

Киреев Б.Н.



**У
Ч
Е
Б
Н
О
Е
П
О
С
О
Б
И
Е**

Транспортная энергетика

Практические занятия

**Елабуга
2017**

Часть I. Методические указания по решению типовых задач

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 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 к.п.д. машины. Полученные значения к.п.д. 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 индицирования, позволяющий опытным путём определить эффективную мощность, вращающий момент, работу за цикл, что позволяет рассчитать индикаторную мощность, кпд и др.

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

В Приложении 2 приведены правила округления результатов расчётов в приближённых вычислениях.

Тема 2: « 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 $t^\circ = 60^\circ\text{C}$. Молярная масса хлора $\mu = 71 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$.

Решение:

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

Параметры состояния идеального газа (плотность ρ , объём V и масса m) связаны уравнением Менделеева –Клапейрона: $P \cdot V = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot T$. Уравнение можно переписать в виде:

$$\rho = \frac{m \cdot R \cdot T}{\mu \cdot V} = \frac{\rho \cdot R \cdot T}{\mu}. \quad \text{Отсюда плотность: } \rho = \frac{P \cdot \mu}{R \cdot T}.$$

В формулу входят:

абсолютная температура Кельвина: $T^\circ\text{K} = t^\circ\text{C} + 273,15 = (t^\circ + 273)^\circ\text{K}$; универсальная газовая постоянная $R = 8314$

$\frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}}$ и молярная масса μ . Проведём расчёты плотности хлора при заданных условиях:

$$\rho = \frac{410 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot 71 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}}{8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}} \cdot 333 \text{ } ^\circ\text{K}} = 10,51 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \approx 10,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

$$Pa = \frac{H}{m^2}; \quad \text{Дж} = n \cdot m; \quad \text{отсюда } Pa \cdot m^3 = \text{Дж}.$$

Округление проведено до двух значащих цифр с недостатком. Знак приближённого округления (\approx) в дальнейшем использовать не будем.

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

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

При промежуточных вычислениях можно брать значащих цифр на 1 ед. больше, чем в числе с наименьшим количеством значащих цифр (число 71 имеет 2 значащих цифры; $2+1=3$).

Тема 2: «Нахождение основных параметров состояния и функций состояния, теплоты и 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 $P_1=3$ МПа и при температуре $t_1^\circ= 80^\circ\text{C}$. Молярная масса азота $\mu = 28 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$. 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 и 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: $P_1 \cdot V_1 = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot T_1$; $P_2 \cdot V_2 = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot T_2$

и поделить первое уравнение на второе: $\frac{P_1 \cdot V_1}{P_2 \cdot V_2} = \frac{T_1}{T_2}$.

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

Для изохорного процесса объёмы одинаковы и их можно сократить. Уравнение изохорного процесса:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{или} \quad \frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2}{T_1}.$$

Из него можно найти неизвестное значение температуры T_2 .

$$T_2 = \frac{P_2}{P_1} \cdot T_1 = \frac{300 \text{ кПа}}{3000 \text{ кПа}} \cdot 353 \text{ }^\circ\text{K} = 35,3^\circ\text{K}.$$

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: $\Delta U = \frac{m}{\mu} \cdot C_v^\mu \cdot \Delta t^\circ$.

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

$\Delta t^\circ\text{C} = \Delta T^\circ\text{K} = T_2^0 - T_1^0 = (t_2^0 - t_1^0)$ - 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:

$$P_1 \cdot V_1 = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot T_1.$$

Масса газа в сосуде:

$$m = \frac{P_1 \cdot V_1 \cdot \mu}{R \cdot T_1} = \frac{3 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 0,8 \text{ м}^3 \cdot 28 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}}{8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}} \cdot 353 \text{ град}} = 0,022897 \cdot 10^3 \text{ кг} = 23 \text{ кг}.$$

Изменение внутренней энергии: $\Delta U = \frac{m}{\mu} \cdot C_V^\mu \cdot \Delta t^0$;

$$\Delta U = \frac{23 \text{ кг}}{28 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}} \cdot 2,5 \cdot 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}} \cdot (35,3^0\text{K} - 353^0\text{K}) = -5424,2 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

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

д) Изменение энтропии для газа определяется выражениями:

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} \cdot C_V^\mu \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + \frac{m}{\mu} R \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}; \Delta S = \frac{m}{\mu} \cdot C_p^\mu \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} - \frac{m}{\mu} R \cdot \ln \frac{P_2}{P_1};$$

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} \cdot C_V^\mu \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} + \frac{m}{\mu} R \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

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 $\ln \frac{V_2}{V_1} = \ln 1 = 0$.

Предпочтительнее третья формула, так как значения давлений заданы.

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} \cdot C_p^\mu \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{23 \text{ кг}}{28 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}} \cdot 2,5 \cdot 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}} \cdot \ln \frac{300 \text{ кПа}}{3000 \text{ кПа}};$$

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

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 $C_x = \left(\frac{\delta Q}{dT}\right)$; 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 $\mu = 29 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$.

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: $P_1 \cdot V_1 = \frac{m}{\mu} R \cdot T_1$; $P_2 \cdot V_2 = \frac{m}{\mu} R \cdot T_2$.

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

$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$. Неизвестные значения конечного объёма:

$$V_2 = \frac{P_1 \cdot V_1}{P_2} = \frac{1 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 22,3 \text{ м}^3}{41,5 \cdot 10^5 \text{ Па}} = 0,537 \text{ м}^3 = 0,54 \text{ м}^3.$$

Остальные параметры известны.

б) Изменение внутренней энергии:

$\Delta U = \frac{m}{\mu} \cdot C_v^\mu \cdot \Delta t^0 = 0$, так как изменение температуры равно нулю.

в) Для нахождения изменения энтропии используем выражение:

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} \cdot C_p^\mu \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} - \frac{m}{\mu} R \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} = - \frac{m}{\mu} R \cdot \ln \frac{P_2}{P_1}, \text{ так как первое}$$

слагаемое равно нулю ($\ln \frac{T_2}{T_1} = \ln 1 = 0$)

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

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

г) Работа в изотермическом процессе: $L = \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dV$. Для нахождения интеграла необходимо знать зависимость объёма от давления. Заменим давление через объём, используя уравнение

Менделеева –Клапейрона: $P = \frac{\frac{m}{\mu} \cdot R \cdot T}{V}$. В этом выражении делитель является постоянной величиной и его можно вынести за знак интеграла: $L = \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dV = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot T \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot T \ln \frac{V_2}{V_1}$.

$$L = \frac{26 \text{ кг}}{29 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}} \cdot 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}} \cdot 300 \text{ } ^\circ\text{K} \cdot \ln \frac{0,54 \text{ м}^3}{22,3 \text{ м}^3};$$

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

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

Теплоёмкость изотермического процесса, по определению, равна ∞ . $C_x = \left(\frac{\delta Q}{dT}\right)$; $dT=0$ и $C_T = \left(\frac{\delta Q}{0}\right) = \infty$.

