Федеральное агентство связи

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (СибГУТИ)

**А.Г. Черевко**

**Контрольная работа по курсу «Теплофизика»**

**для бакалавров. Заочная форма обучения. Учебное пособие.**

**Новосибирск**

**2020**

# Оглавление

|  |  |
| --- | --- |
| ВВЕДЕНИЕ.  | 3 |
| Образец титульного листа. | 5 |
| 1. ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ | 6 |
| 2. ЗАДАЧИ | 6 |
| 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ К ВЫПОЛНЕНИЮ КР:КРАТКАЯ ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ИНФОРМАЦИЯ. ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ | 10 |
| 3.1. Газы, пары. Уравнение состояния (уравнение Менделеева –Клапейрона (УМК)), молекулярно- кинетическая теория, теплоемкость. Основные формулы и примеры решения задач | 10 |
| * 1. Физические основы термодинамики, циклы, энтропия.

Основные формулы и примеры решения задач | 17 |
| * 1. Теплопередача. Излучение, теплопроводность.

Основные формулы и примеры решения задач | 29 |
| ЛИТЕРАТУРА | 32 |

# ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебное пособие предназначено для помощи студентам заочной формы обучения при самостоятельной работе над теоретическим курсом и при решении контрольной работы. Объём и теоретический уровень изложения материала, включённого в пособие, определяется действующей рабочей программой, учитывает специфику СибГУТИ, а также результаты анализа наиболее типичных ошибок, допускаемых студентами заочного факультета при самостоятельном изучении курса теплофизики.

Краткий материал, представленный в пособии, ограничен разделами:

– газы, пары (уравнение состояния (уравнение Менделеева-Клапейрона (УМК)), молекулярно- кинетическая теория, теплоемкость),

– физические основы термодинамики, циклы, энтропия,

– теплопередача (излучение, теплопроводность)

По каждому разделу представлены основные соотношения и примеры решения задач.

**Правила оформления контрольной работы**

1. Номер варианта соответствует последней цифре пароля. Чтобы получить зачёт по контрольной работе, студент должен правильно решить все три задачи.

2. Все работы принимаются только в электронной форме в файлах с расширением doc, docx, rtf.

3. Работа должна начинаться с титульного листа с указанием Вашей фамилии, группы, варианта, номера студенческого билета, номера расчетно-графической работы. Образец титульного листа указан ниже.

4. Для каждой задачи должно быть приведено полное условие задачи, а также её краткое условие, с записью основных исходных данных; если данные даны в произвольной системе единиц, то необходимо их перевести в систему СИ.

5. Должно быть приведено полное решение задачи, с пояснениями хода решения (если приведены только формулы, без пояснений, то задача не считается решённой). Кроме решения задачи должен быть представлен ответ на вопрос, приведенный под номером задачи.

6. Произведён расчёт требуемых величин и записан ответ с учётом размерности.

7. Формулы должны быть набраны средствами встроенного редактора формул. Решение задач, вставленное целиком в виде рисунка, не принимается.

8. Пояснительные чертежи и схемы выполняются любым из трех способов: 1) непосредственно средствами текстового редактора; 2) используется любой графический редактор, и выполненный рисунок вставляется в документ контрольной работы; 3) чертеж выполняется вручную на бумаге, фотографируется (сканируется) и вставляется в виде рисунка в документ.

9. Если работа не зачтена и отправлена на доработку, то работу над ошибками необходимо сделать В ЭТОМ ЖЕ файле, не удаляя замечания, просто добавляя верное решение в конце каждой задачи.

10. Работы отправляются через личный кабинет студента. Если работа не зачтена, то после доработки работа предъявляется на повторную защиту (исходный вариант с замечаниями преподавателя и работа над ошибками).

***Образец титульного листа***

**Федеральное агентство связи**

**Сибирский Государственный Университет
Телекоммуникаций и Информатики**

**Кафедра физики**

**Контрольная работа по курсу «Теплофизика»**

**Вариант 6**

**Выполнил**: **Иванов И.И.**

**Группа**: **ИИ-61**

**Номер студенческого билета:**

**123456**

**Адрес электронной почты:**

**хххх@хххх.ru**

**Проверил: доцент А.Г. Черевко\_**

**Новосибирск, 2020 г**

1. **ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ**

**Номер варианта совпадает с последней цифрой пароля**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Вари-ант** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **0** |
| **№ За-****дач** | **1, 6,****11** | **2, 7,****12** | **3, 8,****13** | **4, 9, 14** | **5, 10,****15** | **1, 10,****12** | **2, 6,****13** | **3, 7,****14** | **4, 8,****15** | **5, 9,****11** |

**Необходимо расписать решение задач Вашего варианта, используя соответствующую теорию. Для проверки Вашего решения для каждой задачи указаны верные ответы.**

**2. ЗАДАЧИ**

**Газы, пары. Уравнение состояния (уравнение Менделеева-Клапейрона (УМК)), молекулярно- кинетическая теория, теплоемкость**

**Задача 1**

Колба вместимостью V=300 см2, закрытая пробкой с краном, содержит разреженный воздух. Для измерения давления в колбе горлышко колбы погрузили в воду на незначительную глубину и открыли кран, в результате чего в колбу вошла вода массой т=292 г. Определить первоначальное давление р в колбе, если атмосферное давление P0 = 100 кПа.

