

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Кафедра автомобильного транспорта**

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

\_\_\_\_\_ Е.И.Луковникова

« \_\_\_\_\_ » декабря 2018 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**ТЕПЛОТЕХНИКА**

**Б1. Б.24**

**НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ**

**23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических  
машин и комплексов**

**ПРОФИЛЬ ПОДГОТОВКИ**

**Автомобили и автомобильное хозяйство (прикладной бакалавриат)**

Программа прикладного бакалавриата

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ .....</b> | <b>3</b>  |
| <b>2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ .....</b>   | <b>4</b>  |
| <b>3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>  | <b>4</b>  |
| 3.1 Распределение объёма дисциплины по формам обучения.....  | 4         |
| 3.2 Распределение объёма дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости.....   | 4         |
| <b>4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>  | <b>5</b>  |
| 4.1 Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий .....   | 5         |
| 4.2 Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам .....   | 6         |
| 4.3 Лабораторные работы.....   | 33        |
| 4.4 Практические занятия.....  | 33        |
| 4.5 Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат.....  | 33        |
| <b>5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>            | <b>34</b> |
| <b>6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ</b>   | <b>35</b> |
| <b>7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>   | <b>35</b> |
| <b>8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>                             | <b>36</b> |
| <b>9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>  | <b>36</b> |
| 9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ..  | 36        |
| <b>10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ .....</b>                          | <b>47</b> |
| <b>11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ .....</b>                        | <b>47</b> |
| <b>Приложение 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.....</b>                                   | <b>48</b> |
| <b>Приложение 2. Аннотация рабочей программы дисциплины .....</b>  | <b>59</b> |
| <b>Приложение 3. Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе .....</b>   | <b>60</b> |

# 1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

## Вид деятельности выпускника

Дисциплина охватывает круг вопросов, относящихся к производственно-технологическому виду профессиональной деятельности выпускника в соответствии с компетенциями и видами деятельности, указанными в учебном плане.

## Цель дисциплины

Целью изучения дисциплины является получение знаний о методах преобразования, передачи и использования теплоты в такой степени, чтобы они могли выбирать и эксплуатировать необходимое теплотехническое оборудование в области автомобильного транспорта, обеспечивая максимальную экономию топливно-энергетических ресурсов и материалов, интенсификацию и оптимизацию технологических процессов, выявление и использование вторичных ресурсов, а также получение практических навыков в решении инженерных задач.

## Задачи дисциплины:

- получение знаний о теплотехнической терминологии, о законах получения и преобразования энергии, методах анализа эффективности использования теплоты;
- получение знаний о принципах действия, схем, областей применения и потенциальных возможностях основного теплотехнического и теплоэнергетического оборудования (тепловые двигатели, теплообменники, печи и др.);
- приобретение умения экспериментально определять и теоретически рассчитывать характеристики теплового и теплоэнергетического оборудования, производить измерение основных теплотехнических показателей, связанных с профилем инженерной деятельности.

| Код компетенции | Содержание компетенций   | Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине  |
|-----------------|--|--|
| 1               | 2  | 3  |
| ПК-12           | владением знаниями направлений полезного использования природных ресурсов, энергии и материалов при эксплуатации, ремонте и сервисном обслуживании транспортных и транспортно-технологических машин и оборудования различного назначения, их агрегатов, систем | <p><b>знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- основные законы термодинамики и теории тепло-массообмена;</li> <li>- способы интенсификации теплообмена;</li> <li>- принципы теплоизоляции;</li> </ul> <p><b>уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- использовать методы анализа функционирования теплотехнических устройств и аппаратов, способы экономии тепловой энергии, способы использования вторичных энергетических ресурсов;</li> </ul> <p><b>владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- методами расчета основных термодинамических процессов, тепловых циклов двигателей внутреннего сгорания, анализа их эффективности по исходным данным.</li> </ul> |
| ОПК-3           | готовность применять систему фундаментальных знаний (математических, естественнонаучных, инженерных и экономических) для идентификации, формулирования и решения техниче-  | <p><b>знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- основные физические явления, фундаментальные понятия, законы и теории классической и современной физики; современную научную аппаратуру; основные физические явления; фундаментальные понятия, законы и теории классической и современной физики;</li> </ul> <p><b>уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- выделять конкретное физическое содержание в прикладных задачах профессиональной деятельно-</li> </ul>   |

|  |  |   |
|--|--|---|
|  | ских и технологических проблем эксплуатации транспортно-технологических машин и комплексов | сти;<br><b>владеть:</b><br>- методами выполнения элементарных исследований в области профессиональной деятельности. |
|--|--|---|

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б1.Б.24 «Теплотехника» относится к базовой части.

Дисциплина «Теплотехника» базируется на знаниях, полученных при изучении учебных дисциплин «Математика», «Физика».

Основываясь на изучении перечисленных дисциплин, дисциплина «Теплотехника» представляет основу для изучения дисциплин «Силовые агрегаты», «Автомобильные двигатели».

Такое системное междисциплинарное изучение направлено на достижение требуемого ФГОС уровня подготовки по квалификации бакалавр.

## 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ

### 3.1. Распределение объема дисциплины по формам обучения

| Форма обучения                | Курс | Семестр | Трудоемкость дисциплины в часах |                  |        |                     |                      |                        | Курсовая работа (проект), контрольная работа, реферат, РГР | Вид промежуточной аттестации |
|-------------------------------|------|---------|---------------------------------|------------------|--------|---------------------|----------------------|------------------------|--|------------------------------|
|                               |      |         | Всего часов                     | Аудиторных часов | Лекции | Лабораторные работы | Практические занятия | Самостоятельная работа |  |                              |
| 1                             | 2    | 3       | 4                               | 5                | 6      | 7                   | 8                    | 9                      | 10   | 11                           |
| Очная                         | 2    | 4       | 72/2                            | 34/8             | 17     | -                   | 17                   | 38                     | -  | зачет                        |
| Заочная                       | -    | -       | -                               | -                | -      | -                   | -                    | -                      | -  | -                            |
| Заочная (ускоренное обучение) | -    | -       | -                               | -                | -      | -                   | -                    | -                      | -  | -                            |
| Очно-заочная                  | -    | -       | -                               | -                | -      | -                   | -                    | -                      | -  | -                            |

