktikum.pdf> Стендовые испытания двигателей внутреннего сгорания: Лабораторный практикум для студентов механических специальностей / Сост.: А.Л.Иванов, А.С.Ненишев, И.И.Ширлин. Омск: Изд-во СибАДИ, 2008. - 36 с.
11. <http://5fan.ru/wievjob.php?id=4993>
12. <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/5132>.
13. Бакушинский А.Б., Власов В.К.Элементы высшей математики/А.Б.Бакушинский и др..-М.:Просвещение, 1998 - 336 с.

Приложение 1. Обозначения физических величин и их единицы измерения

Наименование, обозначение	Единица измерения в системе СИ	Используемая в работе
Коэффициент теплопроводности, ζ		(Вт/м) · град
Толщина стенки, d	м	см = 10^{-2} м
Диаметр цилиндра, D	м	см = 10^{-2} м
Термическое сопротивление стенки, R_t		(град/Вт) · м ²
Конвективный коэффициент теплоотдачи, α_k		(Вт/м ²) · град
Коэффициент теплопередачи, θ		(Вт/м ²) · град
Давление, P	Паскаль (Па)	кПа = 10^3 Па
Давление атмосферное, P _{атм}	Па	100 кПа
Работа, L	Джоуль (Дж)	кДж = 10^3 Дж
Работа удельная, l	Дж/кг	кДж/кг = 10^3 Дж/кг
Изменение внутренней энергии, ΔU	Дж	кДж = 10^3 Дж
Изменение удельной внутренней энергии, Δu	Дж/кг	кДж/кг = 10^3 Дж/кг
Изменение энтропии, ΔS	Дж/град	кДж/град = 10^3 Дж/град
Изменение удельной энтропии, Δs	Дж/кг·град	кДж/кг·град = 10^3 Дж/кг·град
Молярная изохорная теплоёмкость, C_v^m	Дж/кмоль·град	Дж/кмоль·град
Удельная изохорная теплоёмкость, c_v		Дж/кг·град
Полный объём, V	м ³	м ³ = 10^3 л = 10^6 см ³
Удельный объём, v		м ³ /кг
Универсальная газовая постоянная, R		8314 Дж/кмоль·град
Приведенная газовая постоянная, $R_\mu = R/\mu$		Дж/кг·град
Молярная масса, μ		кг/кмоль
Теплота, Q		Дж
Удельная теплота, q		Дж/кг
Площадь, F		м ²
Усилие (сила), G		н
Число оборотов коленвала, ω	1/с	1/мин = 1/60с
Мощность, N	Вт	кВт = 10^3 Вт
Производительность, J	м ³ /с	м ³ /с = $6 \cdot 10^4$ л/мин