Из уравнения Менделеева-Клапейрона (УМК), применяемого в задаче, вывести уравнение состояния и УМК для молекулярного уровня и подробно объяснить его.

**Ответ: P=2,67 кПа**

**Задача 2**

Баллон вместимостью V =12 л содержит углекислый газ. Давление P газа равно 1 МПа, температура Т=300 К. Определить массу т газа в баллоне.

Из уравнения Менделеева-Клапейрона (УМК), применяемого в задаче, вывести уравнение состояния и УМК для молекулярного уровня и подробно объяснить его

**Ответ: m=0,212 кг**

**Задача 3**

В колбе вместимостью V= 240 см3 находится газ при температуре

Т=290 К и давлении P=50 кПа. Определить количество вещества газа и число N его молекул.

Вывести уравнение состояния и УМК для молекулярного уровня и подробно объяснить его

**Ответ:**

**Задача 4**

Определить удельную теплоемкость смеси газов, содержащей V1=5 л водорода и V2=3 л гелия. Газы находятся при одинаковых условиях.

Записать, объяснить и привести единицы измерения всех видов теплоемкости.

**Ответ:**

**Задача 5**

Найти показатель адиабаты γ для смеси газов, содержащей гелий массой и водород массой.

Указание, определите теплоемкость при постоянном объеме и постоянном давлении**,** а затем вычислите показатель адиабаты.

В координатах PV и ST изобразить совместно графики адиабаты и изотермы

**Ответ: γ = 1,51**

**Физические основы термодинамики, циклы, энтропия**

**Задача 6**

На нагревание кислорода массой т= 160 г на ΔТ=12 К было затрачено количество теплоты Q=l,76 кДж. Доказать, как протекал процесс: при постоянном объеме или постоянном давлении? Изобразить график процесса.

Назовите известные Вам изопроцессы и объясните их смысл и различия.

 **Ответ: При постоянном давлении**

**Задача 7**

Азот массой т=5 кг, нагретый на ΔТ=150 К, сохранил неизменный объем V. Найти: 1) количество теплоты Q, сообщенное газу; 2) изменение ΔU внутренней энергии; 3) совершенную газом работу А.

Назовите известные Вам изопроцессы и объясните их смысл и различия.

**Ответ: Q=556 кДж; ΔU=556 кДж; А=0**

**Задача 8**

Идеальный газ, совершающий цикл Карно, получив от нагревателя количество теплоты Q1=4,2 кДж, совершил работу А=590 Дж. Найти термический КПД, **η**, этого цикла. Во сколько раз температура Т1 нагревателя больше температуры Т2 охладителя?

Изобразить график цикла Карно в PV и ST координатах и объясните его.

**Ответ: η =14%; Т1/Т2 = 1,16 раза**

**Задача 9**

Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура охладителя **Т2=290К**. Во сколько раз увеличится КПД цикла, если температура нагревателя повысится от **Т11=400 К до Т12=600 К?**

Изобразить график цикла Карно в PV и ST координатах и объясните его.

**Ответ: КПД увеличится в 1,88 раза**

**Задача 10**

Кусок льда массой т=200 г, взятый при температуре t1= (–10 °С), был нагрет до температуры t2=0 °С и расплавлен, после чего образовавшаяся вода была нагрета до температуры t3=(+10°С). Определить изменение **Δ**S энтропии в ходе указанных процессов.

Дайте определение энтропии и объясните ее физический смысл.

**Ответ: Δ**S= **291 Дж/К**

**Теплопередача. Излучение, теплопроводность**

**Задача 11**

При нагревании абсолютно черного тела его температура изменилась от

Т1=1000 К до Т2 =2000 К. Во сколько раз изменилась при этом: 1) его энергетическая светимость RЭ; 2) максимальная излучательная способность rλm; 3) на сколько изменилась длина волны λm, на которую приходится максимум излучательной способности этого тела. (увеличится или уменьшится). Рисунком поясните график распределения энергии в спектре излучения абсолютно чёрного тела, на рисунке укажите λm и rλm.

**Ответ: RЭ2/ RЭ1 = 16; rλm2 /rλm1 = 32;**

**Задача 12**

Температура абсолютно черного тела увеличилась в 1,5 раза, в результате чего длина волны λm, на которую приходится максимум энергии излучения, изменилась на **Δλm**=800 нм. Определить начальную Т1 и конечную Т2 температуру тела. Во сколько раз в результате нагревания изменилась тепловая мощность, излучаемая телом? Рисунком поясните график распределения энергии в спектре излучения абсолютно чёрного тела, на рисунке укажите λm и rλm.

**Ответ: Т1 = 1208 К; Т2 = 1812 К; Р2/ Р1 = 5.**

**Задача 13**

Муфельная печь потребляет мощность Р=1 кВт. Температура Т ее внутренней поверхности при открытом отверстии площадью S=25 см2 равна 1,2 кК. Считая, что отверстие печи излучает как черное тело, определить, какая часть **w** мощности рассеивается стенками. Рисунком поясните график распределения энергии в спектре излучения абсолютно чёрного тела, на рисунке укажите длину волны λm, на которую приходится максимум энергии излучения и максимальную излучательную способность rλm.

**Ответ: w=0,71.**

**Задача 14**

Вода при температуре t1=0 °С покрыта слоем льда толщиной h=50 см. Температура t2 воздуха равна 30 °С. Определить количество теплоты Q, переданное водой за время τ=1 ч через поверхность льда площадью S = 1 м2. Теплопроводность λ льда равна 2,2 Вт/(м-К).