3.Процесс **изобарный**

Задача № 4. 1 кг воздуха с начальным давлением $P_1 = 5$ МПа и начальной температурой $t_1 = 350^\circ\text{C}$ сжимается *изобарно* до $V_2 = 4$ л. Молярная масса воздуха $\mu = 29 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$. 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: $\frac{P_1 \cdot V_1}{P_2 \cdot V_2} = \frac{T_1}{T_2}$, При равенстве

давлений: $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$. 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, на-

ходят из уравнения Менделеева-Клапейрона. Так, начальный

$$\text{объём: } V_1 = \frac{\frac{m}{\mu}}{P_1} \cdot R \cdot T_1 = \frac{\frac{1 \text{ кг}}{29 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}}}{5 \cdot 10^6 \text{ Па}} \cdot 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}} \cdot 623 \text{ } ^\circ\text{К};$$

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

Зная V_1 , можно найти значение температуры газа во втором состоянии:

$$T_2 = \frac{V_2}{V_1} \cdot T_1 = \frac{0,004 \text{ м}^3}{0,036 \text{ м}^3} \cdot 623 \text{ } ^\circ\text{К} = 69 \text{ } ^\circ\text{К}.$$

б) Изменение внутренней энергии: $\Delta U = \frac{m}{\mu} \cdot C_v^\mu \cdot \Delta t$;

$$\Delta U = \frac{m}{\mu} \cdot C_v^\mu \cdot \Delta t^0 = \frac{1 \text{ кг}}{29 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}} \cdot 2,5 \cdot 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}} \cdot (69 \text{ } ^\circ\text{К} - 623 \text{ } ^\circ\text{К});$$

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

в) Изменение энтропии для изобарного процесса можно взять в форме: $\Delta S = \frac{m}{\mu} \cdot C_v^\mu \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} + \frac{m}{\mu} R \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{\mu} R \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$. Первое слагаемое равно нулю.

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

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:

$C_p^\mu = C_v^\mu + R$. Для воздуха:

$$C_p^\mu = \frac{5}{2} \cdot R + R = \frac{7}{2} \cdot R = 3,5 \cdot 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}} = 29099 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}}.$$

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

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, из-

менения 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:

$$V_1 = \frac{\frac{m}{\mu}}{P_1} \cdot R \cdot T_1; \quad V_1 = \frac{\frac{2 \text{ кг}}{29 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}}}{5 \cdot 10^6 \text{ Па}} \cdot 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}} \cdot 623 \text{ } ^\circ\text{K} = 0,07144 \text{ м}^3.$$

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

Значения конечного объёма можно найти из формулы Пуассона в виде: $P_1 \cdot V_1^\gamma = P_2 \cdot V_2^\gamma$; $\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^\gamma = \frac{P_1}{P_2}$. Чтобы найти V_2 , надо освободиться от степени. С этой целью необходимо обе части

уравнения возвести в степень $\frac{1}{\gamma}$; получаем $\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{1/\gamma}$.

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

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

Конечное значение температуры воздуха можно найти из уравнения: $T_1 \cdot V_1^{\gamma-1} = T_2 \cdot V_2^{\gamma-1}$;

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

б) Изменение внутренней энергии: $\Delta U = \frac{m}{\mu} \cdot C_v^\mu \cdot \Delta t$;

$$\Delta U = \frac{2 \text{ кг}}{29 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}} \cdot 2,5 \cdot 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}} \cdot (106 \text{ } ^\circ\text{K} - 623 \text{ } ^\circ\text{K});$$

$$\Delta U = -741093 \text{ Дж} = -740000 \text{ Дж} = -740 \text{ кДж}.$$

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

г) Работу можно найти из первого начала термодинамики:

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

Теплоёмкость адиабатного процесса равна нулю:
 $C_s = \left(\frac{\delta Q}{dT}\right) = \frac{0}{dT} = 0$, 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 $t_1^0 = 24^\circ\text{C}$ и $t_2^0 = -20^\circ\text{C}$, а площадь стенки $F = 12$ м². Коэффициент теплопроводности первой стенки $\zeta_1 = 0,24 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$, а второй - $\zeta_2 = 1,0 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$.

Решение:

Тепловой поток через двухслойную твёрдую стенку определяется по формуле: $\Phi = \frac{F \cdot (t_1^0 - t_2^0)}{R_t}$. Здесь F – площадь стенки, t_1^0 и t_2^0 – начальная и конечная температуры стенки, R_t – термическое сопротивление стенки. Его определяют по формуле: $R_t = \frac{d_1}{\zeta_1} + \frac{d_2}{\zeta_2}$; $R_t = \frac{0,5 \text{ м}}{0,24 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}} + \frac{0,03 \text{ м}}{1,0 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}} = 2,1 \frac{\text{град}}{\text{Вт}} \cdot \text{м}^2$

По определению тепловой поток $\Phi = \frac{Q}{\tau}$. Отсюда $Q = \Phi \cdot \tau$.

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

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

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

Ответ: $\Phi = 251$ Вт; $Q = 151$ 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 $t_1^0 = 100^\circ\text{C}$, температура среды $t_2^0 = 20^\circ\text{C}$. Конвективный тепловой поток от нагревателя принять равным $\Phi=120$ Вт.

Решение:

Коэффициент теплоотдачи находится из уравнения Ньютона-Рихмана: $\Phi_k = \alpha_k \cdot F \cdot (t_1^0 - t_2^0)$; $F = \pi \cdot D \cdot x$ – площадь теплообмена, равняется площади боковой поверхности цилиндра.

дра; $t_1^0 = t_{ст}^0$ – температура стенки нагревателя; $t_2^0 = t_{ж}^0$ – 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:

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

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

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 $t_{ст}^0 = 120$ °С, среды $t_{ж}^0 = 22$ °С, приведенная степень черноты поверхности трубы $\varepsilon_{пр} = 0,8$.

Решение:

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

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

Здесь $F = \pi \cdot D \cdot x$ – площадь боковой поверхности цилиндра, площадь теплообмена. $F = 3,14 \cdot 0,12 \text{ м} \cdot 2,4 \text{ м} = 0,904 \text{ м}^2$.

$\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты поверхности цилиндра; $C_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ – постоянная излучения; $T_{ст}$ – абсолютная температура поверхности стенки; $T_{ж}$ – абсолютная температура среды (по шкале Кельвина).

Значение лучистого теплового потока:

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

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

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

Задача № 9. Рассчитать плотность теплового потока q от нагретой до температуры $t_1^0 = 84$ °С жидкости (горячий теплоноситель внутри трубы большого диаметра) через твёрдую стенку трубы толщиной $d = 6,8$ мм к холодному теплоносителю, температура которого равна $t_2^0 = 18$ °С. Конвективный коэффициент теплоотдачи на границе первый теплоноситель-твёрдая стенка

принять равным $\alpha_{к1} = 6600 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$, а на границе твёрдая стенка-второй теплоноситель $\alpha_{к2} = 8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$.

Коэффициент теплопроводности материала трубы:

$$\zeta = 51,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$$

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: $q = (t_1^0 - t_2^0) \cdot \theta$.

Решение:

Коэффициент теплопередачи θ определяется из соотношения:

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

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

Плотность теплового потока:

$$q = (t_1^0 - t_2^0) \cdot \theta = 660^\circ\text{C} \cdot 7,9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}} = 521 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Ответ: $q = 521 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Тема 3: «Идеальные циклы тепловых машин»

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

Определить полезную работу за цикл, а также термический к.п.д. 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 ($q_1 = \frac{Q_1}{m}$, $v = \frac{V}{m}$ 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);

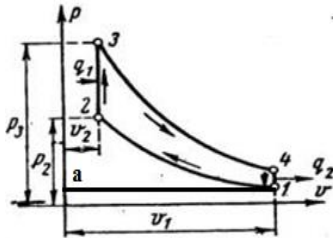


Диаграмма цикла Отто

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).

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

$$\eta_T = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{l_{ц}}{q_1}.$$

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

$$\eta_T = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{(\gamma-1)}} \quad \text{где } \varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = \frac{V_1}{V_2} \text{ - степень сжатия}$$

рабочего тела. В цикле Отто рабочим телом считается идеальный воздух. В данной задаче:

$$\eta_T = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{(\gamma-1)}} = 1 - \frac{1}{6^{(1,4-1)}} = 1 - \frac{1}{2,05} = 0,51.$$

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 к.п.д. через работу за цикл ($l_{ц}$) и подведенную теплоту (q_1):

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

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 $l = \frac{L}{m} = \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dV$. 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:

$l_{1-2} = - \Delta u$, $\Delta u = \frac{1}{\mu} \cdot C_v \mu \cdot \Delta t^0 = \frac{5}{2} \cdot \frac{R}{\mu} \cdot \Delta t^0$ – изменение удельной внутренней энергии. Для нахождения изменения удельной внутренней энергии надо знать температуру t_2^0 .