### 3.2. Распределение объема дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости

| Вид учебных занятий  | Трудоемкость (час.) | в т.ч. в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.) | Распределение по семестрам, час |
|--|---------------------|--|---------------------------------|
|  |                     |  | 4                               |
| <b>I. Контактная работа обучающихся с преподавателем (всего)</b> | 34                  | 8  | 34                              |
| Лекции (Лк)  | 17                  | 4  | 17                              |
| Практические занятия (ПЗ)  | 17                  | 4  | 17                              |
| Групповые (индивидуальные) консультации*                         | +                   | -  | +                               |
| <b>II. Самостоятельная работа обучающихся (СР)</b>               | 38                  | -  | 38                              |

|                                      |          |    |   |    |
|--------------------------------------|----------|----|---|----|
| Подготовка к практическим занятиям   |          | 17 | - | 17 |
| Подготовка к зачету                  |          | 21 | - | 21 |
| <b>III. Промежуточная аттестация</b> | зачет    | +  | - | +  |
| Общая трудоемкость дисциплины        | час.     | 72 | - | 72 |
|                                      | зач. ед. | 2  | - | 2  |

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

##### 4.1. Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий

- для очной формы обучения:

| №<br>раз-<br>дела<br>и<br>те-<br>мы | Наименование<br>раздела и<br>тема дисциплины                             | Трудо-<br>ем-<br>кость,<br>(час.) | Виды учебных занятий, включая<br>самостоятельную работу обуча-<br>ющихся, и трудоемкость; (час.) |                              |   |
|-------------------------------------|--|-----------------------------------|--|------------------------------|---|
|                                     |  |                                   | учебные занятия  |                              | самостоя-<br>тельная<br>работа<br>обучаю-<br>щихся* |
|                                     |  |                                   | лекции   | практиче-<br>ские<br>занятия |   |
| 1                                   | 2  | 3                                 | 4  | 5                            | 6   |
| <b>1.</b>                           | <b>Основы термодинамики</b>  | <b>20</b>                         | <b>8</b>   | <b>-</b>                     | <b>12</b>   |
| 1.1.                                | Предмет теплотехники. Основные поня-<br>тия и определения термодинамики. | 5                                 | 2  | -                            | 3   |
| 1.2.                                | Первый закон термодинамики   | 5                                 | 2  | -                            | 3   |
| 1.3.                                | Второй закон термодинамики   | 5                                 | 2  | -                            | 3   |
| 1.4.                                | Термодинамические процессы   | 5                                 | 2  | -                            | 3   |
| <b>2.</b>                           | <b>Техническая термодинамика</b>   | <b>20</b>                         | <b>4</b>   | <b>6</b>                     | <b>10</b>   |
| 2.1.                                | Термодинамические циклы ДВС  | 16                                | 2  | 6                            | 8   |
| 2.2.                                | Термодинамический цикл ГТУ   | 2                                 | 1  | -                            | 1   |
| 2.3.                                | Термодинамические циклы комбиниро-<br>ванных двигателей                  | 2                                 | 1  | -                            | 1   |
| <b>3.</b>                           | <b>Основы теории теплообмена</b>   | <b>32</b>                         | <b>5</b>   | <b>11</b>                    | <b>16</b>   |
| 3.1.                                | Основные сведения теории теплообмена.<br>Теплопроводность                | 14                                | 2  | 5                            | 7   |
| 3.2.                                | Конвекция. Теплопередача   | 16                                | 2  | 6                            | 8   |
| 3.3.                                | Излучение  | 2                                 | 1  | -                            | 1   |
|                                     | <b>ИТОГО</b>   | <b>72</b>                         | <b>17</b>  | <b>17</b>                    | <b>38</b>   |

## 4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам

### Раздел 1. Основы термодинамики

#### Тема 1.1. Предмет теплотехники. Основные понятия и определения термодинамики.

Теплотехника – наука, которая изучает методы получения, преобразования, передачи и использования теплоты, а также принципы действия и конструктивные особенности тепловых машин, аппаратов и устройств. Теплота используется во всех областях деятельности человека. Для установления наиболее рациональных способов его использования, анализа экономичности рабочих процессов тепловых установок и создания новых, наиболее совершенных типов тепловых агрегатов необходима разработка теоретических основ теплотехники. Различают два принципиально различных направления использования теплоты – *энергетическое* и *технологическое*. При энергетическом использовании, теплота преобразуется в механическую работу, с помощью которой в генераторах создается электрическая энергия, удобная для передачи на расстояние. Теплоту при этом получают сжиганием топлива в котельных установках или непосредственно в двигателях внутреннего сгорания. При технологическом - теплота используется для направленного изменения свойств различных тел (расплавления, затвердевания, изменения структуры, механических, физических, химических свойств).

Количество производимых и потребляемых энергоресурсов огромно. По данным Минтопэнерго РФ и фирмы "Shell" [3] динамика производства первичных энергоресурсов даны в таблице 1.1.

Таблица 1.1.

| Вид энергоресурсов            | Годы  |       |       |       |       |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                               | 1980  | 1985  | 1990  | 1994  | 1995  |
| Нефть, Мт, в мире             | 2922  | 2652  | 3022  | 3264  | -     |
| Россия                        | 547   | 542   | 518   | 317,8 | 306,7 |
| Газ, Гм <sup>3</sup> , в мире | 1620  | 1981  | 2413  | 2250  | -     |
| Россия                        | 252   | 462   | 641   | 607,3 | 595,4 |
| Уголь, Мт, в мире             | 3249  | 3808  | 3935  | 4163  | -     |
| Россия                        | 391   | 395   | 395   | 270,9 | 262,2 |
| Э/энергия, ТДж, в мире        | 10712 | 11900 | 16498 | 18221 | -     |
| Россия                        | 596,7 | 886,5 | 942,7 | 890,7 | 862   |
| Итого, Мтут*, в мире          | 9451  | 10231 | 11692 | 12277 | -     |
| Россия                        | 1430  | 1690  | 1430  | 1391  | -     |

\* тут – тонна условного топлива.