Запишите уравнение теплопроводности, объясните его смысл и смысл всех величин, входящих в это уравнение.

**Ответ: Q = 475,2 кДж**

**Задача 15**

Какая мощность P требуется для того, чтобы поддерживать температуру t1=100 °С в термостате, площадь S поверхности которого равна 1,5 м2, толщина h изолирующего слоя равна 2 см и внешняя температура t=20 °С? Теплопроводность изолирующего слоя λ=0,05 Вт/(м-К).

Запишите уравнение теплопроводности, объясните его смысл и смысл всех величин, входящих в это уравнение.

**Ответ: P = 300 Вт**

1. **МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ К ВЫПОЛНЕНИЮ КР:**

**КРАТКАЯ ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ИНФОРМАЦИЯ.**

**ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ**

* 1. **Газы, пары. Уравнение состояния (уравнение Менделеева –Клапейрона (УМК)), молекулярно- кинетическая теория, теплоемкость.**

**Основные формулы и примеры решения задач**

**Количество вещества,**

где N — число структурных элементов (молекул, атомов, ионов и т. п.), составляющих тело (систему); NA — постоянная Авогадро.

**Молярная масса вещества; чаще используется**

где m — масса однородного тела (системы); — количество вещества этого тела.

**Определение молярной массы вещества**

**,**

здесь, А – относительная атомная масса вещества, численно равная его атомной массе, для элемента таблицы Менделеева его атомная масса приведена в таблице Менделеева.

**Уравнение состояния идеальных газов (уравнение Менделеева – Клапейрона),**

здесь P – давление в газе [Па=Н/м2], V – объем газа [м3],

Т – температура газа [K], m – масса газа [кг],

μ – молярная масса газа [кг/моль];

**R – универсальная газовая постоянная** **[R=8,314, Дж/(моль∙К)]**

**Уравнение состояния идеальных газов (молекулярный уровень)**

здесь N – число частиц в объеме - постоянная Больцмана

**NА=6,02∙1023**, 1/моль – число Авогадро

Уравнением Менделеева – Клапейрона (УМК)

{\displaystyle p=nkT,}здесь — концентрация молекул [1/м3].

**Закон Дальтона**

**,**

где P – давление смеси газов; — парциальное давление i-го компонента смеси;

k — число компонентов смеси.

**Концентрация частиц (молекул, атомов и т. п.) однородной системы**

,

где N – число частиц в системе, V— объем системы.

**Молярный объем газа при нормальных условиях, Vm**

(Р=0,1013 МПа =1 атм= 760 мм рт. ст.; Т= 273,15 К (0 °С))

**Равнораспределение энергии по степеням свободы**

**Средняя кинетическая энергия: приходящаяся на одну степень свободы молекулы**

**,**

**Полная энергия молекулы**

 ***i – число степеней свободы,***

**для одноатомной молекулы, только поступательное движение *i=3*,**

***,***

**Основное уравнение кинетической теории газов**

где P — давление газа; — средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы.

**Закон Майера +теплоемкость**

Теплоёмкость — физическая величина, определяемая как отношение количества теплоты **{\displaystyle \delta Q}**поглощаемой/выделяемой [термодинамической системой](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0) при бесконечно малом изменении её [температуры](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0) **{\displaystyle T}dT**, к величине этого изменения {\displaystyle \mathrm {d} T}

Малое количество теплоты обозначается {\displaystyle \delta Q} (а не **{\displaystyle \mathrm {d} Q}dQ**), чтобы подчеркнуть, что это не  [дифференциал](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B8%D1%84%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%B0%D0%BB_%28%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0%29) [параметра состояния](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5_%D0%B2%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D1%87%D0%B8%D0%BD%D1%8B#%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%81%D0%B8%D1%84%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D1%85_%D0%B8_%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B) (в отличие, например, от **{\displaystyle \mathrm {d} T}dT**), а [функция процесса](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5_%D0%B2%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D1%87%D0%B8%D0%BD%D1%8B#%D0%A4%D1%83%D0%BD%D0%BA%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%8B_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%B0).

**Связь между молярной (Сm [Дж/(моль∙К)]) и удельной (с[Дж/(кг∙К)]) теплоемкостями**

**Сm=c∙μ,**

Здесь **μ** – молярная масса, кг/моль. **Прописной буквой обозначается молярная теплоемкость, строчной буквой – удельная теплоемкость**

**Молярные теплоемкости газа при постоянном объеме (изохорная), CV, и постоянном давлении (изобарная), CP**

***CV=******iR/2; CP= (i+2)R/2,***

Здесь, *i –* число степеней свободы молекулы газа

**Удельные теплоемкости газа при постоянном объеме, сv, и постоянном давлении сp**

**cv=** (**i/2)R/μ; cр= ((i+2)/2)R/μ,**

здесь R – универсальная газовая постоянная.