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:

$$v_1 = \frac{8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}}}{0,9 \cdot 10^5 \text{Па} \cdot 29 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}} \cdot 293 \text{ } ^0\text{К} = 0,933 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} . \text{ Так как степень}$$

сжатия известна, можно найти конечный объём при сжатии:

$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0,933 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}}{6} = 0,156 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$. Температура (в градусах Кельвина) в конце процесса сжатия определяется из уравнения для адиабатного процесса:

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

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

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

Работа сжатия:

$$l_{1-2} = - \Delta u = - \frac{1}{29 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}} \cdot 2,5 \cdot 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}} \cdot (600^0\text{К} - 293^0\text{К});$$

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

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

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

Значения удельной работы получаются примерно одинаковыми,

$$l_{1-2} = \frac{1}{29 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} \cdot 0,4} \cdot 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}} \cdot 293 \text{ }^0\text{К} \cdot [1 - 2,0461] = -219,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Округление до двух значащих цифр даёт $l_{1-2} = -220 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

Работа расширения:

$$l_{3-4} = \frac{R \cdot T_3}{(\gamma - 1) \cdot \mu} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right]. \text{ Здесь неизвестны значения}$$

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

$$\text{термодинамики } q_1 = \Delta u = \frac{1}{\mu} \cdot C_v \mu \cdot \Delta t^0 = \frac{5}{2} \cdot \frac{R}{\mu} \cdot \Delta t^0$$

Отсюда:

$$\Delta t^0 = \frac{q_1}{\frac{5}{2} \cdot \frac{R}{\mu}} = \frac{q_1 \cdot \mu}{2,5 \cdot R} = \frac{1287 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot 29 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}}{2,5 \cdot 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}}} = 1795,67 \text{ град},$$

$\Delta t^0 = \Delta T^0 = 1800 \text{ град}$. Так как 1 град. Цельсия равен 1 град.

Кельвина, то разницу температур можно записывать как в $^0\text{К}$, так и в $^0\text{С}$.

$$T_3 = T_2 + 1800^0\text{К} = 2400 \text{ }^0\text{К}.$$

$$t_3^0 = t_2^0\text{С} + 1800^0\text{С} = 327^0\text{С} + 1800^0\text{С} = 2127 \text{ }^0\text{С}. \text{ Проверяем:}$$

$$T_3 = (2127 + 273,15) = 2400 \text{ }^0\text{К}.$$

Из уравнения изохорного процесса для участка диаграммы 2-3:

$$\frac{P_3}{P_2} = \frac{T_3}{T_2}; \quad \text{Отсюда } P_3 = P_2 \cdot \frac{T_3}{T_2} = 1,11 \text{ МПа} \cdot \frac{2400 \text{ }^0\text{К}}{600 \text{ }^0\text{К}} = 4,440 \text{ МПа}.$$

Давление в конце процесса расширения P_4 :

$$P_3 \cdot \nu_2^\gamma = P_4 \cdot \nu_1^\gamma; \quad P_4 = P_3 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^\gamma = 4,44 \text{ МПа} \cdot \left(\frac{1}{6} \right)^{1,4} = 0,361 \text{ МПа}.$$

Удельная работа расширения на участке 3-4:

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

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

Удельная работа за цикл:

$$l_{\text{ц}} = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4} + l_{4-1} = l_{1-2} + l_{3-4} = -220 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} + 0 + 881 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} + 0.$$

$$l_{ц} = 661 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

$$\text{К.п.д. цикла : } \eta_{\Gamma} = \frac{l_{ц}}{q_1} = \frac{661 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}}{1287 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}} = 0,51.$$

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

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

г) Температура в конце процесса расширения:

$$T_4 \cdot v_1^{(\gamma-1)} = T_3 \cdot v_2^{(\gamma-1)}; \quad T_4 = T_3 \cdot \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\gamma-1} = T_3 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{\gamma-1} = 2400^{\circ}\text{K} \left(\frac{1}{6}\right)^{0,4}.$$

$$T_4 = 2400^{\circ}\text{K} \cdot 0,488 = 1170^{\circ}\text{K}.$$

$$\text{Ответ: } q_2 = 626 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \quad l_{ц} = 661 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \quad \eta_{\Gamma} = 0,51.$$

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 к.п.д., если $P_1 = 0,98 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $t_1^0 = 50^{\circ}\text{C}$, степень сжатия $\varepsilon = 16$, а степень предварительного расширения $\psi = 1,6$.

Цикл Дизеля (компрессорный дизель) протекает следующим образом:

a-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.

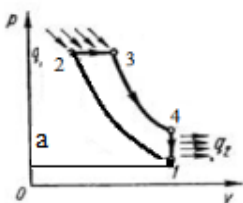


Диаграмма цикла Дизеля

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.

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:

$\eta_{\Gamma} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}} \cdot \frac{\psi^{\gamma} - 1}{\gamma \cdot (\rho - 1)}$; $\psi = \frac{v_3}{v_2} = \frac{v_3}{v_2}$ - степень предварительного расширения рабочего тела в результате горения при постоянном давлении; $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$ - степень сжатия, $\gamma = 1,4$ - показатель адиабаты.

$$\eta_{\Gamma} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}} \cdot \frac{\psi^{\gamma} - 1}{\gamma \cdot (\rho - 1)} = 1 - \frac{1}{3,031} \cdot \frac{1,931 - 1}{1,4 \cdot (1,6 - 1)} = 1 - 0,37 = 0,63.$$

б) Параметры состояния для характерных точек цикла (1,2,3,4) рассчитываются аналогично задаче № 11.

Удельный объем в начальном состоянии:

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

$$v_1 = 0,945 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0,945 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}}{1,6} = 0,059 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; \quad v_3 = 1,6 \cdot v_2 = 0,095 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Давление в конце адиабатного процесса сжатия:

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

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

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

$$P_4 = 0,191 \text{ МПа}.$$

Температура в конце процесса сжатия:

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma-1} = 323 \text{ }^\circ\text{К} \cdot \left(\frac{0,945 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}}{0,059 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}}\right)^{1,4-1} = 323 \text{ }^\circ\text{К} \cdot (16)^{0,4} = 979^\circ\text{К}.$$

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

$$T_3 = T_2 \cdot \left(\frac{v_3}{v_2}\right) = 979^\circ\text{К} \cdot 1,6 = 1570^\circ\text{К}.$$

Температура в конце адиабатного процесса расширения:

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

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

Температуру T_4 так же можно найти, используя уравнение для

$$\text{изохорного процесса: } \frac{P_1}{P_4} = \frac{T_1}{T_4};$$

$$T_4 = T_1 \cdot \left(\frac{0,191 \text{ МПа}}{0,098 \cdot \text{МПа}}\right) = 323 \text{ }^\circ\text{К} \cdot 1,949 = 630^\circ\text{К}.$$

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:

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

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

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

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

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

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

При адиабатном расширении удельная работа:

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

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

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

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

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

в) Полезная работа за цикл и термический к.п.д. позволяют найти

подведённую теплоту: $\eta_T = \frac{l_{ц}}{q_1}$; $q_1 = \frac{l_{ц}}{\eta_T} = \frac{376 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}}{0,63} = 597 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;

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

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

Проведен полный расчёт цикла Дизеля.