Таковыми теоретическими разделами являются техническая термодинамика и основы теории теплообмена, в которых исследуются законы превращения и свойства тепловой энергии и процессы распространения теплоты. Данный курс является общетехнической дисциплиной при подготовке специалистов технической специальности.

#### Термодинамическая система.

Техническая термодинамика (т/д) рассматривает закономерности взаимного превращения теплоты в работу. Она устанавливает взаимосвязь между тепловыми, механическими и химическими процессами, которые совершаются в тепловых и холодильных машинах, изу-

чает процессы, происходящие в газах и парах, а также свойства этих тел при различных физических условиях.

Термодинамика базируется на двух основных законах (началах) термодинамики:

*I закон термодинамики* - закон превращения и сохранения энергии;

*II закон термодинамики* – устанавливает условия протекания и направленность макроскопических процессов в системах, состоящих из большого количества частиц.

Техническая т/д, применяя основные законы к процессам превращения теплоты в механическую работу и обратно, дает возможность разрабатывать теории тепловых двигателей, исследовать процессы, протекающие в них и т.п.

Объектом исследования является *термодинамическая система*, которой могут быть группа тел, тело или часть тела. То что находится вне системы называется *окружающей средой*. Т/д система это совокупность макроскопических тел, обменивающиеся энергией друг с другом и окружающей средой. Например: т/д система – газ, находящейся в цилиндре с поршнем, а окружающая среда – цилиндр, поршень, воздух, стены помещения.

*Изолированная система* - т/д система не взаимодействующая с окружающей средой.

*Адиабатная (теплоизолированная) система* – система имеет адиабатную оболочку, которая исключает обмен теплотой (теплообмен) с окружающей средой.

*Однородная система* – система, имеющая во всех своих частях одинаковый состав и физические свойства.

*Гомогенная система* – однородная система по составу и физическому строению, внутри которой нет поверхностей раздела (лед, вода, газы).

*Гетерогенная система* – система, состоящая из нескольких гомогенных частей (фаз) с различными физическими свойствами, отделенных одна от другой видимыми поверхностями раздела (лед и вода, вода и пар).

В тепловых машинах (двигателях) механическая работа совершается с помощью рабочих тел – газ, пар.

### **Параметры состояния.**

Величины, которые характеризуют физическое состояние тела называются термодинамическими параметрами состояния. Такими параметрами являются удельный объем, абсолютное давление, абсолютная температура, внутренняя энергия, энтальпия, энтропия, концентрация, теплоемкость и т.д. При отсутствии внешних силовых полей (гравитационного, электромагнитного и др.) термодинамическое состояние однофазного тела можно однозначно определить 3-мя параметрами – уд. объемом ( $v$ ), температурой ( $T$ ), давлением ( $P$ ).

Удельный объем – величина, определяемая отношением объема вещества к его массе.

$$v = V / m, [m^3/kg], (1.1)$$

Плотность вещества – величина, определяемая отношением массы к объему вещества.

$$\rho = m / V, [kg/m^3], (1.2)$$

$$v = 1 / \rho; \rho = 1 / v; v \cdot \rho = 1. (1.3)$$

Давление – с точки зрения молекулярно-кинетической теории есть средний результат ударов молекул газа, находящихся в непрерывном хаотическом движении, о стенку сосуда, в котором заключен газ.

$$P = F / S; [Pa] = [N/m^2] (1.4)$$

Внесистемные единицы давления:

1 кгс/м<sup>2</sup> = 9,81 Па = 1 мм.водн.ст.

1 ат. (техн.атмосфера) = 1 кгс/см<sup>2</sup> = 98,1 кПа.

1 атм. (физическая атмосфера) = 101,325 кПа = 760 мм.рт.ст.

1 ат. = 0,968 атм.

1 мм.рт.ст. = 133,32 Па.

1 бар = 0,1 МПа = 100 кПа = 10<sup>5</sup> Па.

Различают *избыточное* и *абсолютное* давление.

*Избыточное* давление ( $P_{и}$ ) – разность между давлением жидкости или газа и давлением окружающей среды.

*Абсолютное* давление ( $P$ ) – давление отсчитываемое от абсолютного нуля давления или от абсолютного вакуума. Это давление является т/д параметром состояния.

Абсолютное давление определяется:

1). При давлении сосуда больше атмосферного:

$$P = P_{и} + P_{о}; (1.5)$$

2). При давлении сосуда меньше атмосферного:

$$P = P_{о} + P_{в}; (1.6)$$

где  $P_0$  – атмосферное давление;  
 $P_v$  – давление вакуума.

**Температура** – характеризует степень нагретости тел, представляет собой меру средней кинетической энергии поступательного движения его молекул. Чем больше средняя скорость движения, тем выше температура тела.

За т/д параметр состояния системы принимают *термодинамическую температуру* (Т), т.е. *абсолютную* температуру. Она всегда положительна, При температуре абсолютного нуля (Т=0) тепловые движения прекращаются и эта температура является началом отсчета абсолютной температуры.

### **Уравнение состояния и термодинамический процесс.**

Основные т/д параметры состояния Р, v, Т однородного тела зависят друг от друга и взаимно связаны между собой определенным математическим уравнением, который называется уравнением состояния:

$$f(P, v, T) = 0. \quad (1.7)$$

Равновесным состоянием называется состояние тела, при котором во всех его точках объема Р, v и Т и все другие физические свойства одинаковы.

Совокупность изменений состояния т/д системы при переходе из одного состояния в другое называется т/д процессом. Т/д процессы бывают равновесные и неравновесные. Если процесс проходит через равновесные состояния, то он называется равновесным. В реальных случаях все процессы являются неравновесными. Если при любом т/д процессе изменение параметра состояния не зависит от вида процесса, а определяется начальным и конечным состоянием, то параметры состояния называются функцией состояния. Такими параметрами являются внутренняя энергия, энтальпия, энтропия и т.д.