**Уравнение Майера – связь между молярными изобарной и изохорной теплоемкостями**

Теплоемкость смеси двух веществ с массами **m1 и m2** и теплоемкостями **сv1 и сv2**

**Показатель адиабаты, γ**

 **число степеней свободы молекулы газа:**

**одноатомная молекула i=3** поступательные степени свободы;

**двухатомная молекула i=5,** три поступательных и две вращательных степени свободы;

**двухатомная молекула i=6** три поступательных и три вращательных степени свободы

**Примечание: в литературе (и тестах) показатель адиабаты могут обозначать**

**ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ**

**ПРИМЕР 1**

В баллоне объемом V-10 л находится гелий под давлением Р1=1 МПа при температуре Т1=300 К. После того как из баллона был израсходован гелий массой m=10 г, температура в баллоне понизилась до Т2=290 К. Определить давление P2 гелия, оставшегося в баллоне.

|  |
| --- |
| Дано: V=10 л=1∙10–2, м3;Р1=1 Мпа;Т1=300 К;Т2=290 К;m=10 г=10–2 кг;He |
| **P2 гелия, оставшегося в баллоне?** |

Решение. Для решения задачи воспользуемся уравнением Клапейрона — Менделеева, применив его дважды к начальному и конечному состояниям газа. Для начального состояния уравнение имеет вид

**, (1)**

для конечного состояния уравнение имеет вид

 **, (2)**

здесь m1 и m2 – массы гелия в начальном и конечном состояниях.

По условию (m1 – m2) =m=10 г=10–2 кг.

Определим из (1) и (2) массы m1 и m2

 **(3)**

 **(4)**

Вычитая из (3) равенство (4), получим:

отсюда, искомое давление P2 гелия равно

 **(5)**

В этом уравнении неизвестна молярная масса гелия. Атомная масса гелия равна 4 аем (атомной единицы массы), следовательно, А=4 эта цифра стоит в клетке таблицы Менделеева, где записан гелий. Тогда молярная масса гелия равна**.**

Подставляя значения получаем:

**==363962 =**

**Примечание**:

Рассмотренный пример показывает, что необходимо очень ответственно относится к единицам измерения и контролировать их при вычислении. Поэтому в контрольных работах при вычислении следует проставлять единицы измерения, особенно, если формулы сложные.

|  |
| --- |
| **Ответ**  |

**ПРИМЕР 2**

В колбе вместимостью V=0,5 л находится кислород при нормальных условиях. Определить среднюю энергию (WП) поступательного движения всех молекул, содержащихся в колбе.

|  |
| --- |
| Дано: кислород, О2, двухатомная молекула;нормальные условия – Р=0,1013 Мпа=1,013∙105 Па; Т= 273,15 К; V=0,5 л=5∙10–4, м3; |
| **Найти энергию** (WП) **поступательного движения всех молекул, содержащихся в колбе** |

**Решение.** Средняя энергия (WП) поступательного движения всех, N, молекул может быть выражена соотношением

 **(1)**

здесь **–** средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы.

Согласно закону равнораспределения энергии по степеням свободы на одну степень свободы молекулы приходится средняя энергия**.** Число степеней свободы поступательного движения *i=3*. Тогда средняя кинетическая энергия поступательного движения 1-ой молекулы равна**,**

В результате,

**(2)**

где k – постоянная Больцмана; **Т, К**, — абсолютная температура.

Число молекул**, здесь** количество вещества кислорода число Авогадро.

Найдем количество вещества: известно, что при нормальных условиях молярный объем равен

Так как, по условию задачи, кислород в колбе находится при нормальных условиях (Р=0,1013 МПа; Т= 273,15 К), то количество вещества кислорода в колбе выражается соотношением

**, тогда**

Из (2) энергия поступательного движения молекул равна

|  |
| --- |
| **Ответ:**  |

ПРИМЕР 3

Вычислить удельные теплоемкости и смеси неона и водорода. Массовые доли газов соответственно равны

|  |
| --- |
| Дано: неон, Ne, одноатомная молекула;водород, H2 – двухатомная молекула;V=0,5 л=5∙10–4, м3;массовая доля неона;массовая доля водорода |
|  **и смеси неона и водорода?** |

Решение.

Определяем удельные теплоемкости неона и водорода.

**Удельные теплоемкости газа при постоянном объеме, сv, и постоянном давлении сp**

**cv=** (**i/2)R/μ; cр= ((i+2)/2)R/μ. (1)**

Неон – одноатомный газ, поэтому у него только 3 степени свободы. Т.е. i=3, с учетом таблицы Менделеева молярная масса неона равна подставив в (1) получаем

 **.**

Водород – двухатомный газ, у него пять степеней свободы – 3 поступательных и 2 вращательных, т.е. i=5; с учетом таблицы Менделеева молярная масса водорода равна подставив в (1) получаем:

 **.**

Определяем удельную теплоемкость смеси при постоянном объеме из соотношений:

|  |
| --- |
|  |

* 1. **Физические основы термодинамики, циклы, энтропия.**

**Основные формулы и примеры решения задач**

**Прописной буквой обозначается молярная теплоемкость, строчной буквой – удельная теплоемкость**

**Показатель адиабаты, γ**

 **число степеней свободы молекулы газа:**

**одноатомная молекула i=3** поступательные степени свободы;

**двухатомная молекула i=5,** три поступательных и две вращательных степени свободы;

**двухатомная молекула i=6** три поступательных и три вращательных степени свободы

**Внутренняя энергия идеального газа**

где — средняя кинетическая энергия молекулы; N — число молекул газа; — количество вещества.

**Работа, связанная с изменением объема газа, (общий случай)**

где V1— начальный объем газа; V2— его конечный объем.