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 $T_1 = 323 \text{ } ^\circ\text{К}$. Степень сжатия $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = 16$, степень предварительного расширения $\psi = \frac{v_3}{v_2} = 1,6$ и степень повышения давления:

$$\chi = \frac{P_3}{P_2} = 2,0.$$

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

Решение:

Цикл Тринклера имеет следующий вид:

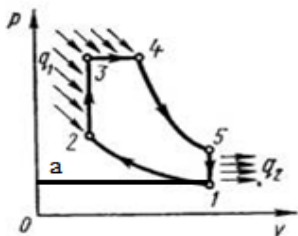


Диаграмма цикла Тринклера

a-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 – горючая 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 к.п.д. цикла определяется по формуле:

$$\eta_{\tau} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}} \cdot \frac{\chi \cdot \psi^{\gamma} - 1}{[(\chi-1) + \chi \cdot \gamma \cdot (\psi-1)]}$$

Здесь $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$ – степень сжатия, $\psi = \frac{v_4}{v_2}$ – степень предварительного расширения газа в результате изобарного подвода тепла,

$\chi = \frac{P_3}{P_2}$ – степень повышения давления.

а) Рассчитать значения термического к.п.д. цикла бескомпрессорного дизеля (цикл Тринклера):

$$\eta_{\tau} = 1 - \frac{1}{16^{(1,4-1)}} \cdot \frac{2 \cdot 1,6^{1,4} - 1}{[(2-1) + 2 \cdot 1,4 \cdot (1,6-1)]} ; \quad \eta_{\tau} = 1 - \frac{1}{3,03} \cdot \frac{2,86}{[2,68]} ;$$

$$\eta_{\tau} = 1 - 0,35 = 0,65.$$

б) Удельный объём в начальном состоянии:

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

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

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

Температура в конце процесса сжатия:

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

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

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

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

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

Из уравнения изохорного процесса для участка диаграммы 2-3:

$$\frac{P_3}{P_2} = \frac{T_3}{T_2}; \quad \text{Отсюда } T_3 = T_2 \cdot \frac{P_3}{P_2} = 980 \text{ } ^\circ\text{К} \cdot 2 = 1960 \text{ } ^\circ\text{К}.$$

В т.4 заканчивается процесс подвода тепла.

Температура в т.4 определяется из уравнения для изобарного процесса: $T_4 = T_3 \cdot \left(\frac{v_4}{v_3}\right) = 1960 \text{ } ^\circ\text{К} \cdot 1,6 = 3140 \text{ } ^\circ\text{К}.$

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

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

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

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

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

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

Работа адиабатного сжатия:

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

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

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

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

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

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

При адиабатном расширении удельная работа:

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

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

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

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

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

в) Полезная работа за цикл и термический к.п.д. позволяют найти

подведённую теплоту: $\eta_T = \frac{l_{ц}}{q_1}$; $q_1 = \frac{l_{ц}}{\eta_T} = \frac{385 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}}{0,65} = 590 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;

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

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

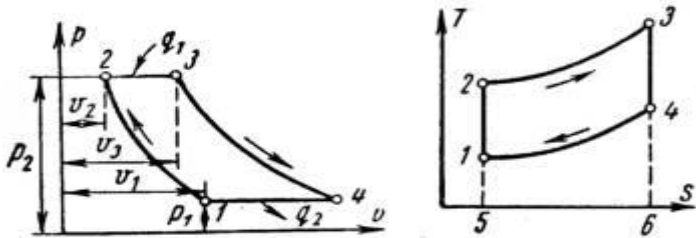
Проведен полный расчёт цикла Тринклера.

Задача 13. Начальные параметры воздуха, поступающего в компрессор газотурбинной установки (ГТУ) $P_1 = 10^5 \text{ Па}$, $t_1^0 = 20^\circ\text{C}$. Степень повышения давления в компрессоре ГТУ $\chi = 6$. Температура газа перед соплами турбины $t_3^0 = 700^\circ\text{C}$. Компрессор засасывает $M = 2 \cdot 10^5 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$ воздуха. Определить параметры всех точек цикла, термический к.п.д., идеальную мощность компрессора, турбины и всей ГТУ. Рабочим телом ГТУ считать идеальный воздух.

Решение:

Цикл ГТУ в $P-v$ 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).

Характеристиками цикла являются: степень повышения давления $\chi = \frac{P_2}{P_1}$; степень изобарного расширения $\psi = \frac{V_3}{V_2}$.

Удельная работа турбины: $l_T^* = i_3 - i_4$.

Удельная работа компрессора: $l_K^* = i_2 - i_1$.

Удельная полезная работа ГТУ равна разности работ турбины и компрессора: $l_{ГТУ}^* = l_T^* - l_K^*$

Теоретическая мощность газовой турбины, компрессора и установки (ГТУ): $N_T = l_T^* \cdot M = (i_3 - i_4) \cdot M$. M -расход газа ($\frac{кг}{ч}$) или ($\frac{кг}{с}$). $N_K = l_K^* \cdot M = (i_2 - i_1) \cdot M$; $N_{ГТУ} = l_{ГТУ}^* \cdot M = [(i_3 - i_4) - (i_2 - i_1)] \cdot M$.

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 объема, 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 объема $l_K^* = 1,4 \cdot l_K$. $l_T^* = 1,4 \cdot l_T$.

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 объем: $i = u + P \cdot v$. 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:

$$P \cdot v = R_{\mu} \cdot T; \quad R_{\mu} = \frac{R}{\mu};$$

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

$$\text{Термический к.п.д. цикла ГТУ: } \eta_{\text{ГТУ}} = 1 - \frac{1}{\chi^{(\gamma-1)/\gamma}}; \quad \gamma = 1,4$$

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

Техническая работа по сжатию воздуха в компрессоре:
 $l_k^* = i_2 - i_1; \quad i_1 = u_1 + P_1 \cdot v_1.$

$i_1 = u_1 + R_{\mu} \cdot T_1 = c_p \cdot T_1. \quad c_p = c_v + R_{\mu} = \frac{7}{2} \cdot \frac{R}{\mu}$ для идеальных двухатомных газов, к которым относится воздух.

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

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:

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

$$T_2 = 293 \text{ }^{\circ}\text{К} \cdot \left(\frac{1}{6}\right)^{-0,286} = 489 \text{ }^{\circ}\text{К}; \quad T_3 = (700 + 273) \text{ }^{\circ}\text{К} = 973 \text{ }^{\circ}\text{К}.$$

Нахождение T_4 можно упростить:

$$T_4 \cdot P_4^{(1-\gamma)/\gamma} = T_3 \cdot P_3^{(1-\gamma)/\gamma} \quad \text{Для изобарных процессов } P_2 = P_3, \text{ а } P_4 = P_1.$$

$$\text{Преобразование уравнения Пуассона даёт: } T_4 = \frac{T_1 \cdot T_3}{T_2};$$

$$T_4 = \frac{293 \cdot 973}{489} \text{ }^{\circ}\text{К} = 583 \text{ }^{\circ}\text{К}.$$

Удельная техническая работа по сжатию воздуха в компрессоре:

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

Удельная техническая работа по расширению газов в турбине:

$$l_T^* = c_p \cdot (T_3 - T_4) = 1,003 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot (973 - 583) \text{ } ^\circ\text{K} = 391 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Удельная техническая работа установки:

$$l_{\text{ГТУ}}^* = l_T^* - l_k^* = 391 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} - 196 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 195 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

в) Теоретическая мощность компрессора:

$$N_k^0 = l_k^* \cdot M = 195 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot \frac{2 \text{ кг}}{3600 \text{ с}} \cdot 10^5 = 10830 \text{ кВт} = 10,8 \text{ МВт}.$$

г) Теоретическая мощность турбины:

$$N_T^0 = l_T^* \cdot M = 391 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot \frac{2 \text{ кг}}{3600 \text{ с}} \cdot 10^5 = 21700 \text{ кВт} = 21,7 \text{ МВт}.$$

д) Теоретическая мощность ГТУ:

$$N_{\text{ГТУ}}^0 = N_T^0 - N_k^0 = 21700 \text{ кВт} - 10800 \text{ кВт} = 10900 \text{ кВт} = 10,9 \text{ МВт}.$$

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 $q_2 = (i_4 - i_1)$:

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

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

$q_1 - q_2 = l_{\text{ГТУ}}^* = 194 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$. Данные совпадают в пределах погрешности расчётов.

