

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Саратовский государственный технический университет имени  
Гагарина Ю.А.»

Филиал федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Саратовский государственный технический университет имени  
Гагарина Ю.А.» в г. Петровске

УТВЕРЖДАЮ  
Директор филиала СГТУ  
имени Гагарина Ю.А. в г.Петровске  
Е.А.Бесшапошникова  
«30» июня 2021 г.



## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

по дисциплине  
ОП.05 «Теплотехника»

специальности  
15.02.09 «Аддитивные технологии»

Методические указания рассмотрены  
на заседании предметной (цикловой) комиссии  
общепрофессиональных дисциплин,  
профессиональных модулей специальностей  
технического профиля  
«14» июня 2021 года, протокол №13

Председатель ПЦК  /Т.А.Лескина/

Петровск 2021

## **Пояснительная записка**

Методические указания по выполнению практических работ подготовлены на основе рабочей программы учебной дисциплины ОП.05 «Теплотехника», разработанной на основе ФГОС СПО по специальности 15.02.09 «Аддитивные технологии» и соответствующих профессиональных (ПК) компетенций:

ОК 02. Организовывать собственную деятельность, выбирать типовые методы и способы выполнения профессиональных задач, оценивать их эффективность и качество.

ОК 03. Принимать решения в стандартных и нестандартных ситуациях и нести за них ответственность.

ОК 04. Осуществлять поиск и использование информации, необходимой для эффективного выполнения профессиональных задач, профессионального и личностного развития.

ОК 05. Использовать информационно-коммуникационные технологии в профессиональной деятельности.

ОК 08. Самостоятельно определять задачи профессионального и личностного развития, заниматься самообразованием, осознанно планировать повышение квалификации.

ОК 09. Ориентироваться в условиях смены технологий в профессиональной деятельности.

ПК 2.1. Организовывать и вести технологический процесс на установках для аддитивного производства.

ПК 2.2. Контролировать правильность функционирования установки, регулировать ее элементы, корректировать программируемые параметры.

ПК 2.3. Проводить доводку и финишную обработку изделий, созданных на установках для аддитивного производства.

ПК 2.4. Подбирать параметры аддитивного технологического процесса и разрабатывать оптимальные режимы производства изделий на основе технического задания (компьютерной/цифровой модели).

В результате практических работ обучающийся должен знать:

- основные законы теплообмена и термодинамики;
- методы получения, преобразования и использования тепловой энергии;
- способы переноса теплоты, устройство и принципы действия теплообменных аппаратов, силовых установок и других теплотехнических устройств;
- тепловые процессы, происходящие в аппаратах и машинах;
- устройство и принцип действия камер построения установок для аддитивного производства;
- закономерности процессов теплообмена камер построения установок для аддитивного производства.

В результате практических работ обучающийся должен уметь:

- рассчитывать теплообменные процессы;

- производить расчеты нагрева и теплообмена в камерах построения установок для аддитивного производства.

Содержание практических занятий определено рабочей программой и тематическим планированием, соответствует теоретическому материалу изучаемых разделов учебной дисциплины.

Объём практических занятий по дисциплине определяется учебным планом по данной специальности.

Продолжительность практического занятия - 2 академических часа. Перед проведением практического занятия преподавателем организуется инструктаж, а по ее окончании – обсуждение итогов.

Комплект методических указаний по выполнению практических работ дисциплины ОП.05 «Теплотехника» содержит 12 практических занятий.

## **Перечень практических работ по дисциплине ОП.05 «Теплотехника»**

### **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №1**

Тема: Расчет изменения внутренней энергии тела при передаче ему теплоты или совершении им работы

### **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №2**

Тема: Решение задач на построение графиков процессов, происходящих с идеальным газом в координатах  $p, T$ ;  $V, T$  и  $p, V$ .

### **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №3.**

Тема: Расчет КПД тепловых двигателей и холодильного коэффициента холодильных установок.

### **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №4**

Тема: Расчет КПД цикла Карно.

### **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №5**

Тема: Расчет КПД поршневых двигателей внутреннего сгорания. Расчет КПД газотурбинных установок. Расчет КПД реактивных двигателей.

### **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №6**

Тема: Расчет КПД паровых теплосиловых установок.

### **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №7.**

Тема: Расчет теплоотдачи при омывании плоской поверхности. Расчет процесса теплоотдачи при движении жидкости в трубах

### **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №8**

Тема: Определение коэффициента теплоотдачи при течении жидкости в горизонтальной стальной трубе

### **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №9.**

Тема: Расчет параметров однослойной и многослойной тепловой изоляции.

### **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №10.**

Тема: Расчет параметров однослойной и многослойной тепловой изоляции.

### **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №11.**

Тема: Решение задач конвективного теплообмена. Решение задач нестационарной теплопроводности

### **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №12.**

Тема: Применение законов излучения АЧТ для расчетов излучения серых и

реальных тел

## **ИНСТРУКЦИИ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ**

Прежде чем приступить к выполнению заданий, внимательно прочитайте данные рекомендации. Практические работы включают в себя задания следующих видов:

### **1. Ответ на поставленные вопросы (с аргументацией)**

Прочитайте вопрос и вникните в него.

Для удобства подчеркните ту, фразу, которая, по вашему мнению, является главной. Это поможет вам быстрее сориентироваться при ответе на вопрос.

Если вы считаете, что можете ответить на вопрос без помощи лекции и дополнительной литературы – приступайте. Если же вопрос заставляет вас сомневаться, откройте лекционную тетрадь (учебник или дополнительную литературу), прочитайте необходимый пункт, вникните в содержание и после этого приступайте за работу.

**ГЛАВНОЕ!** Не переписывайте отрывки лекции в рабочую тетрадь! Четко отвечайте на ПОСТАВЛЕННЫЙ вопрос!

Не забудьте привести аргументацию (обоснование) вашей позиции, если вопрос предполагает личностное отношение к проблеме.

### **2. Выполнение расчетных заданий.**

1. Внимательно прочитайте теоретический материал - конспект, составленный на учебном занятии. Выпишите формулы из конспекта по изучаемой теме.

2. Обратите внимание, как использовались данные формулы при решении задач на занятии.

3. Выпишите ваш вариант задания, предложенного в данных методических указаниях, в соответствии с порядковым номером в учебном журнале.

4. Решите предложенную задачу, используя выписанные формулы.

5. В случае необходимости воспользуйтесь справочными данными.

6. Проанализируйте полученный результат (проверьте размерности величин, правильность подстановки в формулы численных значений, правильность расчетов, правильность вывода неизвестной величины из формулы).

7. Решение задач должно сопровождаться необходимыми пояснениями. Расчётные формулы приводите на отдельной строке, выделяя из текста, с указанием размерности величин. Формулы записывайте сначала в общем виде (буквенное выражение), затем подставляйте числовые значения без указания размерностей, после чего приведите конечный результат расчётной величины.

Показатели оценки результатов внеаудиторной самостоятельной работы:

- грамотная запись условия задачи и ее решения;

- грамотное использование формул;
- грамотное использование справочной литературы;
- точность и правильность расчетов;
- обоснование решения задачи.

### **3.Оформление отчетов по лабораторным и практическим работам и подготовка к их защите**

1. Обратитесь к методическим указаниям по проведению лабораторных и практических работ и оформите работу, указав название, цель и краткий порядок проведения работы.

2. Повторите основные теоретические положения по теме лабораторной или практической работы, используя конспект лекций или методические указания.

3. Сформулируйте выводы по результатам работы, выполненной на учебном занятии. В случае необходимости закончите выполнение расчетной части.

4. Подготовьтесь к защите выполненной работы: повторите основные теоретические положения и ответьте на контрольные вопросы, представленные в методических указаниях по проведению лабораторных или практических работ.

Показатели оценки результатов внеаудиторной самостоятельной работы:

- оформление лабораторных и практических работ в соответствии с требованиями, описанными в методических указаниях;
- качественное выполнение всех этапов работы;
- необходимый и достаточный уровень понимания цели и порядка выполнения работы;
- правильное оформление выводов работы;
- обоснованность и четкость изложения ответа на контрольные вопросы к работе.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №1

**Тема:** Расчет изменения внутренней энергии тела при передаче ему теплоты или совершении им работы

**Цель:** научиться определять удельную теплоёмкость вещества с применением уравнения теплового баланса.

**Оборудование:** - стакан с водой; калориметр; термометр; весы; металлический цилиндр на нити; сосуд с горячей водой.

### Справочный материал

1. Круглов, Г. А. Основы теплотехники : учебное пособие для спо / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 208 с. — ISBN 978-5-8114-6805-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/152638>
2. Замалеев, З. Х. Основы гидравлики и теплотехники : учебное пособие для спо / З. Х. Замалеев, В. Н. Посохин, В. М. Чефанов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 352 с. — ISBN 978-5-8114-6644-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151198>
3. Логинов, В. С. Основы теплотехники. Практикум : учебное пособие для спо / В. С. Логинов, В. Е. Юхнов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 128 с. — ISBN 978-5-8114-6672-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151217>

### Дополнительные учебные издания

4. Теплотехника : учебное пособие для СПО / составители В. А. Никитин. — Саратов : Профобразование, 2020. — 532 с. — ISBN 978-5-4488-0690-2. — Текст : электронный // Электронный ресурс цифровой образовательной среды СПО PROФобразование : [сайт]. — URL: <https://profspo.ru/books/91902>

### Содержание работы

1. Измерьте температуру и объём воды комнатной температуры в мензурке. Вычислите массу воды.
2. С помощью весов определите массу цилиндра.
3. Опустите цилиндр в сосуд с горячей водой. Измерьте её температуру (эта температура и будет начальной температурой цилиндра).
4. Опустите цилиндр в мензурку с водой комнатной температуры. Измерьте температуру воды после опускания цилиндра.
5. Рассчитайте удельную теплоёмкость вещества, из которого изготовлен цилиндр.
6. Сравните полученное значение с табличным и сделайте вывод.

## **Задание 1.**

Расскажите какая энергия отдается при теплообмене

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №2**

**Тема:** Решение задач на построение графиков процессов, происходящих с идеальным газом в координатах  $p, T$ ;  $V, T$  и  $p, V$ .

**Цель:** рассмотреть подборку графических задач по молекулярной физике и термодинамике

**Оборудование:** Лабораторные колбы

### **Справочный материал**

1. Круглов, Г. А. Основы теплотехники : учебное пособие для спо / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 208 с. — ISBN 978-5-8114-6805-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/152638>
2. Замалеев, З. Х. Основы гидравлики и теплотехники : учебное пособие для спо / З. Х. Замалеев, В. Н. Посохин, В. М. Чефанов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 352 с. — ISBN 978-5-8114-6644-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151198>
3. Логинов, В. С. Основы теплотехники. Практикум : учебное пособие для спо / В. С. Логинов, В. Е. Юхнов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 128 с. — ISBN 978-5-8114-6672-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151217>

### **Дополнительные учебные издания**

4. Теплотехника : учебное пособие для СПО / составители В. А. Никитин. — Саратов : Профобразование, 2020. — 532 с. — ISBN 978-5-4488-0690-2. — Текст : электронный // Электронный ресурс цифровой образовательной среды СПО PROФобразование : [сайт]. — URL: <https://profspo.ru/books/91902>

### **Содержание работы**

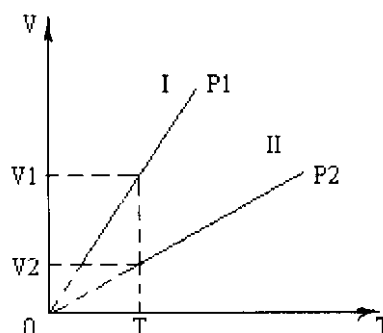
На первом этапе –этапе узнавания- нужно рассмотреть задачи, в которых необходимо уметь определять, какой из процессов, происходящих с одной и той же массой газа, соответствует большему значению одного и того же параметра. А затем перейти к задачам, в которых необходимо оценить изменение того или иного параметра газа, изменение состояния которого не является изопроцессом. При



решении последних довольно часто встречается ошибка, состоящая в неумении отличать процессы, протекающие по линейному закону, от изопроцессов.

### Пример 1

Даны два изобарных процесса, происходящих с одной и той же массой газа, какой



из них происходит при более высоком давлении?

### Решение

Рассмотрим состояния 1 и 2, которым соответствует одна и та же температура. Из уравнения Менделеева-Клапейрона  $pV = \nu RT$  следует, что если  $V$  больше, то  $p$  меньше, т.е. чем больше угол наклона графика к оси абсцисс, тем меньше соответствующее давление.

Ответ: второй процесс происходит при более высоком давлении.

### Пример 2

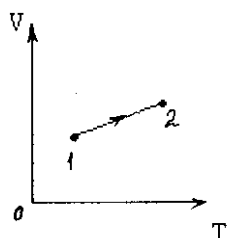
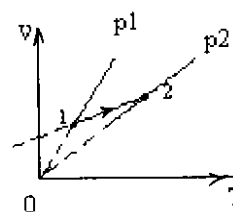


График изменения состояния идеального газа в осях V-T представляет собой прямую линию 1-2. Как изменилось давление газа в этом процессе?

Достаточно часто учащиеся считают, что перед ними изобарный процесс. Поэтому необходимо, прежде всего показать, что график не проходит через начало координат, потому давление газа не может быть постоянным. Для этого

продолжим отрезок, изображающий график, пунктирной линией до пересечения с осью ординат.

Метод решения подобных задач состоит в том, что через интересующие нас состояния проводится система изобар, изотерм или изохор, по положению которых по отношению к системе координат можно сравнить интересующие нас параметры. В данном случае угол наклона изобары, проходящей через состояние 2,

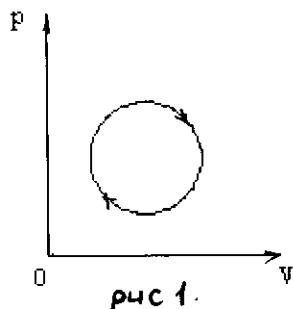


меньше, поэтому ей соответствует большее давление.

Ответ: давление в данном процессе увеличивается.

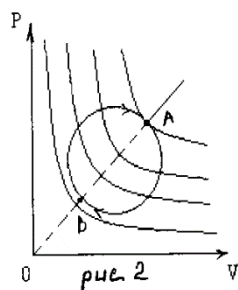
### Пример 3

Укажите точки, в которых достигается наибольшая и наименьшая температура идеального газа, в ходе процесса, изображенного на рисунке



(рис.1).

Чтобы ответить на вопрос этой задачи, построим семейство изотерм (рис.2) Чем дальше от координатных осей находится изотерма, тем выше соответствующая ей температура. Т.о. самой высокой будет температура в точке А, а самой низкой – в точке В. На участке графика ВСА температура газа увеличивается, а на участке

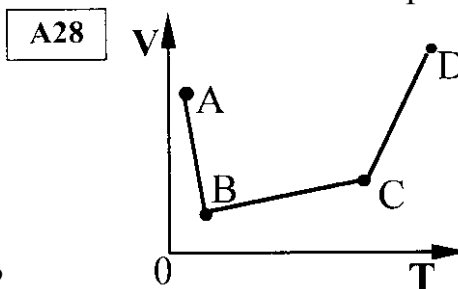


АДБ – уменьшается.

После подробного разбора перечисленных задач, я думаю, несложно будет справиться с заданиями ЕГЭ.

Рассмотрим одну из задач.

В сосуде, закрытом поршнем, находится идеальный газ. График зависимости объема газа от температуры при изменении его состояния показан на рисунке. В



каком состоянии давление газа наибольшее?

1. А; 2) В; 3) С; 4) D.

Ответ: 3.

Следующий тип задач – задачи на построение диаграмм изменения состояния газа в различных координатных плоскостях. Подобные задачи способствуют более прочному усвоению закономерностей изопроцессов. Решение данных задач можно осуществлять по следующему плану:

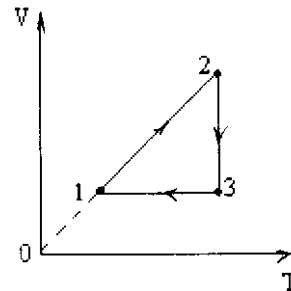
1. Установить, между какими величинами задается зависимость данным графиком.
2. Определить, какие параметры состояния остаются постоянными, а какие – меняются.

3. Определить, какой процесс изображает график (или отдельный участок графика), назвать его.
4. Записать, если возможно, закон, описывающий этот процесс.
5. Изобразить процесс в других координатных осях.

Подробный предварительный анализ графика позволяет избежать ошибок при построении в других координатных плоскостях, а название процесса – закрепить знания о закономерностях, его описывающих.

#### Пример 4

На рисунке дан график изменения состояния идеального газа в координатных



осях V-T. Представить этот график в осях p-V и p-T.

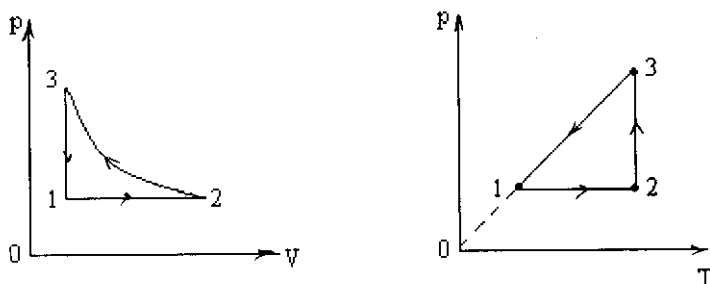
Сначала проанализируем график.

1-2:  $V_p = \text{const}$ , V- изобарное расширение;

2-3:  $T = \text{const}$ , V- изотермическое сжатие,  $pV = \text{const}$ .

3-1:  $V = \text{const}$ , T изохорное охлаждение.

Теперь построим график в других координатных плоскостях.



Рассмотрим также задачу, в которой речь идет о построении в других координатных осях диаграммы процесса, содержащей участки, не являющиеся изопроцессами.

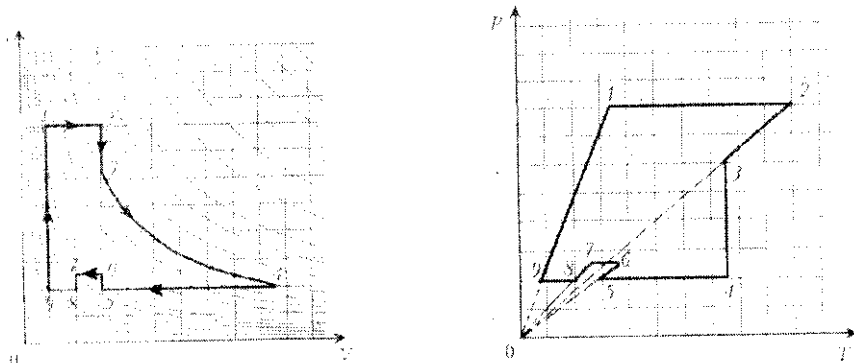
#### Пример 5

Один моль идеального газа участвует в некотором процессе, изображенном в координатах p-V. Продолжения отрезков прямых 1-2 и 3-4 проходят через начало координат, а кривые 1-4 и 2-3 являются изотермами. Изобразить этот процесс в координатах V-T, найти объем  $V_3$ , если известны объемы  $V_1, V_2, V_3$  (Рис.1)

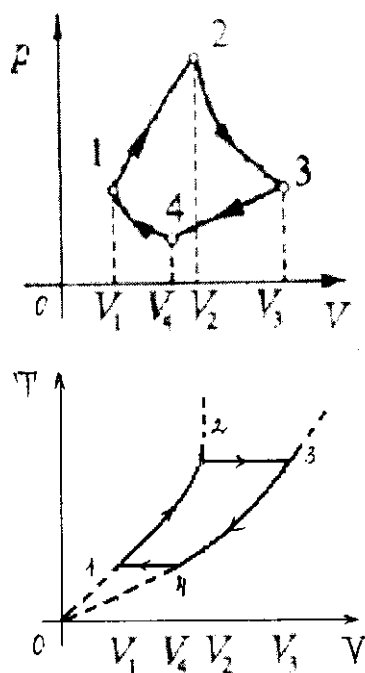
Решение.

Для нахождения объема  $V_3$  учтем, что участки 1-4 и 2-3 – изотермы. По закону Бойля- Мариотта  $p_1 V_1 = p_4 V_4$ ,  $p_2 V_2 = p_3 V_3$ . Т.к. продолжения отрезков прямых 1-2 и 3-4 проходят через начало координат, то для них  $p_1/p_2 = V_1/V_2$ ,  $p_4/p_3 = V_4/V_3$ . Отсюда  $V_3 = V_2 V_4 / V_1$ . Для построения графика в плоскости T-V запишем соотношение  $p = \alpha V$ , а также уравнение Менделеева – Клапейрона  $pV = \nu RT$ . Выразим T и подставим p. Тогда  $T = \alpha V^2 / (\nu R)$ . Отсюда следует, что для участков 1-2 и 3-4 зависимость температуры от объема

квадратичная, графиком такой зависимости является парабола с вершиной в начале координат. График цикла в осях  $T$ - $V$ , имеет вид, указанный на рисунке 2. Учащимся, интересующимся физикой, можно предложить построить в других координатных плоскостях «Ботинок» или «Елочку», а затем придумать свои замкнутые циклы в виде привычных и непривычных предметов. Эту идею я позаимствовала из статьи Е.А. Ольховской.