**Работа газа при изобарном процессе (p=const)**

**A=p(V2-V1);**

**Работа газа при изотермическом процессе** (**p=const**)

**Работа газа при адиабатном процессе** (S**=const; Q=0**)

где T1— начальная температура газа; Т2— его конечная температура.

**Уравнение Пуассона (уравнение газового состояния при адиабатном процессе (S=const)**

**Связь между начальным и конечным значениями параметров состояний газа при адиабатном процессе:**

**Первый закон термодинамики**

**Общий случай**

где **Q** — количество теплоты, сообщенное газу — изменение его внутренней энергии; **А** — работа, совершаемая газом против внешних сил.

**Если малая величина работы (вариация работы),**

**то 1-ый закон термодинамики для бесконечно малых величин:**

**Первый закон термодинамики при изобарном процессе**

**1-ый закон термодинамики при изохорном процессе (А=0)**

**1-ый закон термодинамики при изотермическом процессе ()**

**1-ый закон термодинамики при адиабатном процессе (**S**=const; Q)**

**Второй закон термодинамики. Энтропия**

Если в замкнутой системе происходит процесс, то энтропия этой системы не убывает. В виде формулы второй закон термодинамики имеет вид:

где S – энтропия; L – путь по которому система переходит из одного состояния (1) в другое (2). Если процесс равновесный! то интегрирование проводится по любому пути. В равновесии энтропия максимальна.

Отсюда, **изменение энтропии в общем случае равно**

Объединенный 1-ый и 2-ой законы термодинамики для обратимых процессов и бесконечно малых величин

**СТАТИСТИЧЕСКОЕ ТОЛКОВАНИЕ ЭНТРОПИИ.**

**Формула Больцмана**

где S — энтропия системы; W — термодинамическая вероятность ее состояния; k — постоянная Больцмана.

**ЦИКЛЫ**

**Термодинами́ческие ци́клы** — круговые процессы в [термодинамике](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0), то есть такие процессы, в которых совпадают начальные и конечные параметры, определяющие состояние рабочего тела, т.е. давление, объем температура, энтропия. Термодинамические циклы являются моделями процессов, происходящих в реальных тепловых машинах для превращения тепла в [механическую работу](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%85%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D1%80%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B0).

Компонентами любой [тепловой машины](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%BC%D0%B0%D1%88%D0%B8%D0%BD%D0%B0) являются [рабочее тело](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%87%D0%B5%D0%B5_%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%BE), нагреватель и холодильник (с помощью которых меняется состояние рабочего тела).

 *Обратимым* называют цикл, который можно провести как в прямом, так и в обратном направлении в [замкнутой системе](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BC%D0%BA%D0%BD%D1%83%D1%82%D0%B0%D1%8F_%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0). Суммарная [энтропия](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D1%8D%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BF%D0%B8%D1%8F) системы при прохождении такого цикла не меняется. Единственным обратимым циклом для машины, в которой передача тепла осуществляется только между рабочим телом, нагревателем и холодильником, является [Цикл Карно](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D0%BA%D0%BB_%D0%9A%D0%B0%D1%80%D0%BD%D0%BE).

У цикла Карно наивысший КПД.

**Термический коэффициент полезного действия (КПД) цикла**

КПД любого цикла (общий случай)

**,**

где — количество теплоты, полученное рабочим телом (газом) от нагревателя; — количество теплоты, переданное рабочим телом охладителю.

**ЦИКЛ КАРНО**

**КПД цикла Карно (максимальный КПД среди циклов),**

**он максимален в том смысле, что никакая тепловая машина с теми же тем- пературами нагревателя и холодильника не может обладать бо́льшим КПД.**

где — температура нагревателя; — температура охладителя.

Цикл Карно состоит из 2-х (1 и 3) изотерм и 2-х адиабат (2 и 4). В координатах температура – энтропия **(TS)** и давление – объем **(PV)** он имеет вид

|  |  |
| --- | --- |
|   Цикл Карно в TS координатах1 и 3 – изотермы; 2 и 4 - адиабаты  |  Цикл Карно в PV координатах 1 и 3 – изотермы; 2 и 4 - адиабаты |

**ЦИКЛ ОТТО**

**Цикл Отто – основной цикл бензиновых двигателей внутреннего сгорания. Он является циклом с изохорным подводом теплоты.**

**КПД цикла Отто равен**

**,**

**здесь – степень сжатия**: отношение полного объема цилиндра (в начале процесса сжатия) к объему камеры сгорания в конце процесса сжатия,

**γ = CP/CV – показатель адиабаты** для рабочего газа γ=ср/cv~1,2 –1,4.

В реальных бензиновых двигателях, использующих цикл Отто, КПД - 20-25%.

Четырехтактный газовый ДВС создан в 1876 году Н.А. Отто (1832-1891 гг.) Цикл Отто совершается в четырехтактном тепловом двигателе внутреннего сгорания с внешним смесеобразованием (карбюраторный ДВС) и кривошипно-шатунным механизмом. При этом поршень совершает возвратно-поступательное движение в цилиндре.

Недостатком цикла Отто является невозможность применения высоких степеней сжатия. Обычно применяются степени сжатия в диапазоне = 3,5 — 9, что определяется температурой воспламенения топлива, которую не может превышать температура в конце процесса сжатия из-за опасности взрывного самовозгорания топлива. Чем выше октановое число бензина, тем до больших степеней сжатия можно сжать топливовоздушную смесь (без взрыва).