Интенсивные параметры – это параметры не зависящие от массы системы (давление, температура).

Аддитивные (экстенсивные) параметры – параметры, значения которых пропорциональны массе системы (Объем, энергия, энтропия и т.д.).

## **Раздел 1. Основы термодинамики**

### **Тема 1.2. Первый закон термодинамики**

#### **Теплота и работа.**

Тела, участвующие при протекании т/д процесса обмениваются энергией. Передача энергии от одного тела к другому происходит двумя способами.

1-й способ реализуется при непосредственном контакте тел, имеющих различную температуру, путем обмена кинетической энергией между молекулами соприкасающихся тел либо лучистым переносом внутренней энергии излучающих тел путем э/м волн. При этом энергия передается от более нагретого к менее нагретому.

Количество энергии, переданной 1-м способом от одного тела к другому, называется количеством теплоты – Q [Дж], а способ – передача энергии в форме теплоты.

2-й способ связан с наличием силовых полей или внешнего давления. Для передачи энергии этим способом тело должно либо передвигаться в силовом поле, либо изменять свой объем под действием внешнего давления. То есть передачи энергии происходит при условии перемещения всего тела или его части в пространстве. При этом количество переданной энергии называется работой – L [Дж], а способ передачи энергии в форме работы.

Количество энергии, полученное телом в форме работы называется работой совершенной над телом, а отданную энергию – затраченной телом работой.

Количество теплоты, полученное (отданное) телом и работа, совершенная (затраченная) над телом, зависят от условий перехода тела из начального состояния в конечное, т.е. зависят от характера т/д процесса.

#### **Внутренняя энергия.**

В общем случае внутренней энергией называется совокупность всех видов энергий, заключенной в теле или системе тел. Эту энергию можно представить как сумму отдельных видов энергий: кинетической энергии молекул (поступательного и вращательного движения молекул); колебательного движения атомов в самой молекуле; энергии электронов; внутриядерной энергии; энергии взаимодействия между ядром молекулы и электронами; потенциальной энергии молекул.

В технической термодинамике рассматриваются только такие процессы, в которых изменяются кинетическая и потенциальная составляющие внутренней энергии. При этом знание абсолютных значений внутренней энергии не требуется. Поэтому внутренней энергией для

идеальных газов называют кинетическую энергию движения молекул и энергию колебательных движений атомов в молекуле, а для реальных газов дополнительно включают потенциальную энергию молекул.

Внутренняя энергия ( $U$ ) является функцией двух основных параметров состояния газа, т.е.  $U = f(P, T)$ ,  $U = f(v, T)$ ,  $U = f(P, v)$ . Каждому состоянию рабочего тела (системы) соответствует вполне определенное значение параметров состояния, то для каждого состояния газа будет характерна своя однозначная, вполне определенная величина внутренней энергии  $U$ . То есть  $U$  является функцией состояния газа. И разность внутренних энергий для двух каких-либо состояний рабочего тела или системы тел не будет зависеть от пути перехода от первого состояния во второе.

### **Первый закон термодинамики.**

Первый закон термодинамики является основой термодинамической теории и имеет огромное прикладное значение при исследовании термодинамических процессов. Этот закон является законом сохранения и превращения энергии:

*"Энергия не исчезает и не возникает вновь, она лишь переходит из одного вида в другой в различных физических процессах".*

Для термодинамических процессов закон устанавливает взаимосвязь между теплотой, работой и изменением внутренней энергии т/д системы:

*"Теплота, подведенная к системе, расходуется на изменение энергии системы и совершение работы".*

Уравнение первого закона термодинамики имеет следующий вид:

$$Q = (U_2 - U_1) + L, \quad (2.1)$$

где  $Q$  - количества теплоты подведенная (отведенная) к системе;

$L$  - работа, совершенная системой (над системой);

$(U_2 - U_1)$  - изменение внутренней энергии в данном процессе.

Если:

$Q > 0$  – теплота подводится к системе;

$Q < 0$  – теплота отводится от системы;

$L > 0$  – работа совершается системой;

$L < 0$  – работа совершается над системой.

Для единицы массы вещества уравнение первого закона термодинамики имеет вид:

$$q = Q / m = (u_2 - u_1) + l. \quad (2.2)$$

**В дальнейшем все формулы и уравнения будут даны в основном для единицы массы вещества.**

1-й закон т/д указывает, что для получения полезной работы ( $L$ ) в непрерывно действующем тепловом двигателе надо подводить (затрачивать) теплоту ( $Q$ ).

*"Двигатель, постоянно производящий работу и не потребляющий никакой энергии называется вечным двигателем I рода."*

Из этого можно высказать следующее определение 1-го закона термодинамики:

*"Вечный двигатель первого рода невозможен".*

### **Теплоемкость газа.**

Истинная теплоемкость рабочего тела определяется отношением количества подведенной (отведенной) к рабочему телу теплоты в данном т/д процессе к вызванному этим изменениям температуры тела.

$$C = dQ / dT, \quad [\text{Дж} / \text{К}]; \quad (2.3)$$

Теплоемкость зависит от внешних условий или характера процесса, при котором происходит подвод или отвод теплоты.

Различают следующие удельные теплоемкости:

$$\text{массовую} - c = C / m, \quad [\text{Дж} / \text{кг}]; \quad (2.4)$$

$$\text{молярную} - c_\mu = C / \nu, \quad [\text{Дж} / \text{моль}], \quad (2.5)$$

где  $\nu$  - количества вещества [моль];

объемную -  $c' = C / V = c \cdot \rho$ ,  $[\text{Дж} / \text{м}^3]$ , (2.6)

где  $\rho = m / V$  - плотность вещества.

Связь между этими теплоемкостями:

$$c = c' \cdot \nu = c_\mu / \mu,$$

где  $v = V/m$  - удельный объем вещества, [м<sup>3</sup>/кг];

$\mu = m / \nu$  - молярная (молекулярная) масса, [кг/моль].