При построении графиков изопроцессов основное внимание следует обратить на  $p$ - $V$ - диаграммы, особенно когда цикл содержит несколько изотерм одновременно. Если температуры изотерм относятся, например, как  $T_1:T_2:T_3:\dots = 3:4:5\dots$ , то расстояния между такими изотермами уменьшается с повышением температуры. Вновь к графикам изопроцессов приходится вернуться при решении задач по



термодинамике. Рассмотрим подобные задачи.

#### Методика решения задач по термодинамике

В основе термодинамики лежат несколько установленных на опыте фундаментальных физических законов. Первый закон термодинамики представляет собой обобщенный закон сохранения энергии: внутренняя энергия макроскопической системы может быть изменена как в результате работы внешних сил, так и при сообщении теплоты:  $\Delta U = Q + A'$ , где  $A'$  – работа внешних сил.

Для решения многих задач его удобно записывать в другой форме:  $Q = \Delta U + A$ , где  $A$  – работа, совершенная системой над внешними силами. Исторически первый закон термодинамики был сформулирован именно так.

К графическим задачам можно отнести, во-первых, задачи, в которых рассчитывается работа газа в некотором процессе. А во-вторых, задачи, в которых рассматриваются циклические процессы, происходящие с некоторым количеством газа, и для которых нужно определить КПД.

Перед решением таких задач необходимо напомнить учащимся, в чем состоит графический смысл работы и формулировку первого закона термодинамики.

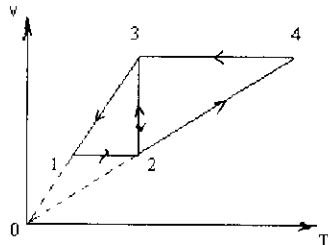
*Работа газа численно равна площади фигуры, ограниченной графиком процесса в координатной плоскости  $p$ - $V$ , осью абсцисс и прямыми, проходящими через соответствующие значения объема, параллельно оси ординат.*

Перед решением задач на расчет КПД цикла надо также обратить внимание на то, что изменение температуры  $\Delta T$  связано с изменением внутренней энергии. Если  $\Delta T$  Если газ совершает работу, то при  $\Delta V$ , т.е. знак работы совпадает со знаком изменения объема.

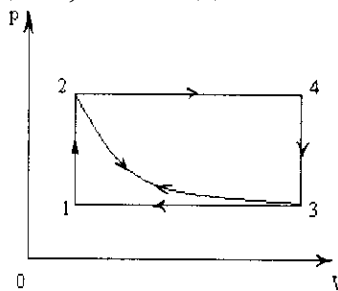
Сначала решаем задачи на расчет работы, производимой газом в процессе, изображенном графически. При решении таких задач нужно обратить внимание на то, что судить о работе можно только в случае, когда график процесса изображен в плоскости  $p$ - $V$ .

Пример 1.

Над идеальным газом проводят два циклических процесса: 1-2-3-1 и 3-2-4-3. В каком из них газ совершает большую работу? Смотри рисунок.



Чтобы ответить на вопрос задачи, необходимо построить диаграмму этих



процессов в плоскости  $p$ - $V$ .

Т.к. работа, совершенная газом за цикл, численно равна площади фигуры, ограниченной циклом в осях  $(p, V)$ , то из рисунка видно, что большая работа совершена в циклическом процессе 3-2-4-3, т.к. площадь фигуры, ограниченной этим циклом, больше.

Начнем с задачи, которая носит подготовительный характер. Впоследствии, при решении задач подобный анализ можно проводить устно. При рассмотрении данной задачи я ввожу обозначения- стрелочка указывает направление поступления теплоты, если она направлена внутрь цикла, то на данном участке

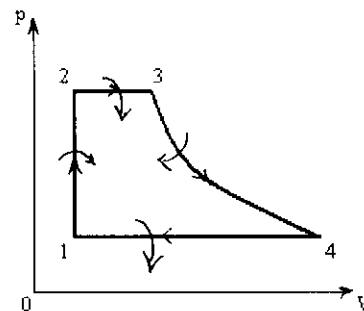
тепло поступает в систему из окружающей среды, если наоборот, то система отдает тепло.

Пример 2.

В цилиндре под поршнем находится воздух. Его состояние последовательно меняется следующим образом:

- а) при постоянном объеме увеличивается давление;
  - б) при постоянном давлении увеличивается объем;
  - в) при постоянной температуре увеличивается объем;
  - г) при постоянном давлении воздух возвращается в исходное состояние.
- Начертить диаграмму в координатах  $p - V$  и указать, при каких из перечисленных изменений воздух получает теплоту и при каких отдает.

Решение.



1-2:  $V = \text{const} \Rightarrow A = 0$ ;  $p \uparrow \Rightarrow T \uparrow \Rightarrow \Delta T > 0 \Rightarrow \Delta U > 0$ .

$Q = \Delta U \Rightarrow Q_{12} > 0$ .

2-3:  $p = \text{const} \Rightarrow V \uparrow \Rightarrow \Delta V > 0 \Rightarrow A > 0$ ,  $V \sim T \Rightarrow V \uparrow \Leftrightarrow T \uparrow \Rightarrow \Delta T > 0$ ,  $\Delta U > 0$ . По первому началу термодинамики  $Q_{23} = \Delta U + A \Rightarrow Q_{23} > 0$ .

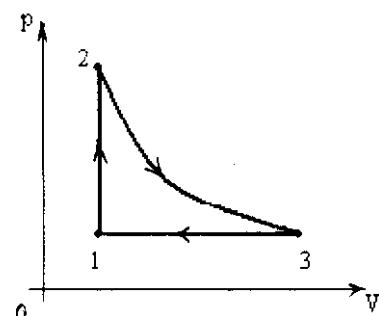
3-4:  $T = \text{const} \Rightarrow \Delta U = 0$ ;  $V \uparrow \Rightarrow \Delta V > 0 \Rightarrow A > 0$ .  $Q_{34} = A \Rightarrow Q_{34} > 0$ .

4-1:  $p = \text{const}$ ,  $V \downarrow \Rightarrow \Delta V < 0 \Rightarrow A < 0$ .  $V \sim T \Rightarrow V \downarrow$  и  $T \downarrow \Rightarrow \Delta T < 0$ ,  $\Delta U < 0$ . По первому закону термодинамики  $Q_{41} = \Delta U + A \Rightarrow Q_{41} < 0$ .

Еще один тип задач - задачи на расчет КПД тепловой машины, которая работает по заданному циклу.

Пример 3

С одним молем идеального одноатомного газа осуществляется цикл, состоящий из изохоры (1-2), адиабаты (2-3) и изобары (3-1). Температуры в точках 1, 2, 3 равны



$T_1, T_2$  и  $T_3$  соответственно. Определите КПД цикла

К решению этой задачи можно подойти по-разному.

С одной стороны Положительная работа совершается газом только в процессе 2-3.

$A_{23} = -\Delta U_{2-3}$ , т.к. процесс 2-3 адиабатный и  $Q_{23} = 0$ .  $\Delta U_{2-3} = \frac{1}{2} i \nu R(T_3 - T_2)$ .  $i$ -число степеней свободы, у одноатомного газа  $i = 3$ .

В процессе 3-1 работу над газом совершают внешние силы. Т.к. 3-1- изобарный процесс, то  $A_{31}=vR(T_1-T_3)$ ,  $A_{31}<0$ , потому что  $T_{13}$ .

Работа, совершенная газом за цикл, равна

$$A=A_{23}+A_{31}=-3/2 v R (T_3-T_2)+vR (T_1-T_3)=1/2vR(3T_2+2T_1-5T_3).$$

Количество теплоты, полученное от нагревателя,  $Q_H=0,5ivR(T_2-T_1)$ , т.к. газ получает энергию лишь на участке 1-2, причем процесс 1-2 изохорный, поэтому  $Q_H=Q_{12}=\Delta U_{12}=1/2ivR(T_2-T_1)$ .

Т.о.

Можно подойти к решению по-другому: из предыдущих рассуждений следует, что  $Q_H=Q_{12}=1/2vR(T_2-T_1)$ .  $Q_X$ - количество теплоты, отдаваемое холодильнику. Т.к. тепло отдается окружающей среде только на участке 3-1, то  $Q_X=Q_{31}$ . По первому началу термодинамики

К этому же результату можно прийти, воспользовавшись формулой

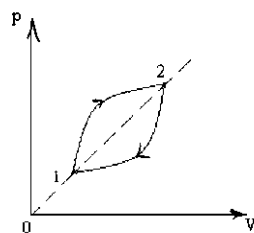
В этой формуле  $c_p$ - удельная теплоемкость газа при постоянном объеме.

Тогда

В рассмотренной задаче цикл состоял из процессов, для которых запись первого начала термодинамики хорошо известна. Но довольно часто на олимпиадах предлагаются задачи, в которых циклы состоят не из известных процессов, а из процессов, которые представляют собой либо линейную зависимость  $p(V)$ , либо дугу окружности. Рассмотрим следующий пример.

Пример 4

В качестве рабочего вещества в тепловой машине используется некоторое количество идеального одноатомного газа, изменение состояния которого изображено на  $p, V$ -диаграмме. При надлежащем выборе масштаба по координатным осям цикл изображается двумя четвертями окружностей, причем точки пересечения дуг 1 и 2 лежат на биссектрисе угла, образуемого осями диаграммы. Найти КПД, если отношение максимального и минимального объемов



газа в этом цикле

Решение.

Работа, совершенная газом в этом цикле численно равна площади фигуры, ограниченной графиком процесса. Радиус окружностей, соответствующих границам цикла, пропорционален  $(p_2-p_1)$  и  $(V_2-V_1)$ , а площадь сегмента, длина дуги которого равна четверти окружности, составляет  $(0,25\pi r^2-0,5r^2)$ .

Тогда работа за цикл равна  $A = S_{\text{фигуры}} = (0,5\pi r^2-1)(p_2-p_1)(V_2-V_1)$ .

Учитывая, что только на участке 1-3-2 газ совершает работу и только на этом участке при увеличении его объема увеличивается давление, а значит, растет температура и внутренняя энергия, можно утверждать, что только на этом участке газ получает энергию от нагревателя.

По первому началу термодинамики  $Q_{132} = \Delta U_{12} + A_{132}$ ,  $\Delta U_{12} = 1,5\nu R(T_2 - T_1)$ .

Из уравнения Менделеева-Клапейрона следует, что  $p_1 V_1 = \nu R T_1$ ,  $p_2 V_2 = \nu R T_2 \Rightarrow \Delta U_{12} = 1,5(p_2 V_2 - p_1 V_1)$ .

$A_{132} = S_{\text{сегмента}} + S_{\text{трапеции}} = 0,25 \pi r^2 - 0,5r^2 + 1/2(p_2 + p_1)(V_2 - V_1) = (V_2 - V_1)(0,25\pi(p_2 - p_1) - 0,5(p_2 - p_1 - p_2 - p_1)) = (V_2 - V_1)(p_1 + 0,25\pi(p_2 - p_1))$ .

По условию задачи точки 1 и 2 лежат на биссектрисе координатного угла.

Следовательно, некоторое число. Учитывая, что по условию задачи

получим  $p_1 = kV_1$ ;  $p_2 = kV_2 = kV_1 n$ . Тогда работа за цикл равна

$A = (0,5\pi - 1)(n - 1)^2 k V_1^2$ .

А количество получаемой газом от нагревателя теплоты равно

$Q = 3/2 k V_1^2 (n^2 - 1) + k V_1^2 (n - 1)(1 + 0,25\pi(n - 1)) = 0,25 k V_1^2 (n - 1)((6 + \pi)n + 10 - \pi)$ .

Определим искомый КПД:

Ответ:  $\eta \approx 0,13$ .

### Задание 1.

Перечертить процесс, происходящий с газом из осей  $p, V$  в оси  $V, T$  и  $p, T$

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №3

**Тема:** Расчет КПД тепловых двигателей и холодильного коэффициента холодильных установок.

**Цель:** Помочь учащимся сформулировать принципы работы тепловой машины, разобраться в ее принципиальном, с точки зрения физики, устройстве; научить вычислять полезную работу, совершенную тепловой машиной за цикл; освоить методы расчета к.п.д. тепловых двигателей

**Оборудование:** Теплодвигатель, мультиметр

### Справочный материал

1. Круглов, Г. А. Основы теплотехники : учебное пособие для спо / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 208 с. — ISBN 978-5-8114-6805-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/152638>

2. Замалеев, З. Х. Основы гидравлики и теплотехники : учебное пособие для спо / З. Х. Замалеев, В. Н. Посохин, В. М. Чефанов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 352 с. — ISBN 978-5-8114-6644-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151198>



3. Логинов, В. С. Основы теплотехники. Практикум : учебное пособие для СПО / В. С. Логинов, В. Е. Юхнов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 128 с. — ISBN 978-5-8114-6672-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151217>

### Дополнительные учебные издания

4. Теплотехника : учебное пособие для СПО / составители В. А. Никитин. — Саратов : Профобразование, 2020. — 532 с. — ISBN 978-5-4488-0690-2. — Текст : электронный // Электронный ресурс цифровой образовательной среды СПО ПроФобразование : [сайт]. — URL: <https://profspo.ru/books/91902>

### Содержание работы

Рабочее вещество, внутренняя энергия которого  $U$  связана с давлением  $P$  и объемом  $V$  соотношением  $U = kPV$ , совершает термодинамический цикл, состоящий из изобары, изохоры и адиабаты (рис. 1). Работа, совершенная веществом во время изобарного процесса, в  $m = 5$  раз превышает работу внешних сил по сжатию вещества, совершенную при адиабатическом процессе. К.п.д. цикла  $\eta = 1/4$ . Определите  $k$ .

Решение:

К.п.д. цикла по определению равен

$$\eta = \frac{A}{Q_1} \quad (1)$$

Полезная работа, совершенная веществом за цикл

$$A = A_{12} - A_{31} \quad (2)$$

где  $A_{12}$  - работа, совершаемая веществом на изобаре  $1 \rightarrow 2$ ,  $A_{31}$  - работа, совершенная над рабочим веществом на адиабате  $3 \rightarrow 1$  ( $A_{31} < 0$ ).

В данном цикле тепло  $Q_1$  подводится к рабочему веществу только на изобарическом участке цикла. Согласно 1-му началу термодинамики

$$Q_1 = \Delta U_{12} + A_{12} \quad (3)$$

где  $\Delta U_{12}$  - изменение внутренней энергии рабочего вещества на участке цикла  $1 \rightarrow 2$ .

Используя заданную в условии задачи связь внутренней энергии рабочего вещества с давлением и объемом на изобаре  $1 \rightarrow 2$ , можно записать

$$\Delta U_{12} = kP(V_2 - V_1) = kP\Delta V = kA_{12} \quad (4)$$

Тогда

$$Q_1 = (k + 1)A_{12} \quad (5)$$

Учитывая, что, согласно условию задачи,  $A_{31} = \frac{A_{12}}{m}$ , уравнение (2) можно представить в виде

$$A = A_{12} - \frac{A_{12}}{m} = \frac{(m-1)}{m} A_{12} \quad (6)$$

Подставляя (5) и (6) в (1) и решая относительно  $k$ , находим

$$k = \frac{m-1-\eta m}{\eta m} = 2,2$$

Ответ:  $k=2,2$ .

### Задача 2.

Рабочее вещество тепловой машины совершает цикл Карно между изотермами  $T$  и  $T_1$  ( $T_1 > T$ ) (рис. 2). Холодильником является резервуар, температура которого постоянна и равна  $T_2 = 200$  К ( $T_2 < T$ ). Теплообмен между рабочим веществом и холодильником осуществляется посредством теплопроводности. Количество теплоты, отдаваемое в единицу времени холодильнику,  $q = \alpha(T - T_2)$ , где  $\alpha = 1$  кВт/К. Теплообмен рабочего вещества с нагревателем происходит непосредственно при  $T_1 = 800$  К. Полагая, что продолжительность изотермических процессов одинакова, а адиабатических - весьма мала, найдите температуру "холодной" изотермы  $T$ , при которой мощность тепловой машины наибольшая. Определите наибольшую мощность тепловой машины.

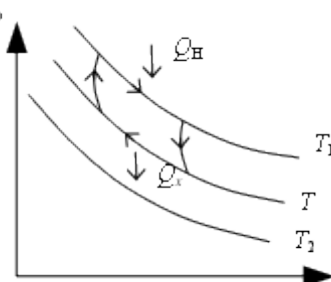


Рис. 2

Решение:

За время  $\tau$  холодильник получает количество теплоты

$$Q_x = \alpha(T - T_2)\tau \quad (1)$$

К.п.д. цикла Карно

$$\eta = \frac{Q_H - Q_x}{Q_H} = \frac{T_1 - T}{T_1} \quad (2)$$

Полезная работа тепловой машины за цикл равна

$$A = Q_H - Q_x = Q_H \left( 1 - \frac{T}{T_1} \right) \quad (3)$$

Преобразуем (3), выразив  $Q_H$  через  $Q_x$ , используя (2):

$$A = Q_x \left( 1 - \frac{T}{T_1} \right) \frac{T_1}{T} \quad (4)$$

Подставив в (4)  $Q_x$  из (1), получаем

$$A = \alpha(T - T_2)\tau \left( \frac{T_1}{T} - 1 \right) \quad (5)$$

Полное время цикла, за которое совершается эта работа, равно  $2\tau$ , следовательно, мощность равна

$$N = \frac{A}{2\tau} = \frac{\alpha\tau(T - T_2)\left(\frac{T_1}{T} - 1\right)}{2\tau} = \frac{\alpha}{2}\left(T_1 - \frac{T_2 T_1}{T} - T + T_2\right) \quad (6)$$

$$N = N_{\max} \text{ при } \frac{dN}{dt} = 0 \text{ и } \frac{d^2 N}{dt^2} < 0$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{T_2 T_1}{T^2} - 1 = 0 \quad (7)$$

Из (7) видно, что  $N = N_{\max}$  при  $T = \sqrt{T_2 T_1} = 400 \text{ К}$ .

$$N_{\max} = \frac{\alpha}{2}\left(T_1 - 2\sqrt{T_1 T_2} + T_2\right) = 100 \text{ кВт.}$$

Ответ: наибольшая мощность машины равна 100 кВт.

### Задача 3.

В тепловой машине  $\nu$  молей идеального одноатомного газа совершают замкнутый цикл, состоящий из процессов 1→2 и 2→3, в которых давление  $P$  газа линейно зависит от занимаемого им объема  $V$ , и изохорического процесса 3→1 (рис. 3). Величины  $P_0$  и  $V_0$  считаются известными. Найдите:

1. температуру и давление газа в точке 3;
2. работу, совершенную газом за цикл;
3. к.п.д. машины.

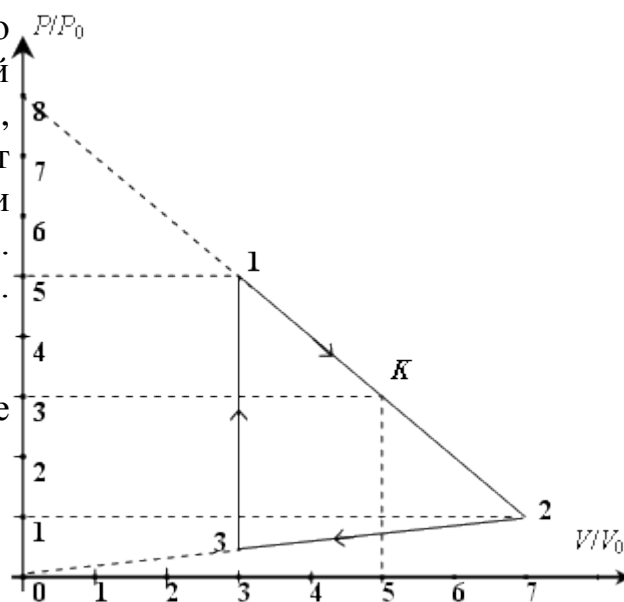


Рис. 3

Решение:

Давление, объем и температуру в точках 1, 2 и 3 обозначим через  $P$ ,  $V$  и  $T$  с соответствующими индексами.