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

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 16 см, ход поршня 20 см, частота вращения коленчатого вала равна 1400 об/мин. С помощью эксперимента получена индикаторная диаграмма полезной площадью $2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, длиной 15 см при масштабе давлений $y = 0,7 \cdot 10^8 \frac{\text{Па}}{\text{м}}$.

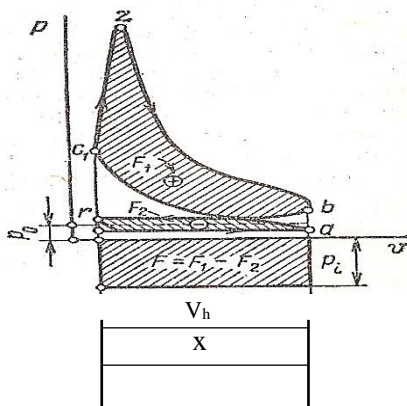
Решение:

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:

$$N_i = \frac{2}{k} \cdot L_i \cdot \omega \cdot z = \frac{2}{k} \cdot P_i \cdot V_h \cdot \omega \cdot z.$$

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 $P_i = \frac{N_i}{V_h}$. Из рисунка следует, что среднее индикаторное давление:



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

Рабочий объём цилиндра:

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

Индикаторная мощность:

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

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

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

Задача № 15. Определить удельный эффективный расход топлива шести цилиндрического 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 $\omega = 40 \frac{1}{\text{с}}$ и расход топлива $B = 4,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{с}}$.

Решение:

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

$N_e = \frac{2}{k} \cdot L_e \cdot \omega \cdot z = \frac{2}{k} \cdot P_e \cdot V_h \cdot \omega \cdot z$. 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 . Рабочий объём цилиндра равен:

$$V_h = V_a - V_c = (8,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 - 7,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3) = 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot (84 - 7,2);$$

$$V_h = 76,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

$$\text{Эффективная мощность: } N_e = \frac{2}{k} \cdot P_e \cdot V_h \cdot \omega \cdot z.$$

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

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

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

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

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

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

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

Решение:

Для нахождения удельного эффективного расхода топлива $b_e = \frac{B}{N_e}$, необходимо определить среднюю эффективную мощность $N_e = \frac{2}{\kappa} \cdot P_e \cdot V_h \cdot \omega \cdot z$. 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 к.п.д. и среднему индикаторному давлению:

$$P_e = P_i \cdot \eta_m = 7,6 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0,82 = 6,23 \cdot 10^5 \text{ Па}. \quad \text{Рабочий объём}$$

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

$$\text{Число оборотов } \omega = 380 \frac{1}{2\pi(\text{с})} = 60,5 \left(\frac{1}{\text{с}}\right)$$

Средняя эффективная мощность:

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

Удельный эффективный расход топлива:

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

Литровая мощность двигателя:

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

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

Задача № 17. Определить диаметр цилиндра и ход поршня четырёхцилиндрового четырёхтактного дизельного двигателя, если эффективная мощность $N_e = 80 \text{ кВт}$, среднее эффек-

тивное давление $P_e = 6 \cdot 10^5 \text{ Па}$, частота вращения коленчатого вала $\omega = 1800 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$, а средняя скорость поршня $C_m = 9,6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Решение:

Диаметр цилиндра и ход поршня позволяют определить рабочий объём цилиндра: $V_h = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot h$. 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: $N_e = \frac{2}{\kappa} \cdot P_e \cdot V_h \cdot \omega \cdot z$. 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 $\tau = \frac{1}{\omega \left(\frac{1}{\text{с}}\right)}$. По определению средней скорости:

$$C_m = \frac{2 \cdot h}{\tau} = 2 \cdot h \cdot \omega \left(\frac{1}{\text{с}}\right). \text{ Отсюда } h = \frac{C_m}{2 \cdot \omega \left(\frac{1}{\text{с}}\right)};$$

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

$$\text{Рабочий объём цилиндра: } V_h = \frac{N_e \cdot \kappa}{2 \cdot P_e \cdot \omega \cdot z};$$

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

$$\text{Диаметр цилиндра: } D^2 = \frac{4 \cdot V_h}{\pi \cdot h} = \frac{4 \cdot 0,0011 \text{ м}^3}{3,14 \cdot 0,16 \text{ м}} = 8,76 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

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

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

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

Решение:

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

щностей: $N_m = N_i - N_e$. Отношение эффективной мощности к индикаторной определяет механический к.п.д.: $\eta_m = \frac{N_e}{N_i}$.

Индикаторная мощность: $N_i = \frac{2}{\kappa} \cdot P_i \cdot V_h \cdot \omega \cdot z$;

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

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

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

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

Ответ: $N_m = 22 \text{ кВт.}$

Задача 19. Определить среднюю скорость поршня и степень сжатия четырёхцилиндрового четырёхтактного двигателя с искровым зажиганием, если эффективная мощность $N_e = 51,5 \text{ кВт}$, среднее эффективное давление $P_e = 6,45 \cdot 10^5 \text{ Па}$, ход поршня $h = 0,092 \text{ м}$, частота вращения коленчатого вала $\omega = 50 \text{ об/с}$ 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:

$$C_m = \frac{2 \cdot h}{\tau} = 2 \cdot h \cdot \omega \left(\frac{1}{\text{с}} \right).$$

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

Степень сжатия есть отношение объёма цилиндра к объёму камеры сгорания: $\varepsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_h + V_c}{V_c} = \frac{V_h}{V_c} + 1$. Рабочий объём цилиндра находится из формулы для эффективной мощности:

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

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

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

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

дизельного двигателя $\eta_{i2} = 0,45$. Низшая рабочая теплота сгорания бензина $Q_{H1}^p = 44 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$, а дизельного топлива $Q_{H2}^p = 43 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$.

Решение:

Индикаторный к.п.д бензинового двигателя: $\eta_{i1} = \frac{N_i}{B_1 \cdot Q_{H1}^p}$.

$$\text{Отсюда : } B_1 = \frac{N_i}{Q_{H1}^p \cdot \eta_{i1}} = \frac{148 \cdot 10^3 \text{ Вт}}{44 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 0,39} = 8,62 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

$$B_2 = \frac{N_i}{Q_{H2}^p \cdot \eta_{i2}} = \frac{148 \cdot 10^3 \text{ Вт}}{43 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 0,45} = 7,65 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

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

$$\frac{B_1 - B_2}{B_1} \cdot 100\% = 0,113 \cdot 100\% = 11,3\%.$$

Ответ: экономия топлива составит 11,3%.

Задания для самостоятельной работы и контрольные задания

Задача 1. Найти удельный объём воздуха ν ($\nu = \frac{V}{m}$) при давлении

P и температуре $t^\circ\text{C}$. Молярная масса газа $\mu = 29 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$.

Воздух считать идеальным газом.

Вариант	P	$t^\circ\text{C}$
1	150 кПа	24
2	0,4 МПа	40
3	0,3 МПа	62
4	0,2 МПа	30
5	180 кПа	70
6	250 кПа	48
7	0,7 МПа	54
8	0,12 МПа	68
9	130 кПа	26
0	245 кПа	36

Задача №2. В сосуде ёмкостью V содержится азот под давлением P_1 и при температуре t_1° . Молярная масса азота $\mu = 28 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$. 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.