Теплоемкость газов в большой степени зависит от тех условий, при которых происходит процесс их нагревания или охлаждения. Различают теплоемкости при постоянном давлении (изобарный) и при постоянном объеме (изохорный).

Таким образом различают следующие удельные теплоемкости:

$c_p, c_v$  - массовые изобарные и изохорные теплоемкости;

$c_{p\mu}, c_{v\mu}$  - молярные изобарные и изохорные теплоемкости;

$c'_p, c'_v$  - объемные изобарные и изохорные теплоемкости.

Между изобарными и изохорными теплоемкостями существует следующая зависимость:

$$c_p - c_v = R - \text{уравнение Майера; (2.7)}$$

$$c_{p\mu} - c_{v\mu} = R_\mu \text{ (2.8)}$$

Теплоемкость зависит от температуры, которые даются в справочных литературах в виде таблицы как средние теплоемкости в интервале температур от 0 до  $t_x$ . Для определения средней теплоемкости в интервале температур от  $t_1$  до  $t_2$  можно использовать следующую формулу:

$$c|_{t_1}^{t_2} = (c|_{t_2}^{t_2} t_2 - c|_{t_1}^{t_1} t_1) / (t_2 - t_1) \text{ (2.9)}$$

### **Универсальное уравнение состояния идеального газа.**

Идеальным газом называется такой газ, у которого отсутствуют силы взаимного притяжения и отталкивания между молекулами и пренебрегают размерами молекул. Все реальные газы при высоких температурах и малых давлениях можно практически считать как идеальные газы.

Уравнение состояния как для идеальных, как и для реальных газов описываются тремя параметрами по уравнению (1.7).

Уравнение состояния идеального газа можно вывести из молекулярно-кинетической теории или из совместного рассмотрения законов Бойля-Мариотта и Гей-Люссака.

Это уравнение было выведено в 1834 г. французским физиком Клапейроном и для 1 кг массы газа имеет вид:

$$P \cdot v = R \cdot T \text{ (2.10)}$$

где:  $R$  - газовая постоянная и представляет работу 1 кг газа в процессе при постоянном давлении и при изменении температуры на 1 градус.

Уравнение (2.7) называют термическим уравнением состояния или характеристическим уравнением.

Для произвольного количества газа массой  $m$  уравнение состояния будет:

$$P \cdot V = m \cdot R \cdot T \text{ (2.11)}$$

В 1874 г. Д.И.Менделеев основываясь на законе Дальтона ("*В равных объемах разных идеальных газов, находящихся при одинаковых температурах и давлениях, содержится одинаковое количество молекул*") предложил универсальное уравнение состояния для 1 кг газа, которую называют уравнением Клапейрона-Менделеева:

$$P \cdot v = R_\mu \cdot T / \mu \text{ (2.12)}$$

где:  $\mu$  - молярная (молекулярная) масса газа, (кг/кмоль);

$R_\mu = 8314,20$  Дж/кмоль (8,3142 кДж/кмоль) - универсальная газовая постоянная и представляет работу 1 кмоль идеального газа в процессе при постоянном давлении и при изменении температуры на 1 градус.

Зная  $R_\mu$  можно найти газовую постоянную  $R = R_\mu / \mu$ .

Для произвольной массы газа уравнение Клапейрона-Менделеева будет иметь вид:

$$P \cdot V = m \cdot R_\mu \cdot T / \mu \text{ (2.13)}$$

## Смесь идеальных газов.

Газовой смесью понимается смесь отдельных газов, вступающих между собой ни в какие химические реакции. Каждый газ (компонент) в смеси независимо от других газов полностью сохраняет все свои свойства и ведет себя так, как если бы он один занимал весь объем смеси.

Парциальное давление – это давление, которое имел бы каждый газ, входящий в состав смеси, если бы этот газ находился один в том же количестве, в том же объеме и при той же температуре, что и в смеси.

Газовая смесь подчиняется закону Дальтона:

|| Общее давление смеси газов равно сумме парциальных давлений || отдельных газов, составляющих смесь.

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n = \sum P_i, \quad (2.14)$$

где  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$  – парциальные давления.

Состав смеси задается объемными, массовыми и мольными долями, которые определяются соответственно по следующим формулам:

$$r_1 = V_1 / V_{\text{см}}; r_2 = V_2 / V_{\text{см}}; \dots r_n = V_n / V_{\text{см}}, \quad (2.15)$$

$$g_1 = m_1 / m_{\text{см}}; g_2 = m_2 / m_{\text{см}}; \dots g_n = m_n / m_{\text{см}}, \quad (2.16)$$

$$r_1 = v_1 / v_{\text{см}}; r_2 = v_2 / v_{\text{см}}; \dots r_n = v_n / v_{\text{см}}, \quad (2.17)$$

где  $V_1; V_2; \dots V_n; V_{\text{см}}$  – объемы компонентов и смеси;

$m_1; m_2; \dots m_n; m_{\text{см}}$  – массы компонентов и смеси;

$v_1; v_2; \dots v_n; v_{\text{см}}$  – количество вещества (киломолей) компонентов и смеси.

Для идеального газа по закону Дальтона:

$$r_1 = r_1'; r_2 = r_2'; \dots r_n = r_n'. \quad (2.18)$$

Так как  $V_1 + V_2 + \dots + V_n = V_{\text{см}}$  и  $m_1 + m_2 + \dots + m_n = m_{\text{см}}$ ,

$$\text{то } r_1 + r_2 + \dots + r_n = 1, \quad (2.19)$$

$$g_1 + g_2 + \dots + g_n = 1. \quad (2.20)$$

Связь между объемными и массовыми долями следующее:

$$g_1 = r_1 \mu_1 / \mu_{\text{см}}; g_2 = r_2 \mu_2 / \mu_{\text{см}}; \dots g_n = r_n \mu_n / \mu_{\text{см}}, \quad (2.21)$$

где:  $\mu_1, \mu_2, \dots \mu_n, \mu_{\text{см}}$  – молекулярные массы компонентов и смеси.