Поскольку на участке 2→3 давление линейно, но зависит от занимаемого объема, то можно записать

$$\frac{P_2}{V_2} = \frac{P_3}{V_3} \quad (1)$$

Из рисунка видно, что

$$V_3 = 3V_0, P_2 = P_0, V_2 = 7V_0.$$

Подставляя эти значения в (1), находим  $P_3$

$$P_3 = \frac{P_2 V_3}{V_2} = \frac{3P_0}{7} \quad (2)$$

Из уравнения состояния идеального газа, используя (2), получаем  $T_3$ .

$$T_3 = \frac{P_3 V_3}{\nu R} = \frac{9 P_0 V_0}{7 \nu R} \quad (3)$$

Работа газа за цикл численно равна площади треугольника 123. Эту площадь можно вычислить как сумму площадей двух прямоугольных треугольников

$$A = \frac{1}{2} (P_1 - P_2)(V_2 - V_1) + \frac{1}{2} (P_2 - P_3)(V_2 - V_1) = \frac{1}{2} (P_1 - P_3)(V_2 - V_3) = \frac{64 P_0 V_0}{7} \quad (4)$$

Для вычисления к.п.д. цикла нужно найти количество теплоты, полученное газом.

Количество тепла, полученное газом на участке 3→1, равно

$$Q_{3 \rightarrow 1} = \nu C_V (T_1 - T_3) = \nu \frac{3}{2} R (T_1 - T_3) = \frac{144}{7} P_0 V_0 \quad (5)$$

Покажем, что на участке цикла 1→2 есть точка К с соответствующим объемом  $V_K$  таким, что газ при  $V < V_K$  получает тепло, а при  $V > V_K$  отдает тепло.

Найдем аналитическое выражение процесса, соответствующего участку 1→2. Как видно из рисунка, участку 1→2 соответствует линейная функция

$$y = kx + b \quad (6)$$

Введем обозначения  $y = \frac{P}{P_0}$ ,  $x = \frac{V}{V_0}$  и найдем параметры  $k$  и  $b$ , воспользовавшись данными, указанными на рисунке.

При  $x = 0$   $y = \frac{P}{P_0} = 8$ , следовательно,  $b = 8$ ;

$y = 0$   $0 = kx + 8$ , следовательно,  $k = -1$ .

Таким образом, (6) представляется в виде

$$\frac{P}{P_0} = -\frac{V}{V_0} + 8$$

или

$$P = -\frac{P_0}{V_0} V + 8P_0 \quad (7)$$

Подставив  $P$  в виде (7) в уравнение состояния идеального газа  $PV = \nu RT$ , получаем

$$8P_0 V - \frac{P_0}{V_0} V^2 = \nu RT \quad (8)$$

Из уравнения (8) в приращениях

$$\nu R \Delta T = \left( 8P_0 - \frac{2P_0}{V_0} V \right) \Delta V \quad (9)$$

С учетом полученных соотношений (7) и (9) уравнение 1-го закона термодинамики

на участке 1→2  $Q = \frac{3}{2} \nu R \Delta T + P \Delta V$  можно представить в виде

$$Q = \left( 20P_0 - \frac{4P_0}{V_0} V \right) \Delta V \quad (10)$$

Из полученного уравнения видно, что на участке  $1 \rightarrow 2$   $Q_{1K} > 0$  при  $V < 5V_0$  и  $Q_{K2} < 0$  при  $V > 5V_0$ , следовательно,

$$V_K = 5V_0, \quad P_K = 3P_0 \text{ и } T_K = \frac{P_K V_K}{\nu R} = \frac{15P_0 V_0}{\nu R}.$$

Воспользовавшись этими значениями, найдем количество теплоты, получаемое газом на участке  $1 \rightarrow K$ , предварительно определив  $T_1$  из уравнения состояния идеального газа

$$Q_{1 \rightarrow K} = \nu \frac{3}{2} R(T_K - T_1) + \frac{P_1 + P_K}{2} (V_K - V_1) = 8P_0 V_0 \quad (11)$$

Итак, совершая полный цикл, газ получает тепло на участках  $3 \rightarrow 1$  и  $1 \rightarrow K$ . Количество полученного на этих участках тепла определяется равенствами (5) и (11).

Работа, совершенная газом за цикл, найдена в (4).

Теперь есть все данные для определения к.п.д. цикла.

$$\eta = \frac{A}{Q_{3 \rightarrow 1} + Q_{1 \rightarrow K}} = 0,32$$

Ответ: к.п.д. рассмотренного цикла равен 32 %.

#### Задача 4.

Идеальная холодильная машина имеет в качестве холодильника резервуар с водой при  $0^\circ\text{C}$ , а в качестве нагревателя - резервуар с кипящей водой. Какую работу надо совершить, чтобы превратить в лед 1 кг воды? Какое количество воды в нагревателе превратится при этом в пар? Удельная теплота плавления льда  $\lambda = 340 \text{ кДж/кг}$ , удельная теплота парообразования воды  $r = 2260 \text{ кДж/кг}$ .

Решение:

Холодильная машина работает по такому принципу: за счет внешней механической работы тепло отнимается от более холодного резервуара и передается более горячему резервуару.

Полезный эффект холодильной машины определяется количеством теплоты  $Q_x$ , отобранном у охлаждаемого тела, а затраченная энергия - это внешняя работа  $A$ , совершенная над рабочим телом. Отношение

$$\varepsilon = \frac{Q_x}{A}$$

обычно называют холодильным коэффициентом.

Если холодильная машина работает по так называемому идеальному циклу - обратному циклу Карно (цикл Карно теперь обходится против часовой стрелки), то

$$\varepsilon = \frac{T_x}{T_H - T_x}$$

Из этой формулы видно, что  $\varepsilon$  может быть меньше, больше или равен 100 %. Действительно, возможно построить холодильную машину, у которой разность

температур нагревателя и холодильника будет больше, меньше или равна температуре холодильника.

Тот факт, что  $\varepsilon$  может быть больше 100 %, иногда вызывает вопрос - не нарушается ли при этом закон сохранения энергии. На самом деле никакого противоречия с законом сохранения энергии нет. Тепло, отработанное у охлаждаемого тела, и энергия, затраченная на совершение работы извне, вовсе не переходят друг в друга, а отдаются нагревателю (обычно у холодильных машин им является окружающая среда).

Холодильный коэффициент идеальной машины, работающей в заданном по условию задачи температурном интервале, равен

$$\varepsilon = \frac{T_x}{T_H - T_x} = \frac{273 \text{ К}}{100 \text{ К}} = 2,73$$

При замерзании 1 кг воды выделяется количество теплоты

$$Q_x = \lambda m = 340 \text{ кДж.}$$

Совершенная при этом работа

$$A = \frac{Q_x}{\varepsilon} \approx 125 \text{ кДж.}$$

Нагреватель получает количество теплоты  $Q_H$

$$Q_H = Q_x + A \approx 465 \text{ кДж.}$$

Следовательно, в пар превратится масса воды

$$m_1 = \frac{Q_H}{r} \approx 0,2 \text{ кг.}$$

### **Задание 1.**

Восходящий от поверхности земли поток воздуха представляет собой своеобразный тепловой двигатель. Укажите в нем основные части, присущие любому тепловому двигателю.

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №4**

**Тема :** Расчет КПД цикла Карно.

**Цель :** Научиться делать расчеты КПД тепловой машины

**Оборудование:** Тепловая машина

**Справочный материал**

1. Круглов, Г. А. Основы теплотехники : учебное пособие для спо / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 208 с. —

ISBN 978-5-8114-6805-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/152638>

2. Замалеев, З. Х. Основы гидравлики и теплотехники : учебное пособие для спо / З. Х. Замалеев, В. Н. Посохин, В. М. Чефанов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 352 с. — ISBN 978-5-8114-6644-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151198>

3. Логинов, В. С. Основы теплотехники. Практикум : учебное пособие для спо / В. С. Логинов, В. Е. Юхнов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 128 с. — ISBN 978-5-8114-6672-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151217>

### **Дополнительные учебные издания**

4. Теплотехника : учебное пособие для СПО / составители В. А. Никитин. — Саратов : Профобразование, 2020. — 532 с. — ISBN 978-5-4488-0690-2. — Текст : электронный // Электронный ресурс цифровой образовательной среды СПО PROФобразование : [сайт]. — URL: <https://profspo.ru/books/91902>

### **Содержание работы**

Задача на цикл Карно №1 Условие Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, совершает за один цикл работу  $A = 73,5$  кДж. Температура нагревателя  $t_1 = 100^\circ \text{C}$ , температура холодильника  $t_2 = 0^\circ \text{C}$ . Найти КПД цикла, количество теплоты, получаемое машиной за один цикл от нагревателя, и количество теплоты, отдаваемое за один цикл холодильнику. Решение Рассчитаем КПД цикла: С другой стороны, чтобы найти количество теплоты, получаемое машиной, используем соотношение: Количество теплоты, отданное холодильнику, будет равно разности общего количества теплоты и полезной работы: Ответ: 0,36; 204,1 кДж; 130,6 кДж. Задача на цикл Карно №2 Условие Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, совершает за один цикл работу  $A = 2,94$  кДж и отдает за один цикл холодильнику количество теплоты  $Q_2 = 13,4$  кДж. Найти КПД цикла. Решение Формула для КПД цикла Карно: Здесь  $A$  – совершенная работа, а  $Q_1$  – количество теплоты, которое понадобилось, чтобы ее совершить. Количество теплоты, которое идеальная машина отдает холодильнику, равно разности двух этих величин. Зная это, найдем: Ответ: 17%. Задача на цикл Карно №3 Условие Изобразите цикл Карно на диаграмме и опишите его Решение Цикл Карно на диаграмме  $PV$  выглядит следующим образом: 1-2. Изотермическое расширение, рабочее тело получает от нагревателя количество теплоты  $q_1$ ; 2-3. Адиабатическое расширение, тепло не подводится; 3-4. Изотермическое сжатие, в ходе которого тепло передается холодильнику; 4-1. Адиабатическое сжатие.

### **Задание 1.**

Решите формулу КПД цикла Карно

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №5**

**Тема :** Расчет КПД поршневых двигателей внутреннего сгорания. Расчет КПД газотурбинных установок. Расчет КПД реактивных двигателей.

**Цель:** Исследование принципов работы и строения тепловых двигателей. Выяснить влияние тепловых двигателей на окружающую среду.

**Оборудование:** Тепловой двигатель

### **Справочный материал:**

1. Круглов, Г. А. Основы теплотехники : учебное пособие для спо / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 208 с. — ISBN 978-5-8114-6805-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/152638>
2. Замалеев, З. Х. Основы гидравлики и теплотехники : учебное пособие для спо / З. Х. Замалеев, В. Н. Посохин, В. М. Чефанов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 352 с. — ISBN 978-5-8114-6644-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151198>
3. Логинов, В. С. Основы теплотехники. Практикум : учебное пособие для спо / В. С. Логинов, В. Е. Юхнов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 128 с. — ISBN 978-5-8114-6672-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151217>

### **Дополнительные учебные издания**

4. Теплотехника : учебное пособие для СПО / составители В. А. Никитин. — Саратов : Профобразование, 2020. — 532 с. — ISBN 978-5-4488-0690-2. — Текст : электронный // Электронный ресурс цифровой образовательной среды СПО PROобразование : [сайт]. — URL: <https://profspo.ru/books/91902>

### **Содержание работы:**

Тепловые двигатели - необходимый атрибут современной цивилизации. Данная тема очень актуальна, так как прогресс человечества теснейшим образом связан с развитием энергетики, транспорта. Овладение новым источником энергии, открытие новых путей ее преобразования и использования — это целая эпоха в истории развития цивилизации.

Так, мощный расцвет промышленности в XIX в. был связан с изобретением первого теплового двигателя - паровой машины. Создание двигателя внутреннего сгорания послужило базой для развития автомобильного транспорта и самолетостроения. Газовая турбина буквально в последние четыре десятилетия вызвала переворот в авиации - замену тихоходных самолетов с поршневым двигателем реактивными и турбовинтовыми лайнерами, скорость которых



приближается к скорости звука, а в последнее время - и сверхзвуковыми. С помощью реактивных тепловых двигателей осуществлена вековая мечта человечества - выход в космическое пространство.

Отрицательное влияние тепловых машин на окружающую среду связано с действием разных факторов.

1. При сжигании топлива используется кислород атмосферного воздуха.
2. Сжигание топлива сопровождается выделением в атмосферу углекислого газа.
3. При сжигании угля и нефти атмосфера загрязняется азотными и серными загрязнениями в крупных городах и промышленных центрах соединениями, вредными для здоровья человека.

Повсеместное применение тепловых двигателей с целью получения удобной для использования энергии связано с воздействием на окружающую среду и здоровье человека. Согласно законам термодинамики производство электрической и механической энергии в принципе не может быть осуществлено без отвода в окружающую среду значительного количества теплоты, что должно привести к постепенному повышению средней температуры на Земле. Кроме того, температура может, угрожающе возрасти из-за увеличения в атмосфере количества парниковых газов, выделяющихся при сжигании топлива в больших масштабах. Тема актуальна, т.к. тепловой двигатель, является самыми распространённым видом двигателя на сегодняшний день.

#### **Гипотезы:**

1. Современное общество может обходиться без тепловых двигателей.
2. Тепловой двигатель не потерял своей актуальности из-за постоянного усовершенствования.
3. Тепловые двигатели необходимы в современном мире

#### **3. Тепловые двигатели виды и характеристики.**

Тепловыми двигателями называют машины, в которых внутренняя энергия топлива превращается в механическую энергию. Для этой цели энергия, выделяющаяся при сгорании топлива или при ядерных реакциях, передаётся путем теплообмена какому-либо газу. Расширяясь, газ производит работу против внешних сил, приводя в движение какой-либо механизм. Очевидно, что в тепловом двигателе газ не может беспредельно расширяться, ибо машина имеет конечные размеры. Следовательно, после расширения газ должен быть, затем сжат так, чтобы он сам и все детали машины пришли в первоначальное состояние. Реальные тепловые двигатели обычно работают по разомкнутому циклу, когда газ после расширения выбрасывается, а новая порция газа сжимается.

Основные типы тепловых двигателей:

- ☐ Двигатель Стирлинга
- ☐ Поршневой двигатель внешнего сгорания
- ☐ Поршневой двигатель внутреннего сгорания

**Двигатель Стирлинга** – тепловая машина, в которой рабочее тело, в виде газа или жидкости, движется в замкнутом объёме, разновидность двигателя внешнего сгорания. Основан на периодическом нагреве и охлаждении рабочего тела, с извлечением энергии из возникающего при этом изменения давления. Может работать не только от сжигания топлива, но и от любого источника тепла.

В XIX веке инженеры хотели создать безопасную замену паровым двигателям того времени, котлы которых часто взрывались из-за высоких давлений паров неподходящих материалов для их постройки. Хороший вариант появился с созданием двигателя Стирлинга, который мог преобразовывать в работу любую разницу температур. Основной принцип работы двигателя Стирлинга заключается в постоянно чередуемых нагревании и охлаждении рабочего тела в закрытом цилиндре. Обычно в роли рабочего тела выступает воздух, но также используются водород и гелий. В ряде опытных образцов испытывались фреоны, двуокись азота, сжиженный пропан-бутан и вода. В последнем случае вода остаётся в жидком состоянии на всех участках термодинамического цикла. Особенности «стирлинга» с жидким рабочим телом являются малые размеры, высокая удельная мощность и большие рабочие давления. Существует также «стирлинг» с двухфазным рабочим телом. Он тоже характеризуется высокой удельной мощностью, высоким рабочим давлением.

**Поршневой двигатель внешнего сгорания** - класс двигателей, где источник тепла или процесс сгорания топлива отделены от рабочего тела.

К этому классу относятся паровые машины, паровые турбины, двигатели Стирлинга, газовые турбины внешнего сгорания, а также другие типы двигателей.

**Поршневой двигатель внутреннего сгорания** –

разновидность теплового двигателя, в котором топливо сгорает непосредственно в рабочей камере (внутри) двигателя. Тем самым, топливная смесь и является рабочим телом таких двигателей. Такой двигатель является первичным, химическим, и преобразует энергию сгорания топлива в механическую работу. Название "двигатель внутреннего сгорания" в основном закрепилось за поршневыми и комбинированными двигателями, чаще всего указывая именно на эти семейства моторов.

**Двигатели внутреннего сгорания делятся -**

**По устройству:**

- ☐ Поршневые двигатели — камерой сгорания служит цилиндр, возвратно-поступательное движение поршня с помощью кривошипно-шатунного механизма преобразуется во вращение вала..
- ☐ Газотурбинные двигатели — преобразованию энергии газов служит ротор с лопатками специального профиля..
- ☐ Роторно-поршневые двигатели — камеру сгорания ограничивает треугольный ротор, выполняющий функцию поршня.
- ☐ Реактивные двигатели — развиваемая двигателем мощность сразу используется для поступательного движения ракеты или самолёта, дополнительное преобразование в крутящий момент и трансмиссия отсутствует (двигатель является движителем). Поэтому имеют наивысшие удельные мощностные показатели; являются единственными двигателями, способными выводить аппараты на орбиту.
- ☐ Турбореактивные двигатели — разновидность реактивных, в качестве окислителя использует атмосферный воздух, предварительно сжимаемый компрессорной частью. Ввиду этого может быть использован только на Земле. Обычно называют просто реактивными, например, "самолёт с реактивным

двигателем". Можно рассматривать турбореактивный двигатель и как разновидность газотурбинного, так как он имеет основные его части, кроме выходного вала.

□ Турбовинтовые двигатели — газотурбинный, работающий на винт. Применяются в авиации, на умеренных скоростях имеют более высокий КПД, чем турбореактивные.

#### **По другим критериям:**

□ по назначению — на транспортные (автомобильные, судовые, самолётные), стационарные и специальные.

□ по роду применяемого топлива — бензиновые и газовые двигатели, работающие на тяжёлом топливе дизеле.

□ по способу образования горючей смеси — внешнее (карбюраторные и инжекторные двигатели) и внутреннее (в цилиндре ДВС у дизелей и искровых с непосредственным впрыском).

□ по объёму рабочих полостей и весогабаритным характеристикам — лёгкие, средние, тяжёлые, специальные.

□ устройству систем охлаждения (воздушное, жидкостное), и другим.

Помимо приведённых выше общих для всех ДВС критериев классификации существуют критерии, по которым классифицируются отдельные типы двигателей. Так, поршневые двигатели можно классифицировать по количеству и расположению цилиндров, коленчатых и распределительных валов, по типу охлаждения, по наличию или отсутствию крейцкопфа, наддува (и по типу наддува), по способу смесеобразования и по типу зажигания, по количеству карбюраторов, по типу газораспределительного механизма, по направлению и частоте вращения коленчатого вала, по отношению диаметра цилиндра к ходу поршня, по степени быстроходности (средней скорости поршня).

Основной частью двигателя внутреннего сгорания является один или несколько цилиндров, внутри которых производится сжигание топлива. Отсюда и название двигателя.

Внутри цилиндра передвигается поршень. Поршень представляет собой полый, с одной стороны закрытый цилиндр, опоясанный пружинящими кольцами, вложенными в канавки на поршне (поршневые кольца). Назначение поршневых колец — не пропускать газы, образующиеся при сгорании топлива, в промежутки между поршнем и стенками цилиндра. Поршень снабжен металлическим стержнем («пальцем»), служащим для соединения поршня с шатуном. Шатун в свою очередь служит для передачи движения от поршня коленчатому валу.

Верхняя часть цилиндра сообщается с двумя каналами, закрытыми клапанами. Через один из каналов — впускной подается горючая смесь, через другой — выпускной выбрасываются продукты сгорания. Клапаны имеют вид тарелок, прижимаемых к отверстиям пружинами. Клапаны открываются при помощи кулачков, помещенных на кулачковом валу; при вращении вала кулачки поднимают клапаны посредством стальных стержней (толкателей). Кроме клапанов, в верхней части цилиндра помещается так называемая свеча. Это — приспособление

для зажигания смеси посредством электрической искры, получаемой от установленных на двигателе электрических приборов (магнето или бобины).

Работа двигателя состоит из четырех тактов:

I такт — всасывание. Открывается впускной клапан 1, и поршень 2, двигаясь вниз, засасывает в цилиндр горючую смесь из карбюратора.

II такт — сжатие. Впускной клапан закрывается, и поршень, двигаясь вверх, сжимает горючую смесь. Смесь при сжатии нагревается.

III такт — сгорание. Когда поршень достигает верхнего положения (при быстром ходе двигателя несколько раньше), смесь поджигается электрической искрой, даваемой свечой. Сила давления газов — раскаленных продуктов сгорания горючей смеси — толкает поршень вниз. Движение поршня передается коленчатому валу, и этим производится полезная работа. Производя работу и расширяясь, продукты сгорания охлаждаются и давление их падает. К концу рабочего хода давление в цилиндре падает почти до атмосферного.

IV такт — выпуск (выхлоп). Открывается выпускной клапан 3, и отработанные продукты горения выбрасываются сквозь глушитель в атмосферу.