Вариант	P_1	$t_1^{\circ}\text{C}$	P_2	V
1	150 кПа	24	100 кПа	10 л
2	0,4 МПа	40	0,1 кПа	0,02 м ³
3	0,3 МПа	62	200 кПа	43 л
4	0,2 МПа	30	0,12 МПа	0,03 м ³
5	180 кПа	70	110 кПа	17 л
6	250 кПа	48	0,14 МПа	26 л
7	0,7 МПа	54	0,3 МПа	0,05 м ³
8	0,42 МПа	68	220 кПа	34 л
9	130 кПа	26	100 кПа	0,015 м ³
0	245 кПа	36	160 кПа	18 л

Задача № 3. В результате *изотермического* процесса $m = 1\text{ кг}$ воздуха переводится из одного состояния с параметрами P_1, t_1^0 в другое с параметрами $P_2, t_2^0 = t_1^0$. Определить неизвестные значения термодинамических параметров, изменения внутренней энергии, энтропии, а также теплоту и работу процесса. Молярная масса газа $\mu = 29 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$.

Вариант	P_1	$t_1^{\circ}\text{C}$	P_2
1	1,50 МПа	20	1,0 МПа
2	400 кПа	40	100 кПа
3	0,3 МПа	12	0,8 МПа
4	0,2 МПа	30	1,2 МПа
5	180 кПа	60	110 кПа
6	250 кПа	42	0,14 МПа
7	0,7 МПа	54	0,3 МПа
8	0,42 МПа	63	220 кПа
9	130 кПа	26	500 кПа
0	245 кПа	38	110 кПа

Задача № 4. 1 кг воздуха с начальным давлением P_1 и начальной температурой t_1° сжимается *изобарно* до V_2 . Молярная

масса воздуха $\mu = 29 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$. Определить неизвестные параметры и функции состояния, а так же работу и теплоту процесса.

Вариант	P_1	t_1 °C	V_2
1	250 кПа	20	0,1 м ³
2	400 кПа	40	0,08 м ³
3	0,3 МПа	12	0,12 м ³
4	0,2 МПа	30	600 л
5	180 кПа	60	0,16 м ³
6	250 кПа	42	0,14 м ³
7	0,7 МПа	54	600 л
8	0,42 МПа	63	400 л
9	130 кПа	26	500 л
0	245 кПа	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.

Вариант	P_1	t_1 °C	P_2
1	1,3 МПа	20	0,2 МПа
2	600 кПа	40	100 кПа
3	0,1 МПа	80	0,8 МПа
4	0,2 МПа	30	1,2 МПа
5	680 кПа	60	1,1 МПа
6	250 кПа	68	0,14 МПа
7	0,7 МПа	54	0,22 МПа
8	0,42 МПа	63	120 кПа
9	130 кПа	26	500 кПа
0	620 кПа	38	110 кПа

Задача № 6. Найти количество тепла, проходящего за время $\tau = 600$ с через стенку, состоящую из 2-х слоёв, считая толщину слоёв равной d_1 и d_2 . Температура первого и последнего

слоёв соответственно равна t_1^0 и t_2^0 , а площадь стенки F . Коэффициент теплопроводности первой стенки ζ_1 , а второй ζ_2 .

№ вар.	τ , сек.	ζ_1	ζ_2	F , м ²	d_1 , м	d_2 , м	t_1 °C	t_2 °C
		$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$						
1	100	0,1	0,5	4	0,2	0,4	20	-10
2	600	0,2	0,65	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	0,20	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
0	900	0,2	0,9	12	0,46	0,60	27	6

Задача № 7. Найти конвективный тепловой поток Φ_k от цилиндрического нагревателя длиной x и диаметром D , если средняя температура его поверхности составляет $t_1^0 = t_{\text{ст}}^0$, температура среды $t_2^0 = t_{\text{ж}}^0$. Конвективный коэффициент теплоотдачи от нагревателя принять равным α_k .

№ вар.	α_k ,	D , м	x , м	$t_{\text{ст}}^0$, °C	$t_{\text{ж}}^0$, °C
	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$				
1	6,2	0,24	0,90	70	10
2	8,4	0,5	1,30	78	20

3	9,6	0,32	2,06	86	30
4	6,8	0,20	1,25	81	24
5	7,5	0,15	2,4	76	28
6	5,6	0,20	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
0	18	0,50	1,60	77	16

Задача № 8. Рассчитать лучистый тепловой поток от стальной окисленной трубы наружным диаметром D , длиной x . Температуру стенки трубы принять равной $t_{ст}^0$, среды $t_{ж}^0$, приведенная степень черноты поверхности трубы $\epsilon_{пр}$.

№ вар.	$\epsilon_{пр}$	$t_{ст}, ^\circ C$	$t_{ж}, ^\circ C$	$D, \text{ см}$	$x, \text{ м}$
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	10,0	0,72
8	0,92	160	24	3,2	2,4
9	0,66	170	36	2,5	3,6
0	0,76	130	18	1,6	0,5

Задача № 9. Рассчитать плотность теплового потока q от нагретой до температуры t_1^0 жидкости (горячий теплоноситель внутри трубы большого диаметра) через твёрдую стенку трубы толщиной d к холодному теплоносителю, температура которого равна t_2^0 . Конвективный коэффициент теплоотдачи на границе первый теплоноситель - твёрдая стенка принять равным $\alpha_{к1} = 6600 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$, а на границе твёрдая стенка-второй теплоноситель $\alpha_{к2} = 8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$. 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: $q = (t_1^0 - t_2^0) \cdot \theta$;

№ вар.	$\alpha_{к1}$	$\alpha_{к2}$	d, мм	$\zeta,$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$
	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$			$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$		
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
0	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 рабо-

чего тела P_1, t_1^0 . 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 к.п.д. двигателя и отведённую энергию (q_2). Изобразить цикл в P-V диаграмме и назвать процессы, из которых он состоит.

Вариант	$P_1, 10^5 \text{Па}$	$t_1^\circ\text{C}$	$q_1, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	ε
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
0	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 к.п.д., если начальное давление рабочего тела P_1 , начальная температура t_1^0 , степень сжатия ε , а степень предварительного расширения ψ . Изобразить цикл в P-V диаграмме и назвать процессы, из которых он состоит.

Вариант	$P_1, 10^5 \text{Па}$	$t_1^\circ\text{C}$	ψ	ε
1	0,80	20	1,5	9
2	0,92	30	1,6	10
3	0,94	18	1,7	11
4	0,96	16	1,8	13
5	0,98	10	1,9	15
6	0,88	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
0	0,96	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_1^0 . 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 к.п.д. цикла. Изобразить цикл в P-V диаграмме и назвать процессы, из которых он состоит.

Вар.	P_1 , МПа	$t_1^{\circ}\text{C}$	ψ	ε	χ
1	0,080	30	1,5	12	1,70
2	0,092	40	1,6	10	1,76
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	2,1
0	0,090	44	1,3	16	2,0

Задача 13. Начальные параметры воздуха, поступающего в компрессор газотурбинной установки (ГТУ) P_1 , t_1^0 . Степень повышения давления в компрессоре ГТУ χ . Температура газа перед соплами турбины t_3^0 . Компрессор засасывает $M \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$ воздуха. Определить параметры всех точек цикла, термический к.п.д., 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.

Вар.	P_1 , МПа	$t_1^{\circ}\text{C}$	M , $10^5 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$	$t_3^{\circ}\text{C}$	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
0	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 .