Молекулярная масса смеси:

$$\mu_{\text{см}} = \mu_1 r_1 + r_2 \mu_2 + \dots + r_n \mu_n. \quad (2.22)$$

Газовая постоянная смеси:

$$\begin{aligned} R_{\text{см}} &= g_1 R_1 + g_2 R_2 + \dots + g_n R_n = \\ &= R_{\mu} (g_1 / \mu_1 + g_2 / \mu_2 + \dots + g_n / \mu_n) = \\ &= 1 / (r_1 / R_1 + r_2 / R_2 + \dots + r_n / R_n). \end{aligned} \quad (2.23)$$

Удельные массовые теплоемкости смеси:

$$c_{p \text{ см}} = g_1 c_{p1} + g_2 c_{p2} + \dots + g_n c_{pn}. \quad (2.24)$$

$$c_{v \text{ см}} = g_1 c_{v1} + g_2 c_{v2} + \dots + g_n c_{vn}. \quad (2.25)$$

Удельные молярные (молекулярные) теплоемкости смеси:

$$c_{p \mu \text{ см}} = r_1 c_{p \mu 1} + r_2 c_{p \mu 2} + \dots + r_n c_{p \mu n}. \quad (2.26)$$

$$c_{v \mu \text{ см}} = r_1 c_{v \mu 1} + r_2 c_{v \mu 2} + \dots + r_n c_{v \mu n}. \quad (2.27)$$

## Раздел 1. Основы термодинамики Тема 1.3. Второй закон термодинамики.

Первый закон термодинамики утверждает, что теплота может превращаться в работу, а работа в теплоту и не устанавливает условий, при которых возможны эти превращения.

Превращение работы в теплоту происходит всегда полностью и безусловно. Обратный процесс превращения теплоты в работу при непрерывном её переходе возможен только при определенных условиях и не полностью. Теплота сама собой может переходить от более нагретых тел к холодным. Переход теплоты от холодных тел к нагретым сама собой не происходит. Для этого нужно затратить дополнительную энергию.

Таким образом для полного анализа явления и процессов необходимо иметь кроме первого закона термодинамики еще дополнительную закономерность. Этим законом является второй закон термодинамики. Он устанавливает, возможен или невозможен тот или иной процесс, в каком направлении протекает процесс, когда достигается термодинамическое равновесие и

при каких условиях можно получить максимальную работу.

Формулировки второго закона термодинамики.

Для существования теплового двигателя необходимы 2 источника – горячий источник и холодный источник (окружающая среда). Если тепловой двигатель работает только от одного источника то он называется вечным двигателем 2-го рода.

1 формулировка (Оствальда):

|| **"Вечный двигатель 2-го рода невозможен"**.

Вечный двигатель 1-го рода это тепловой двигатель, у которого  $L > Q_1$ , где  $Q_1$  - подведенная теплота. Первый закон термодинамики "позволяет" возможность создать тепловой двигатель полностью превращающий подведенную теплоту  $Q_1$  в работу  $L$ , т.е.  $L = Q_1$ . Второй закон накладывает более жесткие ограничения и утверждает, что работа должна быть меньше подведенной теплоты ( $L < Q_1$ ) на величину отведенной теплоты –  $Q_2$ , т.е.  $L = Q_1 - Q_2$ .

Вечный двигатель 2-го рода можно осуществить, если теплоту  $Q_2$  передать от холодного источника к горячему. Но для этого теплота самопроизвольно должна перейти от холодного тела к горячему, что невозможно. Отсюда следует 2-я формулировка (Клаузиуса):

|| **"Теплота не может самопроизвольно переходит от более**

|| **холодного тела к более нагретому"**.

Для работы теплового двигателя необходимы 2 источника – горячий и холодный. 3-я формулировка (Карно):

|| **"Там где есть разница температур, возможно совершение работ"**.

Все эти формулировки взаимосвязаны, из одной формулировки можно получить другую.

**Энтропия.**

Одним из функций состояния термодинамической системы является энтропия. Энтропией называется величина определяемая выражением:

$$dS = dQ / T. \text{ [Дж/К]} \quad (3.1)$$

или для удельной энтропии:

$$ds = dq / T. \text{ [Дж/(кг·К)]} \quad (3.2)$$

Энтропия есть однозначная функция состояния тела, принимающая для каждого состояния вполне определенное значение. Она является экстенсивным (зависит от массы вещества) параметром состояния и в любом термодинамическом процессе полностью определяется начальным и конечным состоянием тела и не зависит от пути протекания процесса.

Энтропию можно определить как функцию основных параметров состояния:

$$S = f_1(P, V) ; S = f_2(P, T) ; S = f_3(V, T) ; \quad (3.3)$$

или для удельной энтропии:

$$s = f_1(P, v) ; s = f_2(P, T) ; s = f_3(v, T) ; \quad (3.4)$$

Так как энтропия не зависит от вида процесса и определяется начальными и конечными состояниями рабочего тела, то находят только его изменение в данном процессе, которые можно найти по следующим уравнениям:

$$\Delta s = c_v \cdot \ln(T_2/T_1) + R \cdot \ln(v_2/v_1) ; \quad (3.5)$$

$$\Delta s = c_p \cdot \ln(T_2/T_1) - R \cdot \ln(P_2/P_1) ; \quad (3.6)$$

$$\Delta s = c_v \cdot \ln(P_2/P_1) + c_p \cdot \ln(v_2/v_1) . \quad (3.7)$$

Если энтропия системы возрастает ( $\Delta s > 0$ ), то системе подводится тепло.

Если энтропия системы уменьшается ( $\Delta s < 0$ ), то системе отводится тепло.

Если энтропия системы не изменяется ( $\Delta s = 0, s = \text{Const}$ ), то системе не подводится и не отводится тепло (адиабатный процесс).

**Цикл и теоремы Карно.**

Циклом Карно называется круговой цикл, состоящий из 2-х изотермических и из 2-х адиабатных процессов. Обратимый цикл Карно в  $p, v$ - и  $T, s$ - диаграммах показан на рис.3.1.