Коэффициент полезного действия (КПД) теплового двигателя может быть определён как отношение полезной механической работы к затрачиваемому количеству теплоты, содержащейся в топливе. Остальная часть энергии выделяется в окружающую среду в виде тепла. КПД тепловой машины равен

$$\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} \times 100\%$$
, где  $Q_2 - Q_1$  — затраченное количество теплоты, Дж  $Q_2$  — полученное количество теплоты, Дж.

Тепловой двигатель не может иметь КПД больший, чем у цикла Карно (см. ниже), в котором количество теплоты передается от нагревателя с высокой температурой к холодильнику с низкой температурой. КПД идеальной тепловой машины Карно зависит исключительно от разности температур, причём в расчётах используется абсолютная термодинамическая температура. Следовательно, для паровых двигателей необходимы максимально высокая температура в начале цикла (достигаемая, например, с помощью пароперегрева) и как можно более низкая температура в конце цикла (например, с помощью конденсатора):

Паровой двигатель, выпускающий пар в атмосферу, будет иметь практический КПД (включая котёл) от 1 до 8 %, однако двигатель с конденсатором и расширением проточной части может улучшить КПД до 25 % и даже более.

Тепловая электростанция с пароперегревателем и регенеративным водоподогревом может достичь КПД 30 - 42 %. Парогазовые установки с комбинированным циклом, в которых энергия топлива вначале используется для привода газовой турбины, а затем для паровой турбины, могут достигать коэффициента полезного действия 50 - 60 %. На ТЭЦ эффективность повышается за счёт использования частично отработавшего пара для производственных нужд. При этом используется до 90 % энергии топлива и только 10 % рассеивается бесполезно в атмосфере.

Такие различия в эффективности происходят из-за особенностей термодинамического цикла паровых машин. Например, наибольшая отопительная нагрузка приходится на зимний период, поэтому КПД ТЭЦ зимой повышается. Одна из причин снижения КПД в том, что средняя температура пара в конденсаторе несколько выше, чем температура окружающей среды (образуется т.н. температурный напор). Средний температурный напор может быть уменьшен за счёт применения многоходовых конденсаторов. Повышает КПД также применение экономайзеров, регенеративных воздухоподогревателей и других средств оптимизации парового цикла.

У паровых машин очень важным свойством является то, что изотермическое расширение и сжатие происходят при постоянном давлении. Поэтому теплообменник может иметь любой размер, а перепад температур между рабочим телом и охладителем или нагревателем составляют чуть ли не 1 градус. В результате тепловые потери могут быть сведены к минимуму. Для сравнения, перепады температур между нагревателем или охладителем и рабочим телом в стирлингах может достигать 100°C.

### **КПД машины Карно**

Карно Никола Леонар Сади (1796-1832гг.) - талантливый французский инженер и физик, один из основателей термодинамики. В своем труде «Размышление о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» (1824 г.) впервые показал, что тепловые двигатели могут совершать работу лишь в процессе перехода теплоты от горячего тела к холодному. Карно придумал идеальную тепловую машину, вычислил коэффициент полезного действия идеальной машины и доказал, что этот коэффициент является максимально возможным для любого реального теплового двигателя.

Как вспомогательное средство для своих исследований Карно в 1824 году изобрёл (на бумаге) идеальную тепловую машину с идеальным газом в качестве рабочего тела. Важная роль двигателя Карно заключается не только в его возможном практическом применении, но и в том, что он позволяет объяснить принципы действия тепловых машин вообще; не менее важно и то, что Карно с помощью своего двигателя удалось внести существенный вклад в обоснование и осмысление второго начала термодинамики.

Все процессы в машине Карно рассматриваются как равновесные (обратимые).

**Обратимый процесс** – это такой процесс, который протекает настолько медленно, что его можно рассматривать как последовательный переход от одного равновесного состояния к другому и т. д., причём весь этот процесс можно провести в обратном направлении без изменения совершённой работы и переданного количества теплоты.

### **4. История создания и совершенствования тепловых двигателей.**

Первое известное устройство, приводимое в движение паром, было описано Героном Александрийским в первом столетии. Пар, выходящий по касательной из дюз, закреплённых на шаре, заставлял последний вращаться. Реальная паровая турбина была изобретена намного позже, в

средневековом Египте, турецким астрономом, физиком и инженером XVI века Такиюддиномаш-Шаами. Он предложил метод вращения вертела посредством потока пара, направляемого на лопасти, закреплённые по ободу колеса.

Паровая машина была создана испанским изобретателем Иеронимо Аяном де Бомонт, изобретения которого повлияли на патент англичанина Томаса Севери (см. ниже). Принцип действия и применение паровых машин были описаны также в 1665 году англичанином Эдвардом Сомерсетом; в 1663 году он опубликовал проект и установил приводимое в движение паром устройство для подъёма воды на стену Большой башни в замке Реглан (углубления в стене, где двигатель был установлен, были ещё заметны в XIX веке). Однако никто не был готов рисковать деньгами для этой новой революционной концепции, и паровая машина осталась неразработанной.

Одним из опытов французского физика и изобретателя Дени Папена было создание вакуума в закрытом цилиндре. В середине 1670-х годов в Париже он в сотрудничестве с голландским физиком Гюйгенсом работал над машиной, которая вытесняла воздух из цилиндра путём взрыва пороха в нём. Видя неполноту вакуума, создаваемого при этом, Папен после приезда в Англию в 1680 году создал вариант такого же цилиндра, в котором получил более полный вакуум с помощью кипящей воды, которая конденсировалась в цилиндре. Таким образом, он смог поднять груз, присоединённый к поршню верёвкой, перекинутой через шкив. Система работала только как демонстрационная модель: для повторения процесса весь аппарат должен был быть демонтирован и повторно собран. Папен быстро понял, что для автоматизации цикла пар должен быть произведён отдельно в котле. Поэтому Папен считается изобретателем парового котла, проложив таким образом путь к паровому двигателю Ньюкомена. Однако конструкцию действующей паровой машины он не предложил.

Ни одно из описанных устройств фактически не было применено как средство решения полезных задач. Первым применённым на производстве паровым двигателем была «пожарная установка», сконструированная английским военным инженером Томасом Севери в 1698 году. На своё устройство Севери в том же году получил патент. Это был паровой насос без поршня, и, очевидно, не слишком эффективный, так как тепло пара каждый раз терялось во время охлаждения контейнера, и довольно опасный в эксплуатации, так как вследствие высокого давления пара ёмкости и трубопроводы насоса иногда взрывались. Так как это устройство можно было использовать как для вращения колёс водяной мельницы, так и для откачки воды из шахт, изобретатель назвал его «другом рудокопа».

В 1712 году английский кузнец Томас Ньюкомен продемонстрировал свой «атмосферный (вакуумный) двигатель».

Первым применением двигателя Ньюкомена была откачка воды из глубокой шахты. В шахтном насосе коромысло было связано с тягой, которая спускалась в шахту к камере насоса. Возвратно-поступательные движения тяги передавались поршню насоса, который подавал воду вверх. Именно насос Ньюкомена стал первым паровым двигателем, получившим широкое практическое применение.

В 1763 году И. И. Ползуновым была спроектирована первая в России двухцилиндровая вакуумная паровая машина для приведения в действие воздухоудных мехов на барнаульских Колывано-Воскресенских заводах, которая была построена в 1764 году.

В 1765 году Джеймс Уатт, для повышения КПД вакуумного двигателя Ньюкомена, сделал отдельный конденсатор. Двигатель всё ещё оставался вакуумным. В 1781 году Джеймс Уатт запатентовал вакуумную паровую машину с кривошипно-шатунным механизмом, которая производила непрерывное вращательное движение вала (в отличие от поступательного движения в вакуумном двигателе водоподъёмного насоса Ньюкомена). Двигатель всё ещё оставался вакуумным, но вакуумный двигатель Уатта с кривошипно-шатунным механизмом, мощностью 10 лошадиных сил, стало возможным, при наличии каменного угля и воды, устанавливать и использовать в любом месте для любой цели. С вакуумным двигателем Уатта принято связывать начало промышленной революции в Англии. Примечательно, что первой известной автоматической системой управления была система регулирования скорости пара, установленная на паровом двигателе Уатта в 1775 году; почти век спустя Джеймс Клерк Максвелл описал первую математическую модель автоматизации.

В 1824 году французский инженер Сади Карно в своём сочинении «О движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» впервые описал цикл работы термодинамической системы, позже названный его именем. История же создания двигателя внутреннего сгорания отличалась годами, в которых она происходила. Тепловые двигатели с момента появления отличались большими габаритами и массой, обусловленными применением внешнего сгорания (требовались котлы, конденсаторы, испарители, теплообменники, тендеры, насосы, водяные резервуары и др.), в то же время основная (функциональная) часть паровой машины (поршень и цилиндр) сравнительно невелика. Поэтому мысль изобретателей всё время возвращалась к возможности совмещения топлива с рабочим телом двигателя, позволившего впоследствии значительно уменьшить габариты и вес, интенсифицировать процессы впуска и выпуска рабочего тела. Особенно важны эти отличия на транспорте.

В создание ДВС внесли наибольший вклад такие инженеры как Джон Барбер (изобретение газовой турбины в 1791), Роберт Стрит (патент на двигатель на жидком топливе, 1794 год), Филипп Лебон (открытие светильного газа в 1799, первый газовый двигатель в 1801), Франсуа Исаак де Риваз (первый поршневой двигатель, 1807), Жан Этьен Ленуар (газовый двигатель Ленуара, 1860), Николаус Отто (двигатель с искровым зажиганием и сжатием смеси в 1861 году, четырёхтактный двигатель в 1876-м), Рудольф Дизель (двигатель Дизеля на угольной пыли, 1897), Готлиб Даймлер и Вильгельм Майбах, Огнеслав Степанович Костович (бензиновый мотор с карбюратором, 1880-е), Густав Васильевич Тринклер (дизельные двигатели на жидком топливе, 1899), Вернер фон Браун (реактивные и турбореактивные двигатели, начиная с 1930-х и заканчивая Лунной программой), и другие. Таким образом, ДВС развивались с отставанием от паровых машин (так, паровой насос для откачки воды был изобретён Томасом

Севери в 1698 году), обусловленным отсутствием подходящего горючего. Сама идея ДВС была предложена Христианом Гюйгенсом ещё в 1678 году, в качестве топлива нидерландский учёный предлагал использовать порох. Англичанин Этьен Барбер пытался использовать для этого смесь воздуха с газом, полученным при нагреве древесины. Появление целой плеяды разнообразных мощных и лёгких двигателей позволило создать новые, не существовавшие ранее виды транспорта (винтовые и реактивные самолёты, вертолёт, ракета, космический корабль, газотурбоходы, суда на воздушной подушке), улучшить экономичность и экологичность корабельных силовых установок и локомотивов. Моторизация привела также к ускорению темпа жизни людей, возникновению целой автомобильной культуры (США); в военном деле дало возможность создать необычайно разрушительные машины смерти (танк, истребитель, бомбардировщик, ракеты с обычной и ядерной боеголовкой, подводные лодки с торпедами и другие).

### **5. Влияние тепловых двигателей на окружающую среду.**

Автомобили на сегодняшний день в России - главная причина загрязнения воздуха в городах. Сейчас в мире их насчитывается более полумиллиарда. В России автомобиль имеет каждый десятый житель, а в больших городах - каждый пятый. Выбросы от автомобилей в городах особенно опасны тем, что загрязняют воздух в основном на уровне 60-90 см. от поверхности земли и, особенно на участках автотрасс, где стоят светофоры. Автомобили выбрасывают в атмосферу диоксид и оксид углерода, оксиды азота, формальдегид, бензол, бензпирен, сажу (всего около 300 различных токсичных веществ). При истирании автомобильных шин об асфальт атмосфера загрязняется резиновой пылью, вредной для здоровья человека. Автомобиль расходует огромное количество кислорода. За неделю в среднем легковой автомобиль выжигает столько кислорода, сколько его четыре пассажира расходуют на дыхание в течение года. С ростом числа автомобилей уменьшается площадь, занятая растительностью, которая дает кислород и очищает атмосферу от пыли и газа, все больше места занимают площадки для парковок, гаражи и автомобильные дороги.

### **Экологические последствия работы тепловых двигателей**

Интенсивное использование тепловых машин на транспорте и в энергетике (тепловые и атомные электростанции) ощутимо влияет на биосферу Земли. Хотя о механизмах влияния жизнедеятельности человека на климат Земли идут научные споры, многие ученые отмечают факторы, благодаря которым может происходить такое влияние:

Парниковый эффект – повышение концентрации углекислого газа (продукт сгорания в нагревателях тепловых машин) в атмосфере. Углекислый газ пропускает видимое и ультрафиолетовое излучение Солнца, но поглощает инфракрасное излучение, идущее в космос от Земли. Это приводит к повышению температуры нижних слоев атмосферы, усилению ураганных ветров и глобальному таянию льдов.

Прямое влияние ядовитых выхлопных газов на живую природу (канцерогены, смог, кислотные дожди от побочных продуктов сгорания).



Разрушение озонового слоя при полетах самолетов и запусках ракет. Озон верхних слоев атмосферы защищает все живое на Земле от избыточного ультрафиолетового излучения Солнца.

Выход из создающегося экологического кризиса лежит в повышении КПД тепловых двигателей (КПД современных тепловых машин редко превышает 30%); использовании исправных двигателей и нейтрализаторов вредных выхлопных газов; использовании альтернативных источников энергии (солнечные батареи и обогреватели) и альтернативных средств транспорта (велосипеды и др.).

Тепловые двигатели играют важнейшую роль в жизни человечества. Они имеют широкое применение в хозяйственной, промышленной, военной сфере. Но кроме положительного эффекта от использования тепловых двигателей, имеется и отрицательный – загрязнение окружающей среды: повышение температуры атмосферы Земли, загрязнение земель сельскохозяйственного назначения, шумовые загрязнения, разлив нефти в воды мирового океана, выбросы канцерогенов. Люди стараются сделать как можно больше для сохранения природы: создают автомобили с полным сгоранием топлива и минимальным выбросом углекислого газа в атмосферу, а так же разрабатывают автомобили, в которых вместо бензиновых двигателей используется электродвигатель, питающийся от аккумулятора, или двигатель в котором в качестве топлива используется водород (а при сгорании водорода образуется вода).

Вступая в трудовую жизнь люди должны иметь четкое представление о том, что природные ресурсы не бесконечны и технология любой продукции должна удовлетворять такому основному, с экологической точки зрения, требованию, как минимальное потребление материалов и энергии. Они хорошо должны знать законы природы, понимать взаимосвязь природных явлений, уметь предвидеть и оценивать последствия вмешательства в естественное течение процессов. У них должно быть сознание приоритетности решения экологических проблем при осуществлении любых проектов, создании машин и механизмов, при всяком хозяйственном начинании, а также твердое убеждение в том, что без уверенности в безвредности для окружающей среды того или иного мероприятия оно не должно реализоваться.

### **Заключение.**

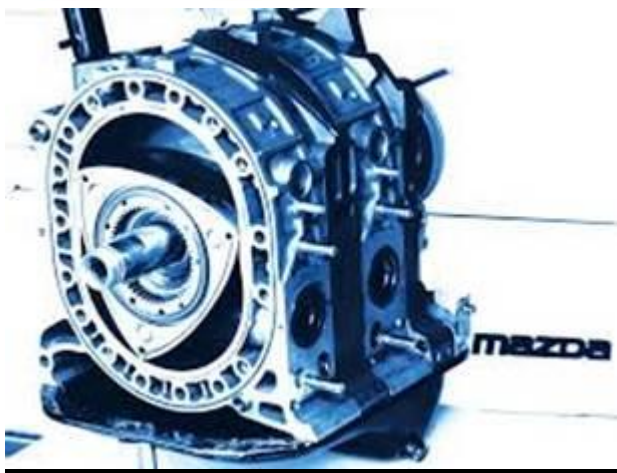
Тепловые двигатели играют важнейшую роль в жизни человечества. Они имеют широкое применение в хозяйственной, промышленной, военной сфере. Но кроме положительного эффекта от использования тепловых двигателей, имеется и отрицательный – загрязнение окружающей среды: повышение температуры атмосферы Земли, загрязнение земель сельскохозяйственного назначения, шумовые загрязнения, разлив нефти в воды мирового океана, выбросы канцерогенов. Люди стараются сделать как можно больше для сохранения природы: создают автомобили с полным сгоранием топлива и минимальным выбросом углекислого газа в атмосферу, а так же разрабатывают автомобили, в которых вместо бензиновых двигателей используется электродвигатель, питающийся от аккумулятора, или двигатель в котором в качестве топлива используется водород (а при сгорании водорода образуется вода).



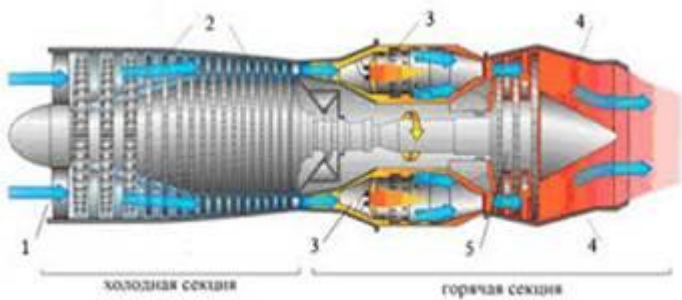
Приложение 1.



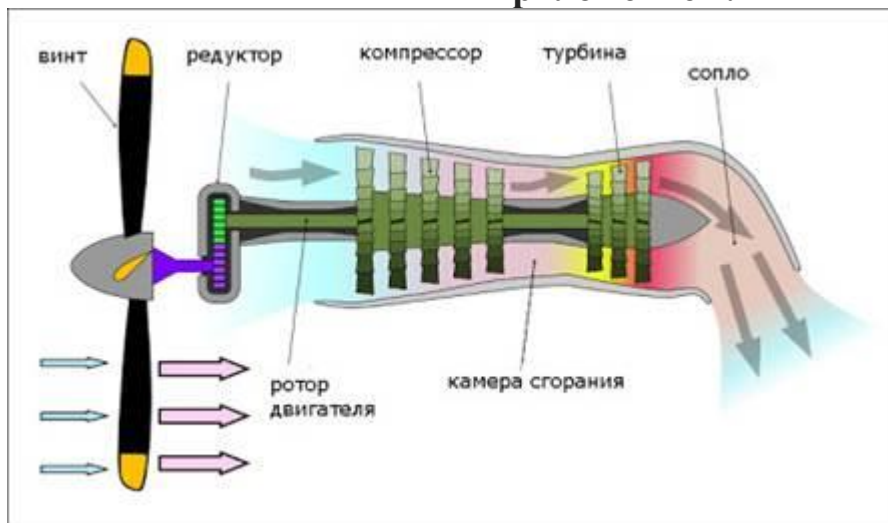
Приложение 2.



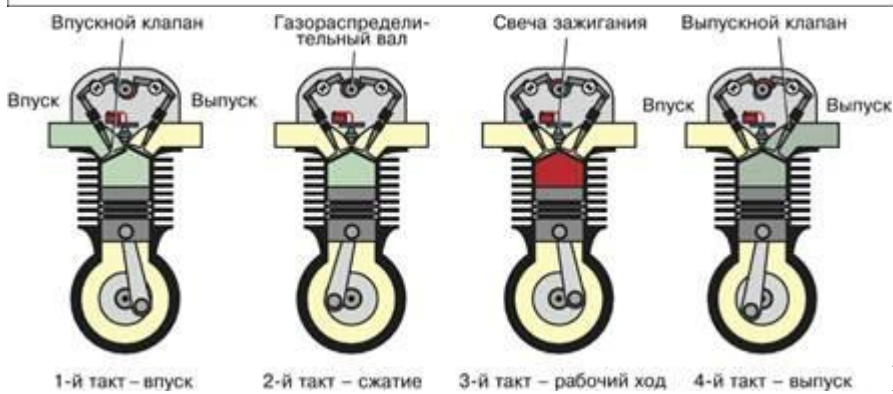
Приложение 3.



Приложение 4.



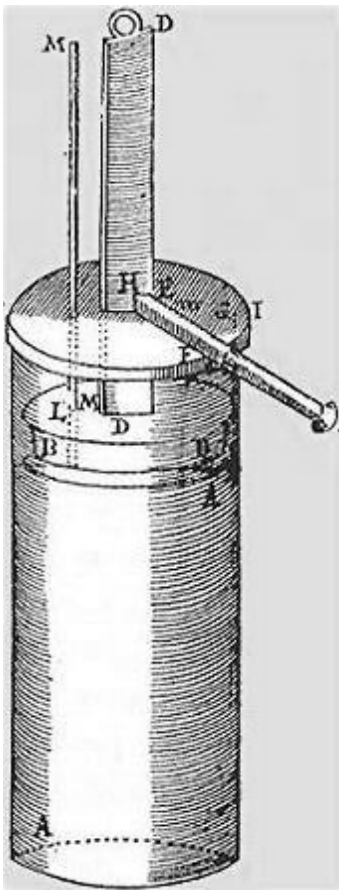
Приложение 5.