Вар.	D , см	h , см	ω , $\frac{\text{об}}{\text{мин}}$	y , $10^8 \frac{\text{Па}}{\text{м}}$	F , 10^{-3} м^2	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
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
0	15	20	1420	0,6	2,2	11

Задача № 15. Определить удельный эффективный расход топлива шести цилиндрового 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 .

Вар.	P_e , 10^5 Па	V_a , 10^{-4} м^3	ω , $\frac{\text{об}}{\text{с}}$	B , $10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	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
0	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 к.п.д. и расход топлива B .

Вар.	P_i , 10^5 Па	D , м	ω , $\frac{\text{об}}{\text{с}}$	B , $10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	h , м	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
0	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 .

Вар.	P_e , 10^5 Па	ω , $\frac{\text{об}}{\text{мин}}$	C_m , $\frac{\text{м}}{\text{с}}$	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
0	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 к.п.д. η_m .

Вар.	P_i , 10^5 Па	D , м	ω , $\frac{\text{об}}{\text{с}}$	B , $10^{-3} \frac{\text{кГ}}{\text{с}}$	h , м	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
0	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 .

Вар.	P_e , 10^5 Па	ω , $\frac{\text{об}}{\text{с}}$	N_e , кВт	h , м	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
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
0	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 к.п.д. инжекторного двигателя η_{i1} , к.п.д. дизельного двигателя η_{i2} . Низшая рабочая теплота сгорания бензина Q_{H1}^P , а дизельного топлива Q_{H2}^P .

Вар.	N_i , кВт	η_{i1}	η_{i2}	$\frac{Q_{H1}^P}{\text{МДж}} \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$	$\frac{Q_{H2}^P}{\text{МДж}} \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$
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
0	142	0,38	0,46	43,7	42,7

Варианты контрольного задания

Примечание: в графе «№ зач.кн.» указаны две последние цифры номера зачётной книжки студента.

№ 3. кн	Номера задач и вариантов (1.1 – задача 1, вариант 1 и т.д)					№ 3. кн	Номера задач и вариантов (1.1 – задача 1, вариант 1 и т.д)				
	1.1	2.1	6.1	10.1	14.1		1.1	3.1	7.1	11.1	15.1
01	1.1	2.1	6.1	10.1	14.1	11	1.1	3.1	7.1	11.1	15.1
02	1.2	2.2	6.2	10.2	14.2	12	1.2	3.2	7.2	11.2	15.2
03	1.3	2.3	6.3	10.3	14.3	13	1.3	3.3	7.3	11.3	15.3
04	1.4	2.4	6.4	10.4	14.4	14	1.4	3.4	7.4	11.4	15.4
05	1.5	2.5	6.5	10.5	14.5	15	1.5	3.5	7.5	11.5	15.5
06	1.6	2.6	6.6	10.6	14.6	16	1.6	3.6	7.6	11.6	15.6
07	1.7	2.7	6.7	10.7	14.7	17	1.7	3.7	7.7	11.7	15.7
08	1.8	2.8	6.8	10.8	14.8	18	1.8	3.8	7.8	11.8	15.8

09	1.9	2.9	6.9	10.9	14.9	19	1.9	3.9	7.9	11.9	15.9
10	1.0	2.0	6.0	10.0	14.0	20	1.0	3.0	7.0	11.0	15.0
21	1.1	4.1	8.1	12.1	16.1	31	1.1	5.1	9.1	13.1	17.1
22	1.2	4.2	8.2	12.2	16.2	32	1.2	5.2	9.2	13.2	17.2
23	1.3	4.3	8.3	12.3	16.3	33	1.3	5.3	9.3	13.3	17.3
24	1.4	4.4	8.4	12.4	16.4	34	1.4	5.4	9.4	13.4	17.4
25	1.5	4.5	8.5	12.5	16.5	35	1.5	5.5	9.5	13.5	17.5
26	1.6	4.6	8.6	12.6	16.6	36	1.6	5.6	9.6	13.6	17.6
27	1.7	4.7	8.7	12.7	16.7	37	1.7	5.7	9.7	13.7	17.7
28	1.8	4.8	8.8	12.8	16.8	38	1.8	5.8	9.8	13.8	17.8
29	1.9	4.9	8.9	12.9	16.9	39	1.9	5.9	9.9	13.9	17.9
30	1.0	4.0	8.0	12.0	16.0	40	1.0	5.0	9.0	13.0	17.0
41	1.1	2.1	6.1	10.1	18.1	46	1.6	2.6	6.6	10.6	18.6
42	1.2	2.2	6.2	10.2	18.2	47	1.7	2.7	6.7	10.7	18.7
43	1.3	2.3	6.3	10.3	18.3	48	1.8	2.8	6.8	10.8	18.8
44	1.4	2.4	6.4	10.4	18.4	49	1.9	2.9	6.9	10.9	18.9
45	1.5	2.5	6.5	10.5	18.5	50	1.0	2.0	6.0	10.0	18.0
51	1.1	3.1	7.1	11.1	19.1	61	1.1	4.1	8.1	12.1	20.1
52	1.2	3.2	7.2	11.2	19.2	62	1.2	4.2	8.2	12.2	20.2
53	1.3	3.3	7.3	11.3	19.3	63	1.3	4.3	8.3	12.3	20.3
54	1.4	3.4	7.4	11.4	19.4	64	1.4	4.4	8.4	12.4	20.4
55	1.5	3.5	7.5	11.5	19.5	65	1.5	4.5	8.5	12.5	20.5
56	1.6	3.6	7.6	11.6	19.6	66	1.6	4.6	8.6	12.6	20.6
57	1.7	3.7	7.7	11.7	19.7	67	1.7	4.7	8.7	12.7	20.7

58	1.8	3.8	7.8	11.8	19.8	68	1.8	4.8	8.8	12.8	20.8
59	1.9	3.9	7.9	11.9	19.9	69	1.9	4.9	8.9	12.9	20.9
60	1.0	3.0	7.0	11.0	19.0	70	1.0	4.0	8.0	12.0	20.0
71	1.1	2.1	6.1	10.1	18.1	81	1.1	3.1	7.1	11.1	19.1
72	1.2	2.2	6.2	10.2	18.2	82	1.2	3.2	7.2	11.2	19.2
73	1.3	2.3	6.3	10.3	18.3	83	1.3	3.3	7.3	11.3	19.3
74	1.4	2.4	6.4	10.4	18.4	84	1.4	3.4	7.4	11.4	19.4
75	1.5	2.5	6.5	10.5	18.5	85	1.5	3.5	7.5	11.5	19.5
76	1.6	2.6	6.6	10.6	18.6	86	1.6	3.6	7.6	11.6	19.6
77	1.7	2.7	6.7	10.7	18.7	87	1.7	3.7	7.7	11.7	19.7
78	1.8	2.8	6.8	10.8	18.8	88	1.8	3.8	7.8	11.8	19.8
79	1.9	2.9	6.9	10.9	18.9	89	1.9	3.9	7.9	11.9	19.9
80	1.0	2.0	6.0	10.0	18.0	90	1.0	3.0	7.0	11.0	19.0
91	1.1	4.1	8.1	12.1	20.1	96	1.6	4.6	8.6	12.6	20.6
92	1.2	4.2	8.2	12.2	20.2	97	1.7	4.7	8.7	12.7	20.7
93	1.3	4.3	8.3	12.3	20.3	98	1.8	4.8	8.8	12.8	20.8
94	1.4	4.4	8.4	12.4	20.4	99	1.9	4.9	8.9	12.9	20.9
95	1.5	4.5	8.5	12.5	20.5	100	1.0	4.0	8.0	12.0	20.0