Цикл Отто — прямой газовый изохорный цикл неполного расширения представлен ниже в **ТS** и PV координатах. Он состоит из 2-х изохор и 2-х адиабат

|  |  |
| --- | --- |
|  Цикл Отто TS координатахА и С – адиабаты; B и D – изохоры  |   Цикл Отто в PV координатах А и С – адиабаты; B и D – изохоры |

**ЦИКЛ ДИЗЕЛЯ**

Цикл Дизеля - цикл с изобарным подводом теплоты. Его широко используют в двигателях внутреннего сгорания мощных энергетических установок (двигатели тепловозов, кораблей и т.п., а также в современных автомобилях.

КПД дизельных двигателей (40-53%)

Для цикла дизеля степень сжатия 16-18, в качестве топлива используют тяжелые фракции перегонки нефти – дизельное топливо.

**КПД цикла Дизеля равен**

**,**

**здесь – степень сжатия**: отношение полного объема цилиндра (в начале процесса сжатия) к объему камеры сгорания в конце процесса сжатия,

**γ – показатель адиабаты** для рабочего газа γ=ср/cv~1,2 –1,4.

 **– степень предварительного изобарного расширения в процессе подвода теплоты, q1 –** изобарный процесс (2-3) (см рисунок ниже, и также [1], с. 114).

Цикл Дизеля представлен ниже в **ТS** и PV координатах. Он состоит из изобары ((2-3), при которой подводится тепло, изохоры (4-1), при которой тепло отводится, и 2-х адиабат (1-2) и (3-4).

|  |  |
| --- | --- |
|  Цикл Дизеля TS координатах(1-2) и (3-4) – адиабаты; (2-3) – изобара;(4-1) – изохора.  |  Цикл Дизеля PV координатах(1-2) и (3-4) – адиабаты; (2-3) – изобара;(4-1) – изохора. |

**ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ**

**ПРИМЕР 4**

В колбе находится газ кислород при температуре T1.он занимает объем V1=1 м3 и находится под давлением P1=200 кПа. Газ нагрели до температуры T2 при постоянном давлении, его объем стал равен V2=3 м2, потом нагрели до температуры T3 при постоянном объеме, давление при этом стало равным P2=500 кПа.

Найти: 1) изменение ΔU внутренней энергии газа; 2) совершенную кислородом работу A; 3) количество теплоты Q, переданное кислороду.

Построить и объяснить график процесса, описанного в задаче.

|  |
| --- |
| Дано: кислород, O2, двухатомная молекула;V1=1, м3; V2=3, м3;P1=200 кПа=2∙105 Па; P2=500 кПа=5∙105 Па;Ход процесса представлен на графике:нагрев при постоянном давлении - изобарный процесс, затем нагрев при постоянном объеме – изохорный процесс. |
| ΔU; А; Q**? Построить график процесса** |

Решение. Построим график процесса в координатах PV.

Горизонтальная линия (1-2) – изобарный процесс (давление при нагревании не меняется), вертикальная линия (2-3) изохорный процесс (объем не меняется)



На графике точками 1,2,3 обозначены состояния газа, характеризуемые параметрами (P1; V1; T1), (P1; V2; T2), (P2; V2; T3).

Определяем изменение внутренней энергии кислорода в результате проведенного термодинамического процесса.

Изменение внутренней энергии ΔU газа при переходе кислорода из состояния 1 в состояние 3, определяется параметрами состояния в начале и конце термодинамического (ТД) процесса, т.к. внутренняя энергия является функцией состояния, и выражается формулой

ΔU =cv∙m∙ΔT,

где cv — удельная теплоемкость газа при постоянном объеме; m — масса газа; ΔT — разность температур, соответствующих конечному (3) и начальному (1) состояниям:

ΔT= T3- T1 и ΔU =cv∙m∙ (T3- T1). (1)

Учитывая, что**,** где *i-* число степеней свободы молекулы кислорода, а R – универсальная газовая постоянная, μ – молярная масса, получаем

**. (2)**

Кислород – двухатомная молекула, у нее три поступательных и две вращательных степени свободы, значит ***i*=5.**

Температуры Т1 и Т3 найдем из уравнения Менделеева — Клапейрона

 **и (3)**

Учитывая (3) и то, что *i=5* из (2) получаем:

Найдем работу, произведенную кислородом в ТД процессе, приведенном в задаче. Работа в ТД процессе зависит от пути перехода между состояниями поэтому полная работа, совершаемая газом, равна сумме работ на участках (1-2) и (2-3), т.е. А=А12+ А23. Работа, определяется соотношением **A=P∙ΔV.**

На участке 1—2 давление постоянно (Р=const), в этом случае работа определяется формулой **А12=P1(V2 –** **V1).** На участке 2—3 объем постоянный (V=const), значит ΔV=0 и, соответственно, **A=P∙ΔV=0. Значит работа на участке (2-3) равна нулю.**

**Полная работа:** **А=А12+ А23= P1(V2 –** **V1)=**

По первому закону термодинамики

|  |
| --- |
| **Ответ:** ΔU=3,25 МДж; А=0,4 МДж; Q=3,65 Мдж |

**ПРИМЕР 5**

Идеальный двухатомный газ, содержащий количество вещества ν=l моль, находится при температуре Т1 под давлением Р1 = 250 кПа и занимает объем V1=10л. Газ участвует в циклическом термодинамическом процессе: сначала газ изохорно нагревают до температуры Т2=400 К; далее, изотермически расширяя, доводят его до первоначального давления (Р1); после этого путем изобарного сжатия возвращают газ в начальное состояние. Определить термический КПД (η) цикла и сравните его с КПД цикла Карно.

|  |
| --- |
| Дано: идеальный газ двухатомный. ν=1 моль;V1=10 л=1∙10–2, м3;Р1 = 250 кПа=2,5∙105 Па;Т2=400 К.ТД процесс –цикл приведен на графике:прямая (1-2) – изохора (V=const);линия (2-3) – изотерма (Т=const);прямая (3-1) – изобара (P=const).  |
| **КПД (η) цикла?** |

Решение.