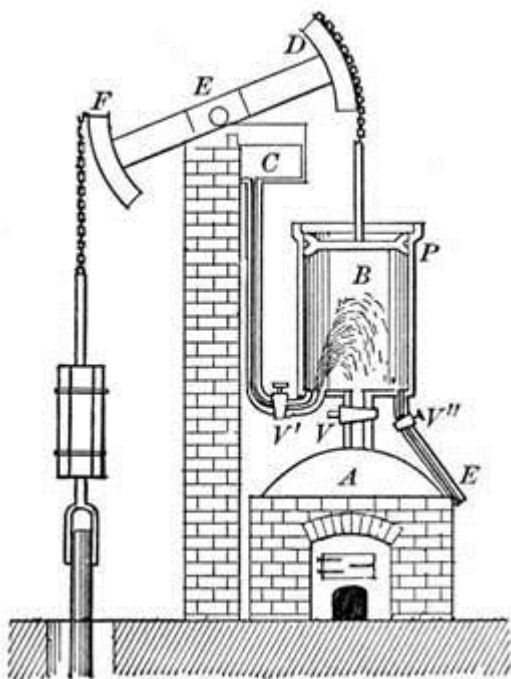
Приложение 6.



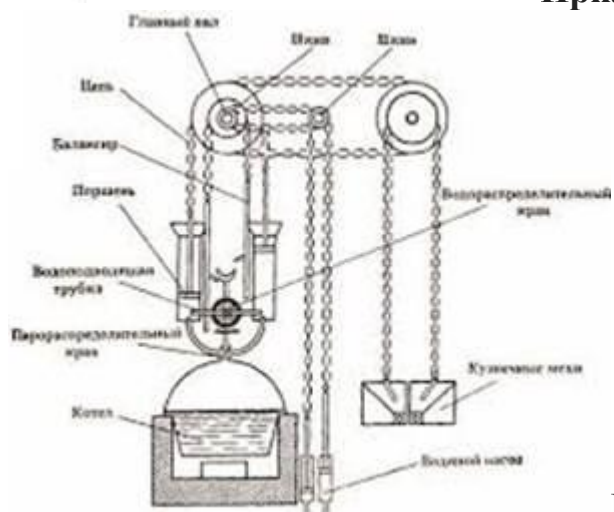
Приложение 7.



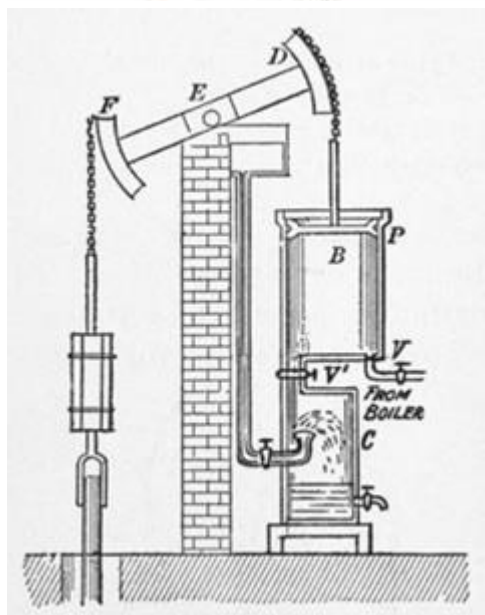
Приложение 8.



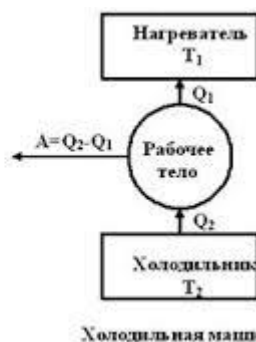
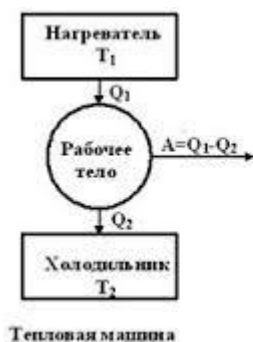
Приложение 9.



Приложение 10.



Приложение 11.



## Приложение 12.

7

### Задание 1.

Каковы сферы применения тепловых двигателей?

Влияет ли работа тепловых двигателей на окружающую среду?

Какую роль играют тепловые двигатели в современном мире?

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №6

**Тема :** Расчет КПД паровых теплосиловых установок.

**Цель:** Научиться проводить расчет КПД паровых и теплосиловых установок

**Оборудование:** Паровая установка

### Справочный материал

1. Круглов, Г. А. Основы теплотехники : учебное пособие для спо / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 208 с. — ISBN 978-5-8114-6805-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/152638>

2. Замалеев, З. Х. Основы гидравлики и теплотехники : учебное пособие для спо / З. Х. Замалеев, В. Н. Посохин, В. М. Чефанов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 352 с. — ISBN 978-5-8114-6644-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151198>

3. Логинов, В. С. Основы теплотехники. Практикум : учебное пособие для спо / В. С. Логинов, В. Е. Юхнов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 128 с. — ISBN 978-5-8114-6672-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151217>

### Дополнительные учебные издания



4. Теплотехника : учебное пособие для СПО / составители В. А. Никитин. — Саратов : Профобразование, 2020. — 532 с. — ISBN 978-5-4488-0690-2. — Текст : электронный // Электронный ресурс цифровой образовательной среды СПО ПРОФобразование : [сайт]. — URL: <https://profspo.ru/books/91902>

### Содержание работы:

Исходными данными для простейшего теплового расчета являются: расход одного из теплоносителей и температуры обоих теплоносителей на входе и на выходе из аппарата. Расчет поверхности теплообмена состоит из следующих основных стадий:

1. Определение тепловой нагрузки аппарата, средней движущей силы и средних температур теплоносителей.
  2. Определение расхода второго вещества из теплового баланса.
  3. Определение ориентировочной площади поверхности теплообмена, а также выбор размеров теплообменных труб и, если возможно, расчет необходимого их количества при обеспечении заданного режима движения теплоносителей.
  4. Предварительный выбор нормализованного теплообменника по принятым параметрам. Выписываются те фиксированные геометрические размеры аппарата, которые будут фигурировать в расчете (внутренний диаметр кожуха, число теплообменных труб и т.д.). Параметры, которые не будут непосредственно участвовать в расчете, можно варьировать для обеспечения расчетной поверхности теплообмена при окончательном выборе нормализованного аппарата.
  5. Определение частных коэффициентов теплоотдачи для обоих теплоносителей с использованием критериальных уравнений для соответствующих тепловых процессов, режимов теплоносителей, геометрического расположения труб и т.д. Определение термических сопротивлений стенок и загрязнений со стороны горячего и холодного теплоносителей.
  6. Определение общего коэффициента теплопередачи и уточнение температур стенки со стороны горячего и холодного теплоносителей. Пересчет коэффициента теплопередачи.
  7. Определение расчетной поверхности теплообмена по основному уравнению теплопередачи и окончательный выбор нормализованного теплообменника.
- Определение запаса поверхности теплообмена, необходимого для обеспечения длительной работы аппарата, так как на поверхности труб и кожуха образуются разного вида загрязнения (отложение нерастворимых осадков, накипеобразование, ржавчина и т.д.), которые снижают эффективность процесса теплообмена, уменьшая коэффициент теплопередачи.

точноаем критерий Рейнольдса:

$$Re = 10000 \cdot \left( \frac{n'_1}{n_1} \right) = 10000 \cdot \left( \frac{152}{465} \right) = 3267$$

Получаем переходной режим течения жидкости в трубках,  $10000 > Re > 2320$  при  $t_{2cp} = 19^\circ\text{C}$  находим в справочнике значение критерия Прандтля для воды  $Pr_2 = 5,45$

Рассчитываем критерий Нуссельта:

$$Nu_2 = 0,008 \cdot Re_2^{0,9} \cdot Pr_2^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr_2}{Pr_{2\Gamma}} \right)^{0,25} = 0,008 \cdot 3267^{0,9} \cdot 5,45^{0,43} \cdot (1,05)^{0,25} = 24,2$$

Коэффициент теплоотдачи к нагреваемой воде:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \cdot \lambda_2}{d_2} = \frac{24,2 \cdot 0,612 \text{ Вт}}{0,021 \text{ м} \cdot \text{К}} = 705 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Выписываем недостающие физические свойства воздуха при температуре

$t_{\text{лср}} = 225^\circ\text{C}$  из Приложения 3:

$\lambda_1 = 4,1 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

$Pr_1 = 0,679$ ;

$\nu_1 = 37,73 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

$\rho_2 = 0,71 \text{ м}^3/\text{сек}$ .

Объемный расход воздуха:

$$V_1 = G_1 / \rho_1 = 4,167 / 0,71 = 5,87 \text{ м}^3 / \text{сек}$$

Скорость течения воздуха в межтрубном пространстве:

$$w_1 = \frac{V_1}{D} = \frac{5,87}{0,8} = 7,33 \text{ м} / \text{сек}$$

Число Рейнольдса:

$$Re_1 = \frac{w_1 \cdot D}{\nu_1} = \frac{7,33 \cdot 0,8}{37,73 \cdot 10^{-6}} = 155,420$$

Критерий Нуссельта для шахматных пучков при  $Re > 1000$  вычисляем по формуле:

$$Nu_{1\phi} = 0,4 \cdot \epsilon \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,36} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{\Gamma}} \right)^{0,25};$$

$\epsilon_{\phi} = 0,6$

$$Nu_1 = 0,4 \cdot 0,6 \cdot 155,420^{0,6} \cdot 0,679^{0,36} \cdot (1)^{0,25} = 272$$

Коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенке трубы:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{D_{\text{экв}}} = \frac{272 \cdot 4,1 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}}{0,32 \text{ м} \cdot \text{К}} = 36,85 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}},$$

где  $D_{\text{экв}}$  – эквивалентный диаметр межтрубного пространства, м

### Определение коэффициента теплопередачи

Коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + R + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где  $R$  – термическое сопротивление теплопроводности загрязнений наружных и внутренних поверхностей трубок и термическое сопротивление теплопроводности материала трубок, принимаем, согласно методических указаний,  $1/R = 2580$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{36,85} + \frac{1}{2580} + \frac{1}{705}} = 34,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Расчетная площадь поверхности теплообмена:

$$F_p = \frac{Q}{k \cdot \Delta t} = \frac{1505000}{34,6 \cdot 149} = 292 \text{ м}^2$$

Запас поверхности нагрева:

$$3 = \frac{F - F_p}{F} = \frac{329 - 292}{292} = 12,7\%$$

### Задание 1.

Рассчитать и выбрать кожухотрубчатый нагреватель для охлаждения 15000 кг/ч воздуха от



$t_1' = 400^\circ\text{C}$  до  $t_1'' = 50^\circ\text{C}$  при давлении  $P = 2,2 \cdot 10^5$  Па

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №7**

**Тема:** Расчет теплоотдачи при омывании плоской поверхности. Расчет процесса теплоотдачи при движении жидкости в трубах

**Цель:** связать теорию с практикой – подтвердить теорию опытом;  
привить навыки научно-исследовательской работы;  
проверить уровень понимания вопросов, пройденных на уроках теоретического обучения.

**Оборудование:** Установка TOT–TVT

### **Справочный материал**

1. Круглов, Г. А. Основы теплотехники : учебное пособие для СПО / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 208 с. — ISBN 978-5-8114-6805-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/152638>
2. Замалеев, З. Х. Основы гидравлики и теплотехники : учебное пособие для СПО / З. Х. Замалеев, В. Н. Посохин, В. М. Чефанов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 352 с. — ISBN 978-5-8114-6644-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151198>
3. Логинов, В. С. Основы теплотехники. Практикум : учебное пособие для СПО / В. С. Логинов, В. Е. Юхнов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 128 с. — ISBN 978-5-8114-6672-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151217>

### **Дополнительные учебные издания**

4. Теплотехника : учебное пособие для СПО / составители В. А. Никитин. — Саратов : Профобразование, 2020. — 532 с. — ISBN 978-5-4488-0690-2. — Текст : электронный // Электронный ресурс цифровой образовательной среды СПО ПРОФобразование : [сайт]. — URL: <https://profspo.ru/books/91902>

### **Содержание работы:**

Холодный теплоноситель движется по кольцевому каналу межтрубного пространства теплообменного аппарата диаметром 7/8 дюйма. Движение горячего теплоносителя организовано всегда в одном направлении (слева направо).

Движение холодного теплоносителя можно организовать в двух направлениях: — слева направо при прямотоке; — справа налево при противотоке. Объемные расходы горячего и холодного теплоносителей устанавливают с помощью счетчиков, расположенных на стенде. На каждой из этих панелей имеются 2 расходомера с диапазоном измерения до 20 м<sup>3</sup>/ч и 500 м<sup>3</sup>/ч. В теплообменном аппарате устанавливают температуру горячего теплоносителя до 60<sup>0</sup>С. При этом температуры на выходе из теплообменного аппарата горячего и холодного теплоносителей необходимо измерить.

Понятие оптимизации предполагает получение наилучших результатов в заданных условиях. Применительно к оптимизации теплообменных устройств в качестве технологических параметров системы рассматриваются:

- линейные скорости потоков в трубном и межтрубном пространствах;
- коэффициенты теплообмена;
- разность температур между рабочими средами;
- тепловая нагрузка теплообменного аппарата.

К параметрам технологических режимов относят - массовые расходы потоков, а также входные и выходные температуры потоков. В качестве варьируемых параметров рассматриваются - массовый расход холодного потока, конечные температуры потоков и количество теплоты, передаваемой в теплообменный аппарат.

### **Порядок проведения эксперимента**

1. Распаковать лабораторную установку.
2. Разместить установку на лабораторном столе.

Извлечь из бака холодного теплоносителя все упаковочные материалы, извлечь заправочное устройство и шланги слива.

Разместить бак холодного теплоносителя под столом.

Подключить насосы на крышке бака холодного теплоносителя к клеммам тумблера на задней панели и в процессе выполнения экспериментов определить направление движения теплоносителя.

Тумблер в крайних положениях запускает соответствующий насос, в среднем положении насосы выключены.

Подключить шланги бака холодного теплоносителя к штуцерам подвода холодного теплоносителя плотно вставив шланги в разъем.

Заполнить бак холодного теплоносителя полностью, чтобы турбины насосов были погружены в жидкость.

Залить систему горячего теплоносителя дистиллированной водой. Большую часть воды рекомендуется залить через сливное отверстие 2, с помощью шланга и воронки, поднятых выше уровня магистрали счетчика. Уровень залитой воды должен быть выше магистрали счетчика, такой способ позволит избавиться от излишков воздуха при заливке. При этом клапан сброса воздуха должен быть выкручен.

Уровень воды поддерживать перед каждой лабораторной работой выше магистрали счетчика на 5-10 см. Теплоноситель следует подливать с помощью заливочного устройства

Освободить от хомутов два шнура на задней панели (шнур 220В – белый провод, сигнальный шнур – черный провод).

Подключить сетевой шнур 220В к розетке. Заземление в розетке ОБЯЗАТЕЛЬНО!  
Подключить сигнальный провод к соответствующему разъему на системе измерения.

Подключить блок питания насосов холодного теплоносителя в розетку на коробе на задней стороне панели.

Включите подачу питания стенда автоматическим выключателем.

Включить циркуляционный насос кнопкой ВК2.

Включить нагреватель кнопкой ВК1 с помощью продольных клавиш на нагревателе выставить темп нагрева самый минимальный (одно деление на шкале).

Если счетчик расхода теплоносителя не вращается, следовательно клапан нагревателя закрыт, для усиления давления в системе требуется выставить регулятор насоса горячего теплоносителя в режим 3.

Если дисплей нагревателя не загорается, требуется проконтролировать уровень воды в системе, он должен быть строго вышел магистрали счетчика.

Перезапустить насос и нагреватель после доливки.

Режимы работы задавать строго по методическим указаниям.

Подключиться к измерительной системе по беспроводной связи.

Запустить программу проведения испытаний (Пуск → MeasLAB → «Испытания теплообменников»).

### **Задание 1.**

Определение коэффициентов теплоотдачи в рекуперативных теплообменниках при прямоточной и противоточной схемах движения теплоносителя.

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №8**

**Тема:** Определение коэффициента теплоотдачи при течении жидкости в горизонтальной стальной трубе

**Цель:** Экспериментальное определение коэффициента теплопередачи от "горячего" теплоносителя к "холодному" и сравнение его с расчётной величиной при двух схемах движения теплоносителей: прямоточной и противоточной.

**Оборудование:** Установка TOT–TVT

### **Справочный материал**

1. Круглов, Г. А. Основы теплотехники : учебное пособие для спо / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 208 с. — ISBN 978-5-8114-6805-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/152638>

2. Замалеев, З. Х. Основы гидравлики и теплотехники : учебное пособие для спо /  
3. Замалеев, В. Н. Посохин, В. М. Чефанов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. —

352 с. — ISBN 978-5-8114-6644-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151198>

3. Логинов, В. С. Основы теплотехники. Практикум : учебное пособие для СПО / В. С. Логинов, В. Е. Юхнов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 128 с. — ISBN 978-5-8114-6672-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151217>

### Дополнительные учебные издания

4. Теплотехника : учебное пособие для СПО / составители В. А. Никитин. — Саратов : Профобразование, 2020. — 532 с. — ISBN 978-5-4488-0690-2. — Текст : электронный // Электронный ресурс цифровой образовательной среды СПО PROФобразование : [сайт]. — URL: <https://profspo.ru/books/91902>

### Содержание работы:

Включили установку в сеть. Тумблером «сеть» включили питание установки. При всех открытых вентилях проверили заполнение водой водоподогревателя и радиатора. Расширительные бачки заполнены на половину. Включили тумблер «насос нагревателя». Вентилем отрегулировали необходимый расход воды во внутренней трубе рабочего участка. Для установки режима «прямоток» во внешней трубе рабочего участка закрыли вентили  $K1$ ,  $K4$  и открыли вентили  $K2$ ,  $K3$ . Тумблером «насос холодильника» включили насос радиатора (холодильника). Включая и выключая насос радиатора тумблером «насос холодильника» достигли равномерного вращения «турбинки» расходомера  $11$ , свидетельствующего о непрерывном потоке воды во внешней трубе рабочего участка. Вентилем  $K3$  отрегулировали необходимый расход воды во внешней трубе рабочего участка в режиме «прямоток». Для установки режима «противоток» во внешней трубе рабочего участка закрыли вентили  $K2$ ,  $K3$  и открыли вентили  $K1$ ,  $K4$ . Вентилем  $K4$  отрегулировали необходимый расход воды во внешней трубе рабочего участка в режиме «противоток». После установки нужного режима течения воды во внешней трубе рабочего участка и требуемых расходов ( $15-20 \text{ см}^3$ ) в секунду (по паспорту расходомера), включили водоподогреватель 2 тумблером «нагрев». Включили измеритель температуры тумблером. Включили вентилятор холодильника тумблером  $18$  «вентилятор холодильника». При достижении температуры на входе во внутреннюю трубу  $t_1 = 45-50^\circ\text{C}$  произвели отсчёт температур  $t_1, t_2, t_3, t_4$  с помощью переключателя термпар  $19$ . Включили секундомер и произвели отсчёт показаний расходомеров. Выключили секундомер и произвели отсчёт показаний расходомеров. При этом определили промежуток времени за который через сечения труб прошли соответствующие объёмы воды. Время эксперимента 15 минут.

### Задание 1.

Вычислить чему равен средний температурный напор

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №9**

**Тема:** Расчет параметров однослойной и многослойной тепловой изоляции.

**Цель:** Изучить основные виды теплоизоляционных материалов и область их применения.

**Оборудование:** Образцы теплоизоляционных материалов;  
Справочники по строительным материалам и изделиям

### **Справочный материал**

1. Круглов, Г. А. Основы теплотехники : учебное пособие для спо / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 208 с. — ISBN 978-5-8114-6805-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/152638>
2. Замалеев, З. Х. Основы гидравлики и теплотехники : учебное пособие для спо / З. Х. Замалеев, В. Н. Посохин, В. М. Чефанов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 352 с. — ISBN 978-5-8114-6644-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151198>
3. Логинов, В. С. Основы теплотехники. Практикум : учебное пособие для спо / В. С. Логинов, В. Е. Юхнов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 128 с. — ISBN 978-5-8114-6672-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151217>

### **Дополнительные учебные издания**

4. Теплотехника : учебное пособие для СПО / составители В. А. Никитин. — Саратов : Профобразование, 2020. — 532 с. — ISBN 978-5-4488-0690-2. — Текст : электронный // Электронный ресурс цифровой образовательной среды СПО PROФобразование : [сайт]. — URL: <https://profspo.ru/books/91902>

### **Содержание работы:**

**Теплоизоляционными называют строительные материалы** и изделия, предназначенные для тепловой изоляции конструкций зданий и сооружений, а также различных технических применений. Основной особенностью теплоизоляционных материалов является их высокая пористость и, следовательно, малая средняя плотность и низкая теплопроводность.