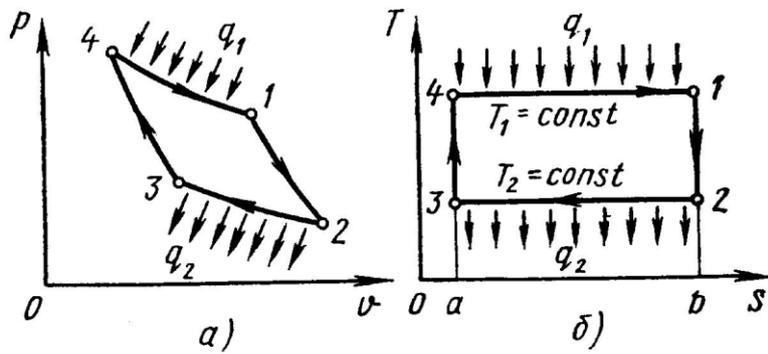


Рис. 3.1. Обратимый цикл Карно в  $p, v$ - (а) и  $T, s$ - (б) диаграммах

1-2 – обратимое адиабатное расширение при  $s_1 = \text{const}$ . Температура уменьшается от  $T_1$  до  $T_2$ .  
 2-3 – изотермическое сжатие, отвод теплоты  $q_2$  к холодному источнику от рабочего тела.  
 3-4 – обратимое адиабатное сжатие при  $s_2 = \text{const}$ . Температура повышается от  $T_3$  до  $T_4$ .  
 4-1 – изотермическое расширение, подвод теплоты  $q_1$  к горячего источника к рабочему телу.  
 Основной характеристикой любого цикла является *термический коэффициент полезного действия* (т.к.п.д.).

$$\eta_t = L_{\text{ц}} / Q_{\text{ц}}, \quad (3.8)$$

или

$$\eta_t = (Q_1 - Q_2) / Q_1.$$

Для обратимого цикла Карно т.к.п.д. определяется по формуле:

$$\eta_{\text{тк}} = (T_1 - T_2) / T_1. \quad (3.9)$$

Отсюда следует *1-я теорема Карно*:

|| "Термический к.п.д. обратимого цикла Карно не зависит от свойств рабочего тела и определяется только температурами источников".

Виз сравнения произвольного обратимого цикла и цикла Карно вытекает *2-я теорема Карно*:

|| "Обратимый цикл Карно является наивыгоднейшим циклом в || заданном интервале температур"

Т.е. т.к.п.д. цикла Карно всегда больше т.к.п.д. произвольного цикла:

$$\eta_{\text{тк}} > \eta_t. \quad (3.10)$$

## Раздел 1. Основы термодинамики

### Тема 1.4. Термодинамические процессы

#### Метод исследования т/д процессов.

Как сказано выше первый закон т/д устанавливает взаимосвязь между количеством теплоты, внутренней энергией и работой. При этом, количество теплоты подводимое к телу или отводимое от тела зависит от характера процесса.

К основным т/д процессам относятся: изохорный, изотермический, изобарный и адиабатный.

Для всех этих процессов устанавливается общий метод исследования, который заключается в следующем:

- выводится уравнение процесса кривой  $Pv$  и  $TS$  – диаграммах;
- устанавливается зависимость между основными параметрами рабочего тела в начале и конце процесса;
- определяется изменение внутренней энергии по формуле, справедливой для всех процессов идеального газа:

$$\Delta u = c_{\text{VM}|0}^{t_2} \cdot t_2 - c_{\text{VM}|0}^{t_1} \cdot t_1. \quad (4.1)$$

или при постоянной теплоемкости  $\Delta U = m \cdot c_v \cdot (t_2 - t_1)$ ; (4.2)

вычисляется работа:  $L = P \cdot (V_2 - V_1)$ ; (4.3)

определяется количество теплоты, участвующее в процессе:

$$q = c_x \cdot (t_2 - t_1); \quad (4.4)$$

определяется изменение энтальпии по формуле, справедливой для всех процессов идеального газа:

$$\Delta i = (i_2 - i_1) = c_{pm}|_0^{t_2} \cdot t_2 - c_{pm}|_0^{t_1} \cdot t_1, \quad (4.5)$$

или при постоянной теплоемкости:  $\Delta i = c_p \cdot (t_2 - t_1); \quad (4.6)$

определяется изменение энтропии:

$$\Delta s = c_v \cdot \ln(T_2/T_1) + R \cdot \ln(v_2/v_1); \quad (4.7)$$

$$\Delta s = c_p \cdot \ln(T_2/T_1) - R \cdot \ln(P_2/P_1); \quad (4.8)$$

$$\Delta s = c_v \cdot \ln(T_2/T_1) + c_p \cdot \ln(v_2/v_1). \quad (4.9)$$

Все процессы рассматриваются как обратимые.

### Изопрцессы идеального газа.

1). Изохорный процесс (Рис.4.1).

$$v = \text{Const}, \quad v_2 = v_1. \quad (4.10)$$

Уравнение состояния процесса:

$$P_2 / P_1 = T_2 / T_1. \quad (4.11)$$

Так как  $v_2 = v_1$ , то  $l = 0$  и уравнение 1-го закона т/д имеет вид:

$$q = \Delta u = c_v \cdot (t_2 - t_1); \quad (4.12)$$

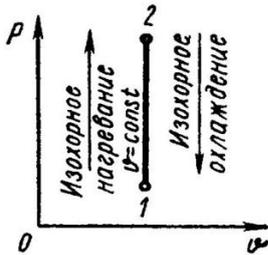


Рис. 4.1. Изохорный процесс

2). Изобарный процесс (Рис.4.2).

$$P = \text{Const}, \quad P_2 = P_1$$

Уравнение состояния процесса:

$$v_2 / v_1 = T_2 / T_1, \quad (4.13)$$

Работа этого процесса:

$$l = P \cdot (v_2 - v_1). \quad (4.14)$$

Уравнение 1-го закона т/д имеет вид:

$$q = \Delta u + l = c_p \cdot (t_2 - t_1); \quad (4.15)$$

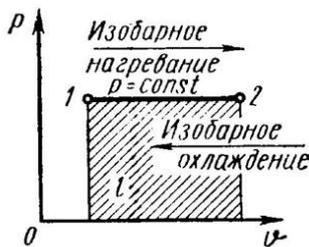


Рис. 4.2. Изобарный процесс идеального газа

3). Изотермический процесс (Рис.4.3).

$$T = \text{Const}, \quad T_2 = T_1$$

Уравнение состояния:

$$P_1 / P_2 = v_2 / v_1, \quad (4.16)$$

Так как  $T_2 = T_1$ , то  $\Delta u = 0$  и уравнение 1-го закона т/д будет иметь вид:

$$q = l = R \cdot T \cdot \ln(v_2/v_1), \quad (4.17)$$

или  $q = l = R \cdot T \cdot \ln(P_1/P_2), \quad (4.18)$

где  $R = R_{\eta} / \eta$  – газовая постоянная [Дж/(кг·К)].

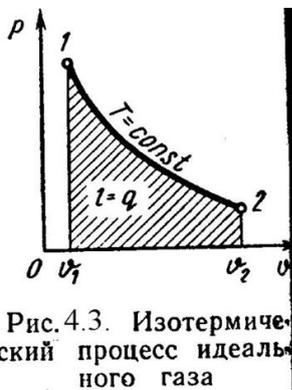


Рис. 4.3. Изотермический процесс идеального газа

4). Адиабатный процесс (Рис.4.4).

В данном процессе не подводится и не отводится тепло, т.е.  $q=0$ .

Уравнение состояния:

$$P \cdot v^\lambda = \text{Const}, \quad (4.19)$$

где  $\lambda = c_p / c_v$  – показатель адиабаты.

Уравнение 1-го закона т/д будет иметь вид:

$$l = -\Delta u = -c_v \cdot (t_2 - t_1) = c_v \cdot (t_1 - t_2), \quad (4.20)$$

или

$$l = R \cdot (T_1 - T_2) / (\lambda - 1); \quad (4.21)$$

$$l = R \cdot T_1 \cdot [1 - (v_1 / v_2)^{\lambda-1}] / (\lambda - 1); \quad (4.22)$$

$$l = R \cdot T_2 \cdot [1 - (P_2 / P_1)^{(\lambda-1)/\lambda}] / (\lambda - 1). \quad (4.23)$$

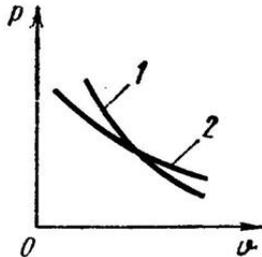


Рис. 4.4. Взаимное расположение адиабаты и изотермы идеального газа в p-v-диаграмме

**Политропный процесс.**

Политропным процессом называется процесс, все состояния которого удовлетворяются условию:

$$P \cdot v^n = \text{Const}, \quad (4.24)$$

где  $n$  – показатель политропы, постоянная для данного процесса.

Изобарный, изохорный, изотермический и адиабатный процессы являются частными случаями политропного процесса (Рис.4.5):

при  $n = \pm \infty$   $v = \text{Const}$ , (изохорный),

$n = 0$   $P = \text{Const}$ , (изобарный),

$n = 1$   $T = \text{Const}$ , (изотермический),

$n = \lambda$   $P \cdot v = \text{Const}$ , (адиабатный).

Работа политропного процесса определяется аналогично как при адиабатном процессе:

$$l = R \cdot (T_1 - T_2) / (n - 1); \quad (4.25)$$

$$l = R \cdot T_1 \cdot [1 - (v_1 / v_2)^{n-1}] / (n - 1); \quad (4.26)$$

$$l = R \cdot T_2 \cdot [1 - (P_2 / P_1)^{(n-1)/n}] / (n - 1). \quad (4.27)$$

Теплота процесса:

$$q = c_n \cdot (T_2 - T_1), \quad (4.28)$$

где  $c_n = c_v \cdot (n - \lambda) / (n - 1)$  – массовая теплоемкость (4.29) политропного процесса.

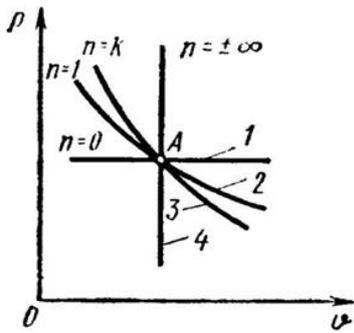


Рис. 4.5. Политропные процессы идеального газа:  
 1 — изобара, 2 — изотерма, 3 — адиабата, 4 — изохора

## Раздел 2. Техническая термодинамика

### Тема 2.1. Термодинамические циклы ДВС

Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания подразделяют на три группы:

- с подводом теплоты при постоянном объеме (карбюраторные ДВС);
- с подводом теплоты при постоянном давлении (компрессорные дизели);
- со смещанным подводом теплоты при постоянном объеме (безкомпрессорные дизели);

Основными характеристиками или параметрами любого цикла теплового двигателя являются следующие безразмерные величины:

степень сжатия (отношение удельных объемов рабочего тела в начале и конце сжатия)

$$\varepsilon = v_1 / v_2, \quad (7.5)$$

степень повышения давления (отношение давлений в конце и в начале изохорного процесса подвода теплоты)

$$\lambda = P_3 / P_2, \quad (7.6)$$

степень предварительного расширения или степень изобарного расширения (отношение удельных объемов в конце и в начале изохорного процесса подвода теплоты)

$$\rho = v_3 / v_2. \quad (7.7)$$

1). Рассмотрим цикл ДВС с подводом теплоты при постоянном объеме на примере четырехтактного двигателя.

Диаграмма реального двигателя представлена на рис.7.3.

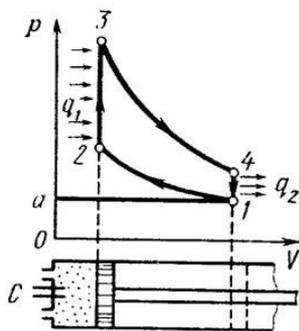


Рис. 7.3