График цикла приведен на рисунке



Термический КПД любого цикла равен

 **(1)**

где — количество теплоты, полученное рабочим телом (газом) от нагревателя; — количество теплоты, переданное рабочим телом, А – работа, совершаемая газом за цикл.

С геометрической точки зрения теплота **Q1**, получаемая газом, равна площади под линиями (1-2-3), т.е. газ получает тепло в изохорном и изотермическом процессах; как видно из рисунка:

**Q1 = Q12 + Q23**

Тепло, отданное газом **Q2** равно площади под циклом, т.е. под линией (3-1), следовательно, газ отдает тепло в изобарном процессе:

**Q2= Q31**

Полезная работа**,** т.е. равна площади цикла – на рисунке заштрихована.

Количество теплоты. полученное газом при изохорном процессе

 **(2)**

где **CV** — молярная теплоемкость газа при постоянном объеме; ν — количество вещества; **Т1,** **Т2** в состояниях, соответствующих точкам (1) и (2).

Температура **Т1** начального состояния газа (1) найдем, воспользовавшись уравнением Клапейрона — Менделеева, записанного для одного моля вещества (PV=RT), тогда:

Количество теплоты, полученное газом при изотермическом процессе (линия (2-3), равно

 где V2 — объем, занимаемый газом при температуре Т2 и давлении P2 (точка 3 на графике).

Соотношение длязапишем через температуры. Из формулы Менделеева- Клапейрона для изобарического процесса следует, что

 , но из графика цикла видно, что**поэтому**

**, в** результате

 **(3)**

Суммируя (2) и (3) получаем теплоту, переданную газу

 **(4)**

На участке 3—1 газ отдает количество теплоты Q2, равное

 **(5)**

где Ср — молярная теплоемкость газа при изобарном процессе.

Подставим найденные значения Q1 и Q2 в формулу (1) для КПД:

 **(6)**

Найдем молярные изохорную и изобарную теплоемкости через степени свободы молекулы. Идеальный газ является двухатомным. Следовательно, число степеней свободы равно *i=5* (3 поступательных и 2 вращательных)*,* тогдаПодставляятеплоемкости и температуры в (6) получаем:

|  |
| --- |
|  |

**ПРИМЕР 6**

КПД бензинового двигателя автомобиля равен 20 %. Изохорная теплоемкость рабочих газов составляет 77% от изобарной. Определить степень сжатия рабочих газов двигателя.

|  |
| --- |
| **Дано:** бензиновый двигатель внутреннего сгорания (ДВС).КПД, **СV=0,77 СР**  |
| **Найти** степень сжатиярабочих газов двигателя |

ДВС бензиновый, он использует цикл Отто. КПД цикла Отто равен

, (1)

здесь – степень сжатия: отношение полного объема цилиндра (в начале процесса сжатия) к объему камеры сгорания в конце процесса сжатия, γ=СP/ СV – показатель адиабаты для рабочего газа.

В нашем случае

**γ=СP/ СV= СP/ (0,77СР) =1,3 (2)**

Из (1) и (2) найдем степень сжатия

|  |
| --- |
| **Ответ:** степень сжатия  |

**ПРИМЕР 7**

Найти изменение ΔS энтропии при нагревании воды массой т= 100 г от температуры T1=0 °С до температуры кипения Tкип= 100 °С и последующем превращении воды в пар той же температуры.

|  |
| --- |
| Дано: Вода, H2O. Трехатомная молекулаm=100г=0,1 кгT1=0 °С=273 KTкип= 100 °С=373 K |
| **Изменение энтропии, ΔS**? |

Решение. Найдем отдельно изменение энтропии ΔSнаг при нагревании воды и изменение энтропии ΔSкип при превращении ее в пар.

Полное изменение энтропии равно

**ΔS= ΔSнаг+ ΔSкип**

В общем случае изменение энтропии определяется формулой

 **(1)**

Вычисление изменения энтропии **ΔSнаг** при нагревании воды.

Для бесконечно малого изменении dТ температуры нагреваемого тела необходимо затратить количество теплоты, где m — масса тела; сP — его изобарная удельная теплоемкость (обычно говорят удельная теплоемкость, т.к. ее измерять при постоянном давлении значительно проще).

Вода – жидкость и к ней закон равнораспределения энергии по степеням свободы относится к газам, поэтому значение удельной теплоемкости воды берем из справочника. Удельная теплоемкость воды при 293 К равна 4208 Дж/(кг·град), будем считать, что она постоянна в нашем температурном интервале, что верно с точностью 2%.

 Подставив выражение в равенство (1), найдем формулу для вычисления изменения энтропии при нагревании воды:

Вычисление изменения энтропии **ΔSкип** при кипении воды.

При кипении воды температура остается постоянной, поэтому температура выносится из под знака интеграла формулы (1)

В этой формуле **–** теплота парообразования воды.

Полное изменение энтропии при нагревании воды и последующем превращении ее в пар **ΔS= ΔSнаг+ ΔSкип=131,4+6053,6=6185 Дж/К**

|  |
| --- |
| **Ответ: ΔS= 6185 Дж/К - изменение энтропии при нагреве и превращении 100 граммов воды в пар** |

* 1. **Теплопередача. Излучение, теплопроводность.**

**Основные формулы и примеры решения задач**

**Излучение** — электромагнитное излучение, испускаемое за счет внутренней энергии веществом, находящимся при определенной температуре.
Энергетическая светимость теплового излучения объекта c единичной площадью поверхности**,** удовлетворяющего критериям абсолютно черного тела (АЧТ), описывается **законом Стефана — Больцмана**

**,**

**здесь – постоянная Стефана-Больцмана,**

 ***–* энергетическая светимость.**

**Поток энергии абсолютно черного тела**

**Длина волны, соответствующая максимальной мощности теплового излучения при заданной температуре Т,** (*т.е. максимуму спектральной плотности энергетической светимости*) **определяется первым законом Вина (законом смещения Вина)**

**,**

**здесь**

**Примечание:** частовместо стандартного термина «Максимум спектральной плотности энергетической светимости –**»** используется устаревший термин «Максимум излучательной способности –», т.к. он более короткий.

Значение максимума спектральной плотности энергетической светимости теплового излучения, который соответствует определяется **вторым законом Вина**

**Закон теплопроводности Фурье**

**В одномерном случае количество теплоты dQ, перенесенное через поверхность площадью S, перпендикулярную направлению теплового потока, за время dt, равно**

**,**

**где– коэффициент теплопроводности;**

**– градиент температуры.**

**ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ**

**ПРИМЕР 8**

Энергетическая светимость абсолютно черного тела (АЧТ) *Re* = 3 Вт/ Определить длину волны *λМ*, соответствующую максимуму излучательной способности этого тела (максимальной мощности теплового излучения при заданной температуре Т тела).

|  |
| --- |
| **Дано**: АЧТ*R* = 3 Вт/ = 3·104 Вт/м2 .σ = 5,67·10-8 Вт/(м2 ·К4 ) м·К |
| Найти длину волны *λМ,* соответствующую максимуму излучательной способности АЧТ |

**Решение**:

По закону Стефана – Больцмана поэтому можно выразить температуру:

По закону смещения Вина, тогда

 Полученное значение соответствует инфракрасному (тепловому) излучению.

|  |
| --- |
| **Ответ:** λМ = 3,4·10-6 м=3,4 мкм, инфракрасное излучение |

**ПРИМЕР 9**

Какое напряжение должно быть у нагревателя, чтобы обеспечить постоянство температуры объекта, если он нагрет на 30 градусов относительно температуры среды, а теплоизоляция толщиной 4 см сделана из пенопласта, его площадь – 0,5 м2. Сопротивление нагревателя –10 Ом, КПД нагревателя – 100%. Найти также NПОТ – теряемую мощность за счет теплопроводности, которую пришлось компенсировать нагревателем.

|  |
| --- |
| **Дано:** ΔT=30 KΔx= 4 см=4∙10–2 МS=0,5 мR= 10 ОмКПД =100%Теплоизолятор – пенопласт,  |
| **Найти** NПОТ теряемую мощность за счет теплопроводности и напряжение **U** нагревателя |

**Решение**:

Согласно одномерному уравнению теплопроводности количество теплоты dQ, перенесенное через поверхность площадью S, перпендикулярную направлению теплового потока, за время dt, равно

**,**

где– коэффициент теплопроводности;

– градиент температуры.

Эту теплоту объект теряет из-за теплопроводности. Следовательно, абсолютное значение теряемой мощности NПОТ составляет

 **(1)**

Чтобы температура оставалась постоянной нагреватель должен компенсировать теряемую мощность. Поскольку КПД нагревателя 100%, то мощность нагревателя NНАГР должна быть равна теряемой мощности NПОТ:

**NНАГР= NПОТ. (2)**

Мощность нагревателя равна**,** отсюда и из (1, 2) получаем

|  |
| --- |
| **Ответ:** теряемая мощность за счет теплопроводности 14,4 Вт; напряжение нагревателя для компенсации потерь равно 12 В |

**ЛИТЕРАТУРА**

1. ОСНОВНАЯ Теплотехника: учебное пособие / составители А. В. Васильев, Ю. С. Бахрачева. — Волгоград: Волгоградский институт бизнеса, Вузовское образование, 2009. — 208 c. — ISBN 2227-8397. — Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. — URL: http://www.iprbookshop.ru/11352.html (дата обращения: 23.01.2020). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

2. Подготовка к рубежному контролю по курсу теплофизика. Учебное пособие. Составитель А.Г. Черевко, 2020. 40 с.

3. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ Лекции по теплотехнике: конспект лекций / составители В. А. Никитин. — Оренбург: Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2011. — 532 c. — ISBN 2227-8397. — Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. — URL: http://www.iprbookshop.ru/21604.html (дата обращения: 23.01.2020). — Режим доступа: для авторизир. Пользователей