Применение теплоизоляционных материалов в строительстве позволяет снизить массу конструкций, уменьшить потребление конструкционных строительных материалов (бетон, кирпич, древесина и др.). Теплоизоляционные материалы существенно улучшают комфорт в жилых помещениях. Важнейшей целью теплоизоляции строительных конструкций является сокращение расхода энергии на отопление здания.

Основной путь снижения энергозатрат на отопление зданий лежит в повышении термического сопротивления ограждающих конструкций с помощью теплоизоляционных материалов (ТИМ). С 2000 года нормативные требования по расчётному сопротивлению теплопередачи ограждающих конструкций в России увеличены в среднем в 3,5 раза и практически сравнялись с аналогичными нормативами в Финляндии, Швеции, Норвегии, Северной Канаде, других северных странах. Соответственно выросло значение (ТИМ).

### 1.1 Основные технические характеристики.

Свойства теплоизоляционных материалов применительно к строительству характеризуются следующими основными параметрами.

Важнейшей технической характеристикой ТИМ является **теплопроводность** - способность материала передавать теплоту сквозь свою толщу, так как именно от нее напрямую зависит термическое сопротивление ограждающей конструкции.

Количественно определяется **коэффициентом теплопроводности  $\lambda$** , выражающим количество тепла, проходящее через образец материала толщиной 1 м и площадью 1 м<sup>2</sup> при разности температур на противоположащих поверхностях 1°С за 1 ч.

Коэффициент теплопроводности в справочной и нормативной документации имеет размерность Вт/(м·°С).

На величину теплопроводности теплоизоляционных материалов оказывают влияние плотность материала, вид, размеры и расположение пор (пустот) и т.д.

Сильное влияние на теплопроводность оказывает также температура материала и, особенно, его влажность.

**Плотность** - отношение массы сухого материала к его объему, определенному при заданной нагрузке (кг/м<sup>3</sup>).

**Прочность на сжатие** - это величина нагрузки (КПа), вызывающей изменение толщины изделия на 10%.

**Сжимаемость** - способность материала изменять толщину под действием заданного давления. Сжимаемость характеризуется относительной деформацией материала под действием нагрузки 2 КПа.

**Водопоглощение** - способность материала впитывать и удерживать в порах (пустотах) влагу при непосредственном контакте с водой. Водопоглощение теплоизоляционных материалов характеризуется количеством воды, которое впитывает сухой материал при выдерживании в воде, отнесенным к массе или объему сухого материала.

**Сорбционная влажность** - равновесная гигроскопическая влажность материала при определенных условиях в течение заданного времени. С повышением влажности теплоизоляционных материалов повышается их теплопроводность.

**Морозостойкость** - способность материала в насыщенном влагой состоянии выдерживать многократное попеременное замораживание и оттаивание без

признаков разрушения. От этого показателя существенно зависит долговечность всей конструкции, однако, данные по морозостойкости не приводятся в ГОСТ или ТУ.

**Паропроницаемость** - способность материала обеспечивать диффузионный перенос водяного пара.

**Воздухопроницаемость.** Теплоизолирующие свойства тем выше, чем ниже воздухопроницаемость ТИМ. Мягкие изоляционные материалы настолько хорошо пропускают воздух, что движение воздуха приходится предотвращать путем применения специальной ветрозащиты. Жесткие изделия, в свою очередь, обладают хорошей воздухо непроницаемостью и не нуждаются в каких-либо специальных мерах. Они сами могут применяться в качестве ветрозащиты.

**Огнестойкость** - способность материала выдерживать воздействие высоких температур без воспламенения, нарушения структуры, прочности и других его свойств.

**По группе горючести** теплоизоляционные материалы подразделяют на горючие и негорючие. Это является одним из важнейших критериев выбора теплоизоляционного материала.

## 1.2 Общие принципы устройства теплоизоляции.

- Теплоизоляция строительных конструкций должна быть запроектирована так, чтобы выполнять возложенные на нее функции в течение всего жизненного цикла конструкции.
- В проекте должны быть описаны способы укладки и защиты теплоизоляционных материалов для обеспечения заданной теплопроводности. Изоляционный материал должен заполнять весь предусмотренный проектом объем и выдерживать нагрузки, возникающие как при укладке, так и в процессе эксплуатации. При необходимости проект должен содержать описание способов заполнения стыковочных швов.
- Слой теплоизоляционного материала с подветренной стороны здания необходимо защищать от ветра. Ветрозащитный слой должен покрывать весь изоляционный материал и быть настолько плотным, чтобы препятствовать проникновению в строительные конструкции или сквозь них воздушных потоков, существенно снижающих изоляционные свойства материала. Особое внимание следует обратить на места соединения наружных стен и стен фундамента, наружных стен и чердачных перекрытий, на углы наружных стен и коробки проемов.
- Если в многослойной ограждающей конструкции паропроницаемость слоёв уменьшается по мере движения от тёплой стороны к холодной, существует опасность накопления внутри конструкции конденсирующейся влаги. Для минимизации этого эффекта на теплой стороне ограждения устраивают специальный пароизоляционный барьер, паропроницаемость которого не менее чем в несколько раз выше, чем у наружных слоёв. Швы и соединения пароизоляционного барьера должны быть загерметизированы.
- Ограждающая конструкция должна быть спроектирована так, чтобы создать как можно более благоприятные условия для свободного выхода за её пределы паров неизбежно проникающей в неё влаги. При необходимости защиты

теплоизоляционных материалов от ветра или атмосферной влаги целесообразно использовать специальные "дышащие" мембраны, прозрачные для выхода водяных паров.

- Исследования показали, что многие негативные явления, возникающие в многослойных ограждающих конструкциях (плесень, гниль, формальдегид, радон и др.), как правило, связаны с сыростью. Залог надёжной работы ограждающей конструкции - учёт на стадии проектировании всего комплекса вопросов тепломассопереноса.

### **Задание 1.**

Что дает использование теплоизоляционных материалов в строительстве?

Какой показатель используется в качестве марки теплоизоляционных материалов?

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №10**

**Тема:** Расчет параметров однослойной и многослойной тепловой изоляции.

**Цель:** Изучить основные виды теплоизоляционных материалов и область их применения.

**Оборудование:** Образцы теплоизоляционных материалов;  
Справочники по строительным материалам и изделиям

### **Справочный материал**

1. Круглов, Г. А. Основы теплотехники : учебное пособие для спо / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 208 с. — ISBN 978-5-8114-6805-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/152638>

2. Замалеев, З. Х. Основы гидравлики и теплотехники : учебное пособие для спо / З. Х. Замалеев, В. Н. Посохин, В. М. Чефанов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 352 с. — ISBN 978-5-8114-6644-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151198>

3. Логинов, В. С. Основы теплотехники. Практикум : учебное пособие для спо / В. С. Логинов, В. Е. Юхнов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 128 с. — ISBN 978-5-8114-6672-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151217>

### **Дополнительные учебные издания**



4. Теплотехника : учебное пособие для СПО / составители В. А. Никитин. — Саратов : Профобразование, 2020. — 532 с. — ISBN 978-5-4488-0690-2. — Текст : электронный // Электронный ресурс цифровой образовательной среды СПО PROФобразование : [сайт]. — URL: <https://profspo.ru/books/91902>

## **Содержание работы:**

### **Минеральная вата и изделия из нее.**

Минераловатные теплоизоляционные изделия являются наиболее распространёнными. По некоторым данным их доля в среди всех применяемых ТИМ составляет около 80%.

**Минеральная вата** представляет собой тонкие и гибкие волокна, полученные при охлаждении предварительно раздробленного в капли и вытянутого в нити минерального расплава.

В зависимости от вида сырья минеральная вата делится на **каменную и шлаковую**. Сырьем для производства каменной ваты служат горные породы - диабаз, базальт, известняк, доломит, и др. Шлаковую вату получают из шлаков чёрной и цветной металлургии.

Ведущие мировые производители в качестве сырья используют исключительно горные породы, что позволяет получать минеральную вату высокого качества с длительным сроком эксплуатации. Именно её рекомендуется применять для ответственных конструкций - в случае, когда требуется их многолетняя надежная работа.

### **Целлюлозный материал—ЭКОВАТА.**

**Эковата** - уникальный по своим свойствам, экологически чистый и недорогой, изоляционный материал, который свыше 50 лет с неизменным успехом используется в передовых странах мира. Это очень рыхлый, легкий изоляционный материал на основе вторично переработанной целлюлозы с добавлением антипиренов и антисептиков. В качестве добавок выступают природные борсодержащие соли-минералы - тетраборат натрия и кристаллическая борная кислота.

### **О свойствах Эковаты.**

**Эковата** достойная альтернатива широко распространенным минеральным волокнистым утеплителям.

- Эковата характеризуется высокими параметрами пожарной безопасности как слабогорючий, трудновоспламеняемый, с малой дымообразующей способностью — (индексы Г1, В1, Д1).
- Почему в деревянном доме дышится легко? Воздухообмену способствует структура древесины, которая легко переносит колебания влажности воздуха. Поведение Эковаты абсолютно идентично поведению древесины, поэтому в домах, утепленных эковатой, дышится также легко и приятно. Это объясняется полым строением структуры волокон целлюлозы. Будучи капиллярами, они вбирают влагу внутрь себя и передают ее дальше, другим капиллярам. Аналогично работают детские подгузники. Поэтому зданиям, утепленным эковатой,

пароизоляция не обязательна, поскольку эковате свойственна естественная регуляция влажности.

- Благодаря малой воздухопроницаемости Эковата обладает отличной теплоизолирующей способностью. Причина кроется в волокнах, которые эффективно замедляют движение воздуха.
- Отсутствие усадки. Испытания, проведенные на вертикальном вибростенде, показали, что воздействия вибрации на минвату и эковату дают два совершенно противоположных результата. Минвата дает усадку, а эковата, наоборот, увеличивается в объеме. Это объясняется эластичностью и упругостью целлюлозных волокон по сравнению с хрупкостью минераловатных, которые под воздействием нагрузок ломаются и осыпаются, приводя ее к усадке.
- Сертификационные испытания подтвердили высокие звукопоглощающие свойства эковаты, позволяющие отнести ее к 1-му классу звукопоглощения (класс НСВ-111). Поэтому зданию, утепленному эковатой присущи великолепные звукоизолирующие свойства.
- Борные соединения, входящие в состав эковаты обеспечивают надежную биологическую стойкость и исключают появление грибков, плесени, насекомых и грызунов.
- Эковата это единственный утеплитель, отвечающий всем требованиям экологической безопасности, занесенный в реестр «Экологически безопасная (натуральная) продукция».

**Стекловолоконная вата** - это материал, представляющий собой минеральное волокно, которое по технологии получения и свойствам имеет много общего с минеральной ватой. Для получения стекловатного волокна используют то же сырье, что и для производства обычного стекла или отходы стекольной промышленности.

- По свойствам стекловата несколько отличается от минеральной. Отличия обусловлены, в частности, тем, что волокна стекловатной ваты имеют большую толщину (16-20 мкм) и в 2...3 раза большую длину. Благодаря этому изделия из стекловатной ваты обладают повышенной упругостью и прочностью. Стекловолоконная вата практически не содержит неволоконистых включений и обладает высокой вибростойкостью.
- Теплопроводность находится в пределах 0,030...0,052 Вт/м·К. Температуростойкость стекловатной ваты обычного состава - 450°C, что существенно ниже, чем у минеральной ваты.
- Теплоизоляционные материалы из стекловатного волокна - хорошие звукоизоляторы, так как имеют волокнистую структуру и хорошо поглощают звук. Обладают высокой химической стойкостью, не содержат коррозионных агентов, негигроскопичны. Благодаря противогнилостной обработке и отсутствию запаха предотвращается появление вредителей и плесени в строительных конструкциях. Этот негорючий материал не выделяет токсичные и вредные вещества под воздействием огня.
- Стекловатные изделия широко применяются для тепловой изоляции строительных конструкций. Стекловолоконно - настолько мягкий и эластичный материал, что изделиями из него можно облицовывать неровные поверхности, а также применять в конструкциях любой формы и конфигурации. При этом теплоизоляционные

изделия из стекловаты отличаются стабильностью формы, выдерживают старение, не подвергаясь деформации.

- Номенклатура теплоизоляционных изделий с использованием стеклянной ваты включает в себя: маты (мягкие плиты), прошивные маты, полужесткие плиты на синтетической связке, плиты с высокой жесткостью, позволяющей выдерживать значительные нагрузки. Жесткие плиты, облицованные стекловолокном, являются хорошей ветрозащитой. По длинным сторонам плит возможно соединение в шпунт и гребень, что обеспечивает надежное крепление и отсутствие зазоров.
- Мягкие стекловолокнистые материалы, как правило, прессуются в рулоны. Благодаря высокой упругости, они выпрямляются и восстанавливают первоначальный объем практически сразу после вскрытия упаковки.

## **Газонаполненные пластмассы – пенопласты.**

### **Общие сведения и классификация**

Газонаполненными (ячеистыми) пластмассами или пенопластами принято называть органические высокопористые материалы, получаемые из синтетических смол. В зависимости от прочности и модуля упругости газо- наполненные пластмассы подразделяются на жесткие, полужесткие и эластичные.

По виду полимера пенопласты подразделяют на термопластичные и термореактивные. В основе первых лежат полимеры с линейной структурой (полистирол, поливинилхлорид, полиэтилен, полипропилен и др.). В основе вторых – полимеры с пространственной структурой (фенолформальдегидные, мочевиноформальдегидные, ненасыщенные полиэферы, эпоксидные, полиуретановые и др.).

Специфические особенности газонаполненных пластмасс определяют техническую направленность и экономическую эффективность их применения в качестве строительной теплоизоляции.

Однако большинству газонаполненных пластмасс свойственны определенные недостатки, существенно ограничивающие возможность их применения: пониженная огнестойкость, теплостойкость и температуростойкость. Кроме того, процессы деструкции (“старения”) этих материалов, и их биостойкость в процессе длительной эксплуатации до конца не изучены.

**Пенополистирол** уже более 40 лет неизменно занимает прочное место в мире как теплоизоляционный материал для современного строительства. В Европе, Америке и Азии пенополистирол называют стиропором, по названию исходного материала, применяющегося для его производства.

Пенополистирол получают из стиропора путем вспучивания при нагревании под действием газообразователя. В результате образуются гранулы размером 5-15 мм. Иногда их используют в теплоизоляционных засыпках или в качестве легкого заполнителя в производстве теплоизоляционных штучных материалов с применением различных связующих (например, пенополистиролбетон).

Большей же частью гранулы пенополистирола перерабатываются в изделия (плиты, блоки, скорлупы и др.) без применения каких-либо вяжущих.

По технологии производства изделия из пенополистирола делят на два класса, существенно отличающиеся своими свойствами.

Изделия первого класса формируют путем спекания гранул друг с другом при повышенных температурах. В качестве строительной теплоизоляции наиболее распространены плиты пенополистирольные (ППС) по ГОСТ 15588-86.

Изделия второго класса получают путем смешивания гранул полистирола при повышенных температурах с последующим введением вспенивающего агента и выдавливанием из экструдера. Эти изделия также широко применяются в строительстве и хорошо известны под названием экструдированный пенополистирол (ЭПС).

Экструдированный пенополистирол (ЭПС).

Процесс экструдирования позволяет получить плиты с равномерной структурой, состоящей из мелких, практически полностью закрытых ячеек (пор). Благодаря своей структуре экструдированный пенополистирол обладает целым рядом замечательных свойств, отличающих его от большинства других изоляционных материалов.

Теплопроводность материала чрезвычайно низка (менее 0,03 Вт/м К).

Водопоглощение составляет менее 0,2 % в объеме. Низкое водопоглощение обеспечивает пренебрежимо малое изменение теплопроводности во влажных условиях, которое составляет не более 0,001-0,002 Вт/(м К). Это позволяет с успехом применять экструдированный пенополистирол без дополнительной гидроизоляции.

Коэффициент паропроницаемости также пренебрежимо мал (в зависимости от плотности материала – менее 0,02 мг/ (м.ч.Па)).

Прочностные характеристики, напротив, очень высоки и зависят от толщины и плотности плит. Прочность на сжатие при 10% линейной деформации (по ГОСТ 17177-94), например, в зависимости от плотности лежит в пределах 0,25...0,5 МПа.

Экструдированный пенополистирол химически стоек по отношению к большинству используемых в строительстве материалов (за исключением органических растворителей, безводных кислот и бензина). При выборе клеевых составов следует руководствоваться указаниями изготовителя относительно их пригодности для склеивания пенополистирола. Может приклеиваться горячим битумом.

Экструдированный пенополистирол морозостоек и хорошо сохраняет свои теплоизоляционные свойства. Изменение термического сопротивления после 1000 циклов замораживания-оттаивания не превышает 5%.

Благодаря добавлению антипиренов современные экструдированные пенополистиролы соответствуют пожарно-техническим характеристикам Г1 (по ГОСТ 30244-94 слабогорючий) и РП1 (по ГОСТ 51032 - 97 не распространения пламени по поверхности).

## **Пенополиуретан (ППУ).**

Пенополиуретан представляет собой теплоизоляционный пенопласт, получаемый из полиэфирной смолы и специальных добавок. Пенополиуретан бывает жесткий и мягкий (поролон). Жесткий выпускают в виде плит и блоков, а мягкий – в виде полотнищ и лент. Средняя плотность и теплопроводность поролона – соответственно 30-70 кг/м<sup>3</sup> и 0,03-0,04 Вт/м.К. Жесткие плиты имеют среднюю плотность 60-200 кг/м<sup>3</sup> и теплопроводность – 0,035-0,06 Вт/м.К.

Низкая теплопроводность пенополиуретана обусловлен тем, что он представляет собой однородную ячеистую пластмассу, в ячейках которой находится воздух.

Пенополиуретан не впитывает влагу, не гниет и не плесневеет.

Пенополиуретан обладает незначительным водопоглощением и гигроскопичностью, его можно использовать при достаточно высоких температурах.

Пенополиуретан применяется в конструкциях стеновых и кровельных панелей типа “сэндвич”.

Различные пенополиуретановые композиции также используют в изоляционных работах непосредственно на месте производства работ. Теплоизоляционные пенополиуретановые композиции могут наноситься методом набрызга, что позволяет получить сплошную бесшовную изоляцию.

## **Вспученные минеральные и пробковые теплоизоляционные материалы.**

К вспученным минеральным ТИМ относятся вспученный вермикулит, вспученный перлит, шунгизит, вспененное (ячеистое) стекло, газобетон и газосиликат. В данном разделе остановимся на трёх последних из перечисленных материалов как в наибольшей степени отвечающих практике современного строительства.

**Пеностекло** - материал со структурой пены, получаемый расплавлением и последующим вспениванием смеси тонкоизмельченного стеклянного порошка с газообразователем. Пеностекло имеет множество газонаполненных пузырьков. Диаметр пузырьков пеностекла различных марок имеет значение от 0,1 до 1 мм.

**Пеностекло** выпускают в виде плит (блоков) размерами (мм): длина 600, 1200; ширина - 450, 600; толщина 40...180. Для трубопроводов и емкостей выпускаются фасонные изделия из пеностекла (скорлупы, сегменты, колена и др.)

Пеностекло характеризуется наиболее высокой прочностью по сравнению с другими теплоизоляционными материалами. Предел прочности различных видов (марок) пеностекла в пределах 0,35...1,6 МПа (по специальному заказу до 5,0 МПа). Теплопроводность пеностекла при +25°C находится в пределах 0,040...0,052 Вт/(м · °C).

У пеностекла отсутствует водопоглощение, паропроницаемость, а это значит, что теплотехнические характеристики пеностекла не будут изменяться в зависимости от продолжительности и условий эксплуатации.

Пеностекло негорючий материал. Температура применения пеностекла от -260° до +485°C, температура размягчения равна примерно 730°.

Пеностекло экологически чистый материал, поэтому, не имеет ограничений при его применении.

В зависимости от назначения пеностекло имеет несколько различных марок отличающиеся между собой прочностью на сжатие.

Пеностекло применяется для теплоизоляции:

- фундаментов, стен подвала, полов, стен, потолков, кровель, эксплуатируемых кровель жилых, общественных и промышленных зданий;
- установок и оборудования с отрицательными температурами, высокотемпературного технологического оборудования химических и нефтехимических производств, трубопроводов, промышленного оборудования различного назначения, промышленных дымоходов, стены и полы и промышленных холодильников.

Промышленным производством пеностекла обладают на сегодня США (в том числе на европейских заводах в Бельгии, Чехии и Германии), Япония, Китай и Беларусь.