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	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$
Толщина стенки, d	м	см = 10^{-2} м
Диаметр цилиндра, D	м	см = 10^{-2} м
Термическое сопротивление стенки, R_t	$\frac{\text{град}}{\text{Вт}} \cdot \text{м}^2$	$\frac{\text{град}}{\text{Вт}} \cdot \text{м}^2$
Конвективный коэффициент теплоотдачи, α_k	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$
Коэффициент теплопередачи, θ	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$
Давление, P	Паскаль (Па)	кПа = 10^3 Па
Давление атмосферное, $P_{\text{атм}}$	Па	100 кПа
Работа, L	Джоуль (Дж)	кДж = 10^3 Дж
Работа удельная, l	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Изменение внутренней энергии, ΔU	Дж	кДж = 10^3 Дж
Изменение удельной внутренней энергии, Δu	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Изменение энтропии, ΔS	$\frac{\text{Дж}}{\text{град}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{град}} = 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{град}}$
Изменение удельной энтропии, Δs	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} = 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$
Молярная изохорная теплоёмкость, C_v^μ	$\frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}}$

Удельная изохорная теплоёмкость, c_v	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$
Показатель адиабаты, γ		
Показатель политропы, n		
Абсолютная температура, T	$^{\circ}\text{К}$	$^{\circ}\text{К}$
Температура Цельсия, t°	$^{\circ}\text{С}$	$^{\circ}\text{С}$
Полный объём, V	м^3	$\text{м}^3 = 10^3 \text{л} = 10^6 \text{см}^3$
Удельный объём, v	$\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	$\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$
Плотность, ρ	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
Универсальная газовая постоянная, R	8314 $\frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град.}}$	8314 $\frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град.}}$
Приведенная газовая постоянная, $R_{\mu} = \frac{R}{\mu}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град.}}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град.}}$
Молярная масса, μ	$\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$	$\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$
Теплота, Q	Дж	Дж
Удельная теплота, q	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Площадь, F	м^2	м^2
Усилие (сила), G	н	н
Число оборотов коленвала, ω	$\frac{1}{\text{с}}$	$\frac{1}{\text{мин}} = \frac{1}{60 \text{ с}}$
Мощность, N	Вт	кВт = 10^3Вт
Показатель политропы, n		
Число цилиндров, z		
Число тактов, k		
Степень повышения давления, χ		
Степень сжатия, ε		

Степень предварительного расширения, ψ		
Угол поворота коленвала, α		
Время, τ	с	
Кинематическая функция, σ		
Отношение радиуса кривошипа к длине шатуна, λ		
Показатель адиабаты, γ		
Коэффициент производительности, ϕ		
Производительность, J	$\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$	$\frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 6 \cdot 10^4 \frac{\text{л}}{\text{мин}}$
КПД, η		
Абс. погрешность, δ		
Относ. погрешность, β		

Приложение 2. Приближённые вычисления и округления результатов расчётов

Использование калькулятора в различных арифметических вычислениях позволяет получать числа с большим количеством десятичных знаков, что создаёт иллюзию высокой точности расчётов. Но это не так. Полученные значения физических величин, например в эксперименте, связаны с точностью используемых при измерениях приборов. Поэтому, по правилам приближённых вычислений, полученные значения необходимо округлять. При произвольных расчётах (Часть 1) необходимо пользоваться следующими правилами округления.

1. При сложении и вычитании приближенных чисел в результате следует сохранять *столько десятичных знаков*, сколько их в

приближенном данном с *наименьшим числом десятичных знаков*.

Пример 1. Найти сумму приближенных чисел 127,42; 67, 3; 0,12 и 3,03.

Решение: $127,42 + 67,3 + 0,12 + 3,03 = 197,87 = 197,9$.

В этом примере в данных число с наименьшим количеством десятичных знаков 67,3 — одна десятичная цифра 3. Следовательно, в ответе также должна остаться одна десятичная цифра. Так как вторая значащая цифра 7 больше 5, округляем ответ с избытком, до 9.

II. При умножении и делении приближенных чисел в произведении надо сохранить *столько значащих цифр*, сколько их есть в данном числе с *наименьшим количеством значащих цифр*.

Пример 2. Умножить приближенные числа 3,4 и 12,32.

Решение: $12,32 \cdot 3,4 = 41,888 = 42$.

Здесь в данных число 3,4 имеет наименьшее количество значащих цифр — 2. И в ответе должно быть две значащих цифры. 1,888 округляем с избытком до 2.

Примечание: если данные числа меньше 1, например 0,025, то число значащих цифр считается от последнего 0, т.е две значащие цифры. Если данные имеют большое число нулей, например $16 \cdot 10^5$, то из значащих цифр берут 2 (число 16).

Пример 3: Площадь прямоугольной грядки приближенно равна 7,6 кв. м, ширина — 2,38 м. Чему равна ее длина?

Решение: длина грядки равна частному от деления 7,6 на 2,38.

Действие деления выполняют так: $\frac{7,6}{2,38} = 3,19 = 3,2$.

Частное от деления округляется с избытком.

III. При возведении приближенных чисел в степень (квадрат, куб и др.) в результате сохраняется столько значащих цифр, сколько их в основании.

Пример 4. $(2,32)^2 = 5,38 \approx 5,4$;

Пример 5. $(0,83)^3 = 0,57178 \approx 0,57$.

IV. В промежуточных результатах следует брать одной цифрой больше, чем рекомендуют предыдущие правила.

V. Если некоторые данные имеют больше десятичных знаков (при действиях первой ступени) или больше значащих цифр (при

действиях II и III ступеней), чем другие, то их предварительно следует округлить, сохраняя лишь одну запасную цифру.

VI. Если данные можно брать с произвольной точностью, то для получения результата с k цифрами данные следует брать с таким числом цифр, которое дает согласно правилам (I – IV) $k + 1$ цифру в результате.

Применение вычислений способом подсчета цифр рассмотрим на обобщённом примере.

Пример 6. Найти значение $x = \frac{(a-b) \cdot c}{a+b}$, если $a \approx 9,31$, $b \approx 3,1$, $c \approx 2,33$. Знак \approx в дальнейшем использовать не будем.

Решение:

$$a - b = 9,31 - 3,1 = 6,21; \quad (a - b) \cdot c = 6,21 \cdot 2,33 \approx 14,5;$$

$$a + b = 9,31 + 3,1 = 12,4; \quad x = 14,5 : 12,4 \approx 1,1694 \approx 1,2.$$

Здесь $k = 2$, $k+1 = 3$.

Ответ. $x \approx 1,2$.

Примечание: при использовании калькулятора можно не обращать внимание на число знаков в промежуточных вычислениях, а округлять только конечный результат, учитывая приведенные выше правила.

Сформулированные выше правила подсчета цифр имеют вероятностный смысл: они наиболее вероятны, хотя существуют примеры, не удовлетворяющие этим правилам. Поэтому вычисления способом подсчета цифр - самый грубый способ оценки погрешности результатов действий. Однако он очень прост и удобен, а точность таких вычислений вполне достаточна для большинства технических расчетов. Поэтому этот способ широко распространен в вычислительной практике.

Содержание

Стр.

Часть I. Методические указания по решению типовых задач.	
Тема 2. Уравнение состояния идеального газа..	3
Тема 2. Нахождение основных параметров и функций состояния, теплоты и работы в термодинамических процессах..	3
Тема 2. Основы теории теплообмена..	10

Тема3. Идеальные циклы тепловых машин.	12
Тема 3. Индикаторные диаграммы. Расчёт параметров, характеризующие работу тепловых машин.. . . .	25
Задания для самостоятельной работы и контрольные задания.. . . .	31
Варианты контрольного задания.	42
Список использованных источников.	45
Приложение 1. Обозначения физических величин и их единицы измерения.	46
Приложение 2. Приближённые вычисления и округления результатов расчётов.	48