### **Газобетон и газосиликат.**

Газобетон и газосиликат представляют собой ячеистые теплоизоляционные бетоны, плотностью менее  $900 \text{ кг/м}^3$ , получаемые из портландцемента (газобетон) или из смеси извести с молотым кварцевым песком (газосиликат) путём вспучивания предварительно приготовленного шлама (теста) с помощью газообразователей и отвердевания в различных условиях (автоклавная обработка или пропаривание). По способу твердения газобетон бывает автоклавный и неавтоклавный, газосиликат - только автоклавный материал.

Водопоглощение теплоизоляционного газобетона - до 20%, а газосиликата - до 25-30%, поэтому изделия из газосиликата не применяют при относительной влажности окружающей среды более 60%. Предельная температура применения обеих разновидностей бетона -  $400^\circ\text{C}$  (специальных видов газобетона до  $700^\circ\text{C}$ ). Газобетонные и газосиликатные теплоизоляционные изделия в строительстве применяют для утепления стен и бесчердачных кровель промышленных и жилых зданий.

### **Пробковые теплоизоляционные материалы.**

Пробковые теплоизоляционные плиты готовят на основе коры пробкового дуба, поэтому это - натуральные природные материалы.

Материалы из пробки - лёгкие материалы, прочные на сжатие и изгиб, не поддающиеся усадке и гниению. Пробка легко режется, что гарантирует чистую и быструю работу. Пробка химически инертна и долговечна (до 50 лет и более), причём ее физические свойства практически не меняются со временем.

- Пробка не проводит электрический ток и не накапливает статическое электричество. Материалы из пробки не горят, а только тлеют (при наличии источника открытого огня),
- После обработки огнестойкими составами они принадлежат к классу горючести В1. При тлении пробка не выделяет ни фенолов, ни формальдегидов.

В качестве тепловой изоляции в основном применяются плиты толщиной 25...50 мм. Средняя плотность  $150\text{-}200 \text{ кг/м}^3$ , теплопроводность  $0,04\text{-}0,05 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ , температура применения не выше  $120^\circ\text{C}$ .

- Прессованная пробка в рулонах применяется как тепло- и звукоизолирующая прокладка.

### **Задание 1.**

Сравните по технике – экономическим показателям органические и минеральные теплоизоляционные материалы?

Какой теплоизоляционный материал имеет наибольшее распространение?

Опишите его свойства.

Какие типы структур характерны для теплоизоляционных материалов?

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №11**

**Тема:** Решение задач конвективного теплообмена. Решение задач нестационарной теплопроводности

**Цель:** Научиться рассчитывать тепло материалы по решению задач

**Оборудование:** Образцы теплоизоляционных материалов;  
Справочники по строительным материалам и изделиям

### **Справочный материал**

1. Круглов, Г. А. Основы теплотехники : учебное пособие для спо / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 208 с. — ISBN 978-5-8114-6805-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/152638>

2. Замалеев, З. Х. Основы гидравлики и теплотехники : учебное пособие для спо / З. Х. Замалеев, В. Н. Посохин, В. М. Чефанов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 352 с. — ISBN 978-5-8114-6644-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151198>

3. Логинов, В. С. Основы теплотехники. Практикум : учебное пособие для спо / В. С. Логинов, В. Е. Юхнов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 128 с. — ISBN 978-5-8114-6672-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151217>

### **Дополнительные учебные издания**

4. Теплотехника : учебное пособие для СПО / составители В. А. Никитин. — Саратов : Профобразование, 2020. — 532 с. — ISBN 978-5-4488-0690-2. — Текст : электронный // Электронный ресурс цифровой образовательной среды СПО ПРОФобразование : [сайт]. — URL: <https://profspo.ru/books/91902>

## Содержание работы:

Для распространения теплоты в любом теле (или в пространстве) необходимо наличие разности температур в различных точках тела, т. е. при передаче теплоты теплопроводностью  $\text{grad } t \neq 0$ .

Согласно гипотезе Фурье количество теплоты  $dQ_\tau$ , проходящее через элемент изотермической поверхности  $dF$  (рис. 1.3) за промежуток времени  $d\tau$ , пропорционально температурному градиенту:

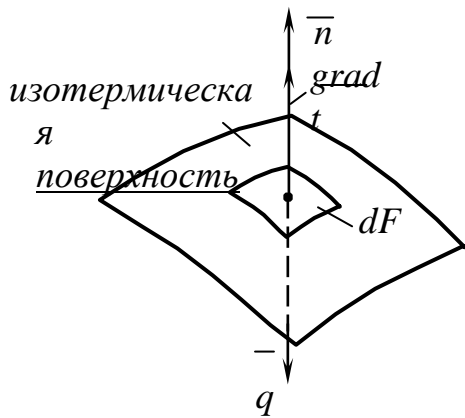


Рис. 1.3.

Изотермическая  
поверхность

$$dQ = - \lambda dF \frac{\partial t}{\partial n}, \quad (1.3)$$

$$dQ = q dF, \quad (1.4)$$

$$q = - \lambda \frac{\partial t}{\partial n} = - \overline{\lambda} \text{grad } t. \quad (1.5)$$

Уравнение (1.5) называется *уравнением Фурье*, знак «—» показывает, что направление удельного теплового потока противоположно направлению температурного градиента.

В уравнениях (1.3) и (1.5)  $\lambda$  — *коэффициент теплопроводности* — это тепловой поток, проходящий через единицу поверхности при единичном температурном градиенте. В этом состоит физический смысл коэффициента теплопроводности.



Коэффициенты теплопроводности строительных и теплоизоляционных материалов, имеющих пористую структуру, при повышении температуры возрастают по линейному закону и изменяются в пределах  $\lambda = 0,02 - 3,0$  Вт/(м·°С).

Графики изменения коэффициентов теплопроводности для строительных и теплоизоляционных материалов показаны на рис. 1.6.

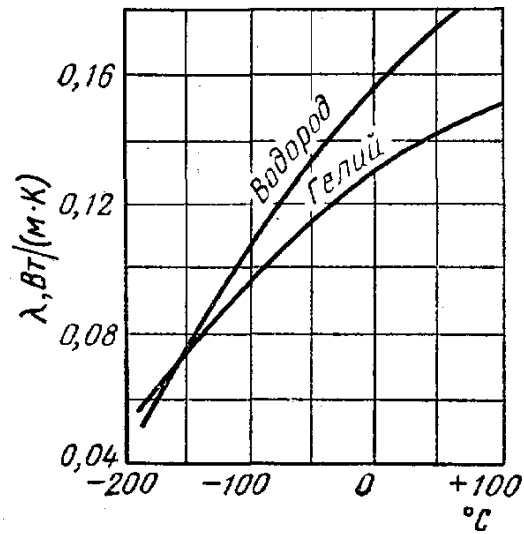


Рис. 1.4. Зависимости коэффициентов теплопроводности газов от температуры

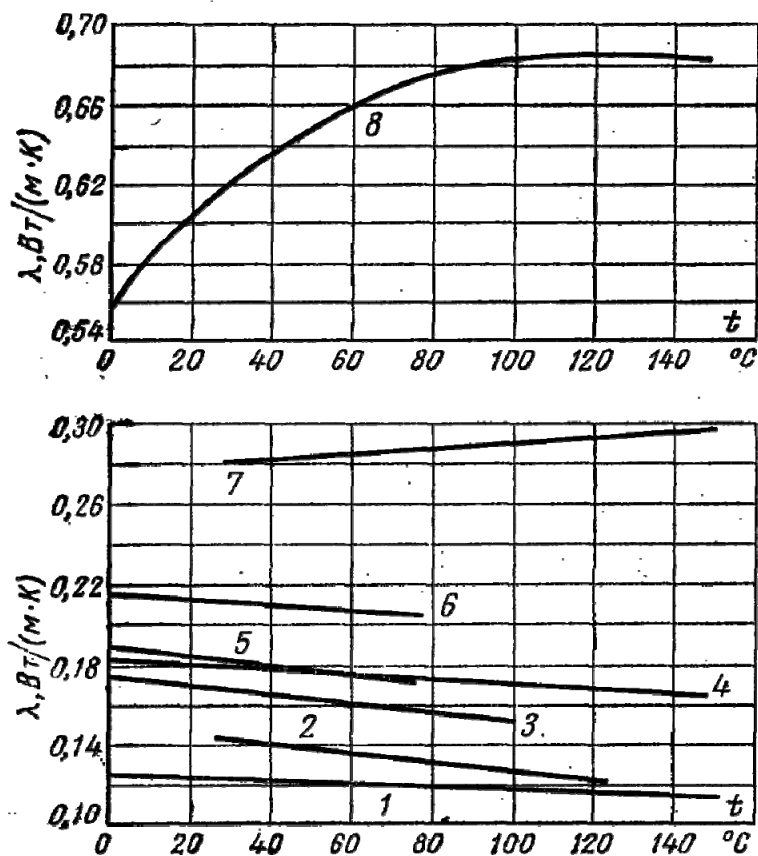


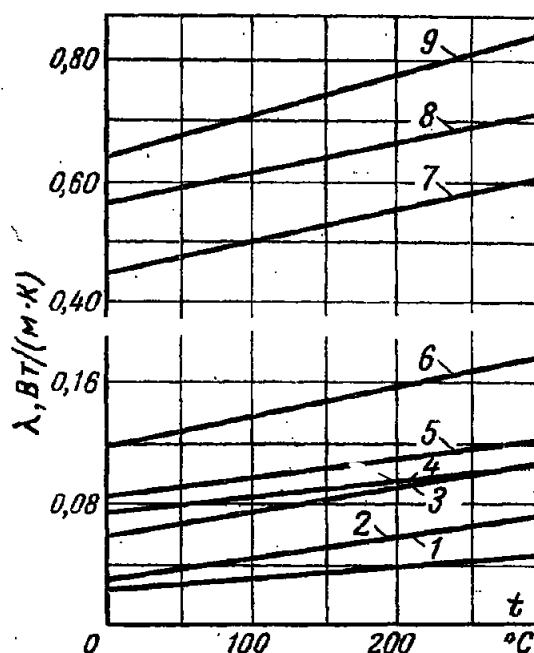
Рис. 1.5. Коэффициенты теплопроводности различных жидкостей:

1 – вазелиновое масло; 2 – бензол; 3 – ацетон; 4 – касторовое масло; 5 – спирт этиловый; 6 – спирт метиловый; 7 – глицерин; 8 – вода

Для влажного материала  $\lambda$  выше, чем для сухого материала и воды, взятые в отдельности. Например, для сухого кирпича  $\lambda = 0,35 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ , для воды  $\lambda = 0,58 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ , а для влажного кирпича  $\lambda = 1,05 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ . Этот эффект может быть объяснен конвективным переносом теплоты, возникающим благодаря капиллярному движению воды внутри пористого материала, и частично тем, что адсорбированная капиллярно-пористыми телами вода отличается по своим физическим свойствам от свободной воды. Поэтому по отношению к таким телам  $\lambda$  правильнее называть эффективным коэффициентом теплопроводности, т. е. неким коэффициентом теплопроводности условного однородного тела с такими же свойствами проводить теплоту, как и пористое тело.

Рис. 1.6. Коэффициенты теплопроводности воздуха, строительных и теплоизоляционных материалов:

- 1 – воздух;
- 2 – минеральная вата;
- 3 – шлаковая вата;
- 4 – ньювель;
- 5 – совелит;
- 6 – диатомитовый кирпич;
- 7 – красный кирпич;
- 8 – шлакобетонный кирпич;
- 9 – шамотный кирпич



Материалы с низким коэффициентом теплопроводности  $\lambda \leq 0,2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ , обычно применяются для тепловой изоляции различных поверхностей и называются теплоизоляционными.

Изучение любого физического процесса связано с установлением зависимости между величинами, характеризующими данный процесс. Для сложных процессов, к которым относится передача теплоты теплопроводностью, при установлении зависимости между величинами удобно воспользоваться методами

математической физики, которая рассматривает протекание процесса в элементарном объеме вещества в течение бесконечно малого отрезка времени.

При выводе дифференциального уравнения теплопроводности пренебрегают изменением некоторых величин и принимают следующие допущения:

- коэффициент теплопроводности  $\lambda = \text{const}$ , удельная теплоемкость тела  $c = \text{const}$ , плотность тела  $\rho = \text{const}$ ;
- внутренние источники теплоты отсутствуют;
- тело однородно и изотропно;
- соблюдается закон сохранения энергии: разность между количеством теплоты, вошедшим в элементарный объем за время  $d\tau$  и вышедшим из него за это же время, расходуется на изменение внутренней энергии рассматриваемого объема.

Выделим в теле элементарный параллелепипед с ребрами  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  (см. рис. 1.7). Температуры его граней различны, поэтому через них будет проходить теплота в направлении осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

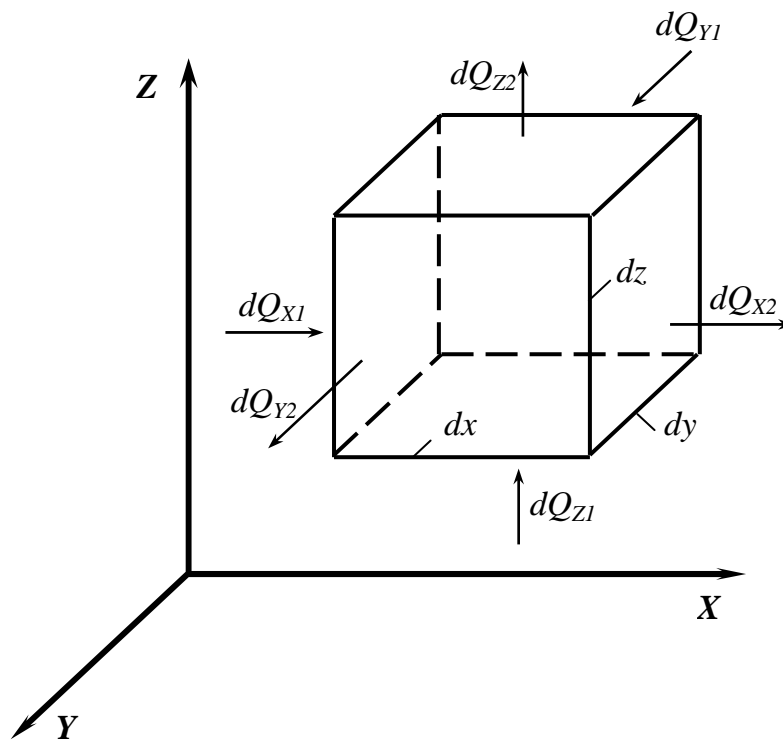


Рис. 1.7. Элементарный параллелепипед

Через площадку  $dx dy$  за время  $d\tau$ , согласно закону Фурье, проходит следующее количество теплоты:

$$dQ_{Z1} = \int_V \rho c_p \frac{\partial t}{\partial z} dx dy dz. \quad (1.7)$$

Через противоположную грань на расстоянии  $dz$  отводится количество теплоты, определяемое из выражения:

$$dQ_{Z2} = \int_V \rho c_p \frac{\partial t}{\partial z} dx dy dz, \quad (1.8)$$

где  $t_2$  – температура второй грани;  $\frac{\partial t}{\partial z}$  – изменение температуры в направлении оси  $Z$ .

Уравнение (1.8) можно записать как

$$dQ_{Z2} = \int_V \rho c_p \frac{\partial t}{\partial z} dx dy dz. \quad (1.9)$$

Приращение внутренней энергии в параллелепипеде в направлении оси  $Z$  будет равно:

$$\frac{dQ_Z}{2} = \lambda_2 \tau \frac{\partial t}{\partial z} \int_V dx dy dz. \quad (1.10)$$

Для осей  $X$  и  $Y$  приращение внутренней энергии запишется аналогично:

$$\frac{dQ_X}{2} = \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \int_V dx dy dz, \quad \frac{dQ_Y}{2} = \lambda \frac{\partial t}{\partial y} \int_V dx dy dz.$$

$$dx dy dz \frac{\partial}{\partial y^2}, \quad (1.11) \quad \text{---}$$

$$\cdot \quad (1.12)$$

Полное приращение энергии в выделенном объеме равно

$$\frac{dQ}{dQ_X} + \frac{dQ}{dQ_Y} + \frac{dQ}{dQ_Z} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial}{\partial t} \quad (1.13)$$

С другой стороны, согласно закону сохранения энергии, можно записать:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dx dy dz}{d} \frac{\partial}{\partial t} \quad (1.14)$$

где  $dx dy dz$  – объем параллелепипеда;  $\rho$  – плотность тела;  $c$  – удельная теплоемкость;  $(\partial t / \partial \tau) d\tau$  – изменение температуры во времени.

Левые и правые части уравнений (1.13) и (1.14) равны, поэтому



$$\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = \frac{q_V}{c \frac{\partial z}{\partial t}} \quad (1.18)$$

где  $q_V$  – количество теплоты, выделяемой в единице объема вещества в единицу времени, Вт/м<sup>3</sup>.

Дифференциальное уравнение (1.16) описывает явление теплопроводности в самом общем виде, т. е. описывает целый класс явлений. Для того чтобы из этого класса выделить конкретный процесс и дать его полное математическое описание, к дифференциальному уравнению необходимо присоединить матема-



тическое описание частных особенностей процесса. Эти частные особенности называются *условиями однозначности*, или краевыми условиями.

Условия однозначности включают:

1. *Геометрические условия* – задают форму и линейные размеры тела, в котором протекает процесс.

2. *Физические условия* – задают физические параметры тела ( $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$  и пр.), также может быть задан закон распространения внутренних источников теплоты.

3. *Начальные условия* (для нестационарных процессов) – задают закон распределения температуры внутри тела в начальный момент времени:

$$t_o = f(x, y, z). \quad (1.19)$$

При равномерном распределении температуры  $\tau = 0$ , поэтому начальные условия упрощаются  $t = t_o = \text{const}$ .

4. *Граничные условия* – задают распределение физических параметров на поверхности тела для каждого момента времени.

Граничные условия бывают I, II и III рода. Граничные условия I рода задают распределение температуры на поверхности тела для каждого момента времени:

$$t_n = f(x, y, z, \tau), \quad (1.20)$$

где  $t_n$  – температура поверхности тела.

Граничные условия II рода задают значение теплового потока для каждой точки поверхности тела и любого момента времени:

$$q_n = f(x, y, z, \tau), \quad (1.21)$$

где  $q_n$  – плотность теплового потока на поверхности тела.

В простейшем случае плотность теплового потока по поверхности и во времени остается постоянной  $q = q_o = \text{const}$ , такой случай теплообмена имеет место при нагреве металлических изделий в высокотемпературных печах.

Граничные условия III рода задают температуру окружающей среды  $t_{жс}$  и закон теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой.

Процесс теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой называется *теплоотдачей*. Теплоотдача является очень сложным процессом и за-

висит от большого количества параметров. Подробнее вопрос о теплоотдаче рассмотрен в п. 1.3.

Граничные условия III рода можно записать в виде

$$\frac{\partial t}{\partial n} = -\alpha (t - t_{ж}) \quad (1.22)$$

где  $\frac{\partial t}{\partial n}$  – температурный градиент на поверхности тела, м/°С;  $t_c$  – температу-

$\square$   $\square_c$

ра поверхности тела,  $\square$  С;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>· $\square$  С).

Таким образом, решение дифференциального уравнения теплопроводности при заданных условиях однозначности позволяет определить температурное поле во всем объеме тела для любого момента времени, т. е. найти функцию  $t = f(x, y, z, \tau)$ .

### Задание 1.

При каких значениях тепло материал максимально будет эффектен и какой?

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №12

**Тема:** Применение законов излучения АЧТ для расчетов излучения серых и реальных тел

**Цель:** изучение основных законов теплового излучения; практическое ознакомление с методами измерения температуры тела по яркости его свечения; экспериментальное определение постоянных, характеризующих излучение металла (вольфрама).

**Оборудование:** Отражающие свето-устройства

### Справочный материал

1. Круглов, Г. А. Основы теплотехники : учебное пособие для спо / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 208 с. — ISBN 978-5-8114-6805-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/152638>
2. Замалеев, З. Х. Основы гидравлики и теплотехники : учебное пособие для спо / З. Х. Замалеев, В. Н. Посохин, В. М. Чефанов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 352 с. — ISBN 978-5-8114-6644-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151198>
3. Логинов, В. С. Основы теплотехники. Практикум : учебное пособие для спо / В. С. Логинов, В. Е. Юхнов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 128 с. — ISBN 978-5-8114-6672-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151217>

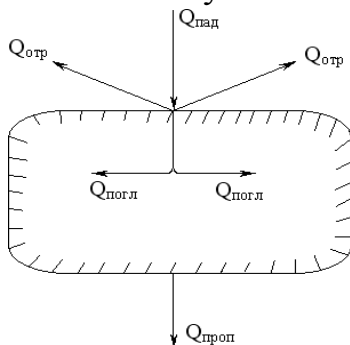
### Дополнительные учебные издания

4. Теплотехника : учебное пособие для СПО / составители В. А. Никитин. — Саратов : Профобразование, 2020. — 532 с. — ISBN 978-5-4488-0690-2. — Текст : электронный // Электронный ресурс цифровой образовательной среды СПО PROобразование : [сайт]. — URL: <https://profspo.ru/books/91902>

## Содержание работы:

**Потоком излучения** ( $Q$ , Вт) называют количество лучистой энергии, проходящее через заданную поверхность площадью  $F$  в *единицу* времени.

**Поверхностной плотностью потока излучения** ( $E$ , Вт/м<sup>2</sup>) называют количество лучистой энергии, проходящее через заданную *единичную*



поверхность в *единицу* времени.

В расчетах радиационного теплообмена приняты следующие обозначения:

- $Q_{\text{пад}}$  и  $E_{\text{пад}}$  поток и плотность потока излучения падающие на поверхность тела;
- $Q_{\text{отр}}$  и  $E_{\text{отр}}$  поток и плотность потока излучения отраженные от поверхности тела;
- $Q_{\text{погл}}$  и  $E_{\text{погл}}$  поток и плотность потока излучения поглощенные телом;
- $Q_{\text{проп}}$  и  $E_{\text{проп}}$  поток и плотность потока излучения пропускаемые телом;
- $Q_{\text{соб}}$  и  $E_{\text{соб}}$  поток и плотность потока собственного излучения тела;
- $Q_{\text{эф}}$  и  $E_{\text{эф}}$  поток и плотность потока эффективного излучения тела;
- $Q_{\text{рез}}$  и  $E_{\text{рез}}$  поток и плотность потока результирующего излучения тела

К радиационным характеристикам тела относят *поглощательную, отражательную и пропускательную способности* тела, *спектральную и интегральную степени черноты и угло-вую степень черноты*.

Для рассмотрения физического смысла поглощательной, отражательной и пропускательной способностей тела рассмотрим полупрозрачное тело на поверхность которого падает поток излучения  $Q_{\text{пад}}$  (рис. 5.1). Очевидно, что для любого полупрозрачного тела из закона сохранения энергии следует

$$Q_{\text{погл}} + Q_{\text{отр}} + Q_{\text{проп}} = Q_{\text{пад}} \quad (5.1)$$

Рис. 5.1. Схема радиационного теплообмена для полупрозрачного тела

Разделив левую правую части равенства (5.1) на поток падающего излучения, получим

$$\frac{Q_{\text{погл}}}{Q_{\text{пад}}} + \frac{Q_{\text{отр}}}{Q_{\text{пад}}} + \frac{Q_{\text{проп}}}{Q_{\text{пад}}} = 1 \quad \text{или} \quad A + R + D = 1, \quad (5.2)$$

$$\frac{Q_{\text{погл}}}{Q_{\text{пад}}} + \frac{Q_{\text{отр}}}{Q_{\text{пад}}} + \frac{Q_{\text{проп}}}{Q_{\text{пад}}} = 1$$

где  $A = Q_{\text{погл}} / Q_{\text{пад}}$

– *поглощательная способность* тела, равная доле падающего излучения  
поглощенного телом;

$R = Q_{\text{отр}} / Q_{\text{пад}}$  – *отражательная способность* тела, равная доле падающего  
излучения

отраженного телом;

$D = Q_{\text{проп}} / Q_{\text{пад}}$  – *пропускательная способность* тела, равная доле  
падающего излучения проходящего через тело.

В зависимости от числового значения  $A$ ,  $R$  и  $D$  различают *абсолютно черное*, *абсолютно белое* и *лучепрозрачное* или *диатермичное* тела.

Тело, которое поглощает все падающее на него излучение, называют *абсолютно черным* телом (АЧТ). Поток и плотность потока собственного излучения АЧТ обозначают  $Q_0$  и

$E_0$  соответственно. У абсолютно черного тела:  $A = 1$ ,  $R = D = 0$ .

Тело, которое *диффузно* отражает все падающее на него излучение называют *абсолютно белым* телом. У абсолютно белого тела:  $R = 1$ ,  $A = D = 0$ .

Тело, которое пропускает все падающее на него излучение, называют *лучепрозрачным* или *диатермичным*. Для диатермичного тела:  $D = 1$ ,  $A = R = 0$ .

Вышеуказанных идеальных тел в природе не существует. Однако некоторые реальные тела по своим радиационным свойствам близки к идеальным.

Например, у сажи и окислен-

ной шероховатой стали  $A \approx 1$ , у полированных металлов  $R \approx 1$ , у двухатомных газов с

симметричными молекулами ( $N_2$ ,  $O_2$ ), в том числе, и у сухого воздуха  $D \approx 1$ .

У непрозрачных тел:  $D = A + R = 1$ . У газов:  $A = D = 1$ ,  $R = 0$ .

### Виды лучистых потоков

Излучение тела, обусловленное его тепловым состоянием (степенью нагретости) называют *собственным излучением* этого тела. Поток собственного излучения обозначают  $Q_{\text{соб}}$  или буквой  $Q$  без нижнего индекса. *Плотность потока собственного излучения* обозначают

$$E_{\text{соб}} = \frac{dQ_{\text{соб}}}{dF} \quad \text{или} \quad E = \frac{dQ}{dF} = \frac{W_t}{m^2} \quad (5.3)$$

и называют *лучеиспускательной способностью* тела. В величине  $E_{\text{соб}}$  заключена вся энергия, излучаемая телом в диапазоне длин волн  $\lambda \approx 0 \dots \infty$ , т.е. энергия излучения всего спектра.

Долю лучеиспускательной способности, заключенную в бесконечно малом спектральном

диапазоне длин волн  $d\lambda$  называют *спектральной плотностью потока собственного излу-*

*чения* или *спектральной лучеиспускательной способностью* тела и обозначают

$$E_{\lambda} = \frac{d^2Q}{dF d\lambda} = \frac{dE}{d\lambda} = \frac{W_{t\lambda}}{m^3} \quad (5.4)$$

Зная функцию распределения  $E_{\lambda} = f(\lambda)$ , лучеиспускательную способность тела можно рассчитать, проинтегрировав эту функцию по всему спектру излучения:

$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda. \quad (5.5)$$

Спектральную лучеиспускательную способность также называют *спектральной интенсивностью излучения*. Поэтому плотность потока собственного излучения тела (лучеиспускательную способность) также называют *интегральной интенсивностью излучения тела*.

Далее рассмотрим схему радиационного теплообмена, изображенную на рис.6.2. На непрозрачное тело падает лучистый поток  $Q_{\text{пад}}$ . Одна часть теплового потока в количестве  $Q_{\text{погл}}$  поглощается телом, а другая – в количестве  $Q_{\text{отр}}$  телом отражается. Тело обладает и собственным излучением  $Q_{\text{соб}}$  или  $Q$ .

Радиационный тепловой поток, уходящий с поверхности тела, равный сумме собственного и отраженного тепловых потоков называют *эффективным тепловым потоком* и обозначают  $Q_{\text{эф}}$ . Эффективный тепловой поток по определению равен:

$$Q_{\text{эф}} = Q_{\text{соб}} + Q_{\text{отр}}. \quad (5.6)$$

Тепловой поток, идущий на изменение теплового состояния тела, называют *результующим тепловым потоком* и обозначают  $Q_{\text{рез}}$  или с целью унификации обозначений в расчетах сложного (радиационно-конвективного) теплообмена  $Q_w$ . В результате радиационного теплообмена тело получает или отдает количество энергии (см. рис.5.2):

$$Q_w = Q_{рез} = Q_{погл} = Q_{соб} = A \cdot Q_{пад} \quad (5.7)$$

или  $Q_{соб}$  (5.8)

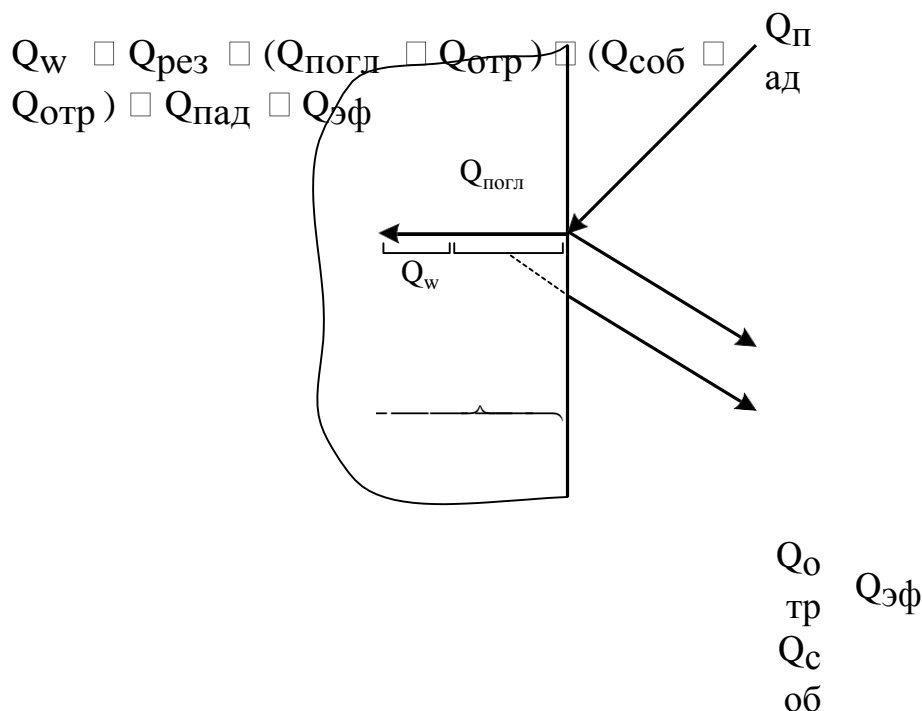


Рис. 5.2. Схема радиационного теплообмена для непрозрачного тела

Если расчет радиационного теплообмена проводят, используя в плотности соответствующих радиационных потоков, то в этом случае формулы (6.6) - (6.8) примут вид:

$$E_{эф} = E_{соб} + E_{отр} \quad (5.9)$$

$$q_w = E_{рез} = E_{погл} = E_{соб} = A \cdot E_{пад} \quad (5.10)$$

$$E_{соб} \quad (5.11)$$

$$q_w = E_{рез} = (E_{погл} + E_{отр}) = (E_{соб} + E_{отр}) = E_{пад} + E_{эф}$$

В заключение вводного параграфа темы "Радиационный теплообмен" без вывода приведем формулу связи собственного, результирующего и эффективного потоков излучения:

$$Q_{эф} = \frac{1 - A}{A} \cdot Q_{с} \quad \text{или} \quad E_{эф} = \frac{1 - A}{A} \cdot E_{соб} \quad (5.12)$$

w w

### Основные законы излучения абсолютно черного тела (АЧТ)

Абсолютно черных тел в природе не существует. В качестве модели АЧТ используют отверстие в стенке непрозрачной полости с размерами много



меньше самой полости. При равномерном нагреве всей поверхности полости данное отверстие по своим свойствам приближается к абсолютно черному телу, т.е. поглощает все падающее на него излучение и само при этом является идеальным излучателем – излучает максимально возможное количество энергии.

Расчет собственного излучения реальных тел основан на законах излучения АЧТ.

### *Закон Планка*

В 1900 году на основе квантовой теории немецкий физик Макс Планк вывел закон, устанавливающий зависимость спектральной интенсивности излучения абсолютно черного тела ( $E_{0,\lambda}$ ) от длины волны ( $\lambda$ ) и абсолютной температуры ( $T$ ) –  $E_{0,\lambda} = f(\lambda, T)$ . Этот закон носит имя Планка и имеет вид:

$$E_{0,\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right)} \quad \text{Вт/м}^2 \quad (5.13)$$

где  $T$  – абсолютная температура абсолютно черного тела, К;  $C_1$  и  $C_2$  – коэффициенты, связанные с универсальными физическими константами следующими соотношениями:

$C_1 \approx 2 \cdot 10^0 \cdot c^2 \approx 3,741832 \cdot 10^{16}$  Вт  $\cdot$  м<sup>2</sup>;  $\hbar / k \approx 1,438786$  м  $\cdot$  К, в которых  
 $C_2 \approx c_0 \cdot 10^{12}$   
 $c_0 \approx 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме;  $\hbar \approx 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж  $\cdot$  с – постоянная  
 Планка;  
 $k \approx 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана.

График зависимости  $E_0, \square \square f(\square, T)$  изображен на рис. 6.3. Анализ этого графика позволяет сделать следующие выводы:

- зависимость  $E_0, \eta \propto f(\lambda, T)$  имеет экстремальный характер;
- с ростом температуры длина волны ( $\lambda_{\max}$ ), при которой наблюдается максимум спектральной плотности потока излучения АЧТ, уменьшается.

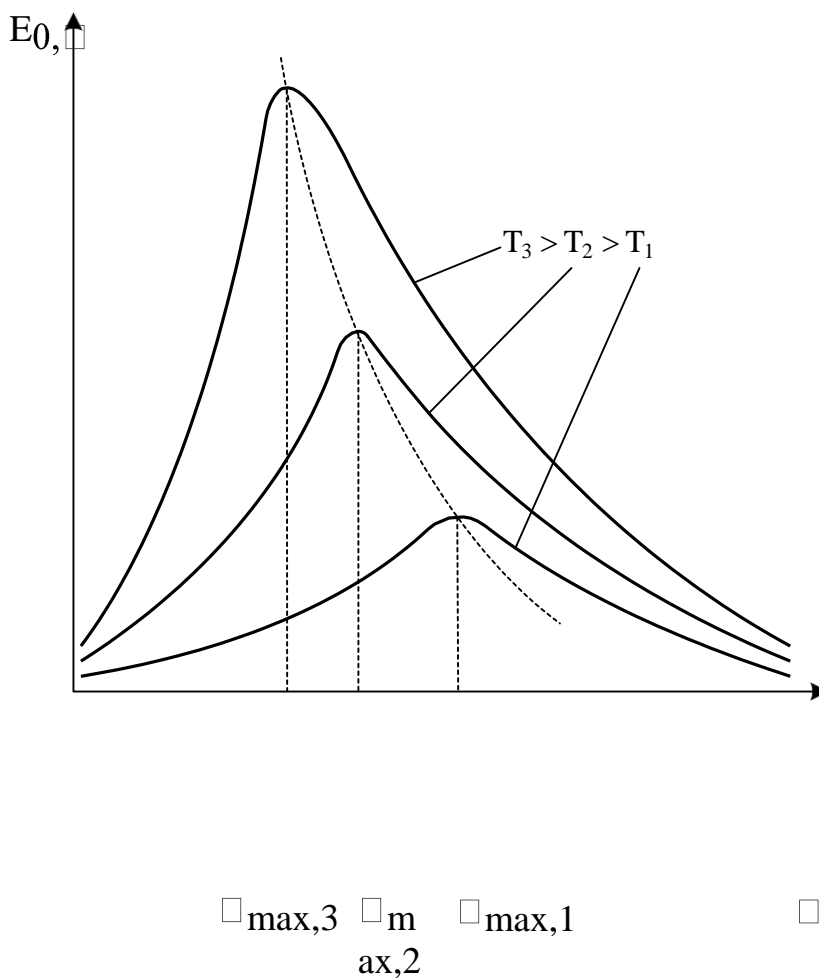


Рис. 5.3. Спектральная плотность потока излучения АЧТ

## Закон Вина

Длина волны, при которой наблюдается максимальное значение спектральной плотности потока собственного излучения ( $\square_{\max}$ ) и

температура связаны обратно пропорциональной зависимостью:

$$\lambda_{\text{max}} T = 2897,82 \text{ мкм} \cdot \text{К} = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}. \quad (5.14)$$

Этот закон является следствием закона Планка. Однако он был получен Вином ранее (в 1893 году) и поэтому носит его имя.  $\lambda_{\text{max}}$ , по формуле (6.14) легко найти зная излучателя. температуру

### *Закон Стефана-Больцмана*

Закон Стефана-Больцмана при условии термодинамического равновесия устанавливает связь плотности потока собственного излучения поверхности АЧТ ( $E_0$ ) с его абсолютной температурой ( $T$ ):

$$E_0 = \int_0^\infty E_{0,\lambda} d\lambda = C_1 \int_0^\infty \lambda^{-5} / \exp(C_2 / \lambda T) d\lambda = \sigma_0 T^4, \quad \text{Вт/м}^2, \quad (5.15)$$

где  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$  – постоянная Стефана–Больцмана.

В расчетах на калькуляторе закон Стефана-Больцмана удобно применять в следующем

виде:

$$E_0 = \frac{c_0}{100} T^4, \quad (5.16)$$

где  $c_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Закон Стефана-Больцмана был экспериментально установлен Стефаном в 1879 году, а теоретически обоснован Больцманом в 1884 и Планком в 1901 годах.

### Излучение реальных тел. Закон Кирхгофа.

Излучение реальных тел отличается от излучения абсолютно черного тела, как по спек-

тральному составу – виду функции  $E_\lambda = f(\lambda, T)$ , так и по величине (рис.6.4,а).

При равных температурах реальные тела излучают тепловой энергии меньше, чем АЧТ. И при этом максимум спектральной плотности потока излучения у металлов смещен в сторону коротковолновой части спектра, а у диэлектриков – в сторону длинноволновой части спектра относительно максимума спектральной плотности потока излучения АЧТ.

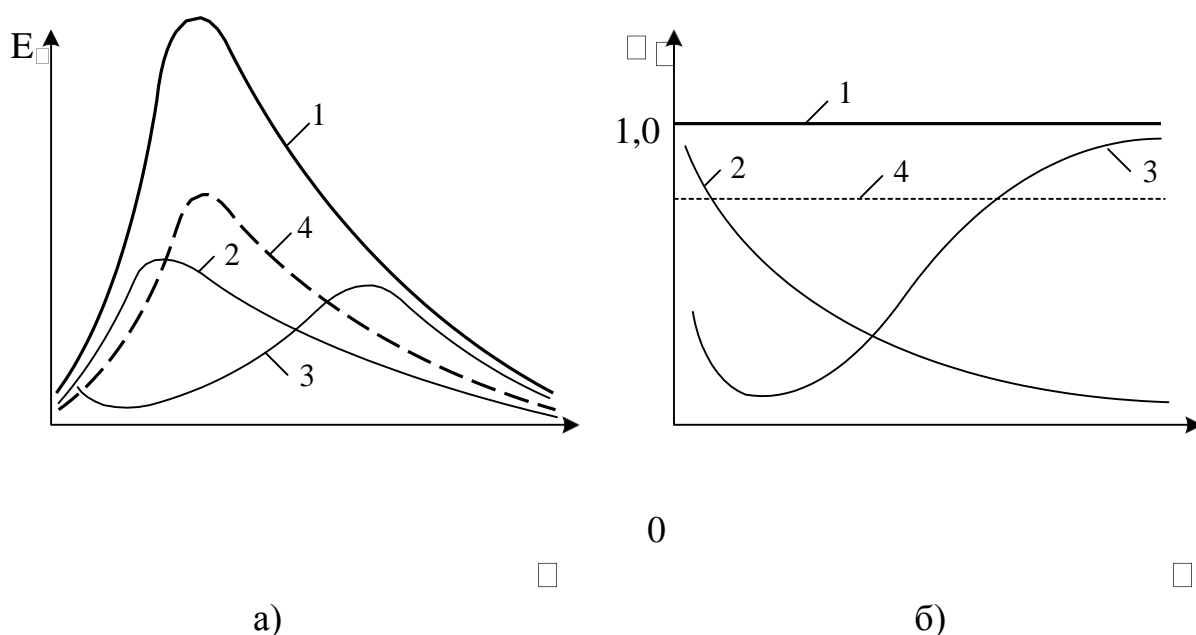


Рис.5.4. Спектральное распределение энергии излучения (а) и степени черноты (б) различных тел:

1 – АЧТ; 2 – металл; 3 – диэлектрик; 4 – серое тело

Для характеристики излучения реальных тел введено понятие спектральной степени

**Задание 1.**

Показать на практике как действует закон Кирхгофа

## Информационное обеспечение обучения

### Основные учебные издания:

1. Круглов, Г. А. Основы теплотехники : учебное пособие для спо / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 208 с. — ISBN 978-5-8114-6805-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/152638>
2. Замалеев, З. Х. Основы гидравлики и теплотехники : учебное пособие для спо / З. Х. Замалеев, В. Н. Посохин, В. М. Чефанов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 352 с. — ISBN 978-5-8114-6644-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151198>
3. Логинов, В. С. Основы теплотехники. Практикум : учебное пособие для спо / В. С. Логинов, В. Е. Юхнов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 128 с. — ISBN 978-5-8114-6672-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151217>

### Дополнительные учебные издания

4. Теплотехника : учебное пособие для СПО / составители В. А. Никитин. — Саратов: Профобразование, 2020. — 532 с. — ISBN 978-5-4488-0690-2. — Текст : электронный // Электронный ресурс цифровой образовательной среды СПО PROФобразование : [сайт]. — URL: <https://profspo.ru/books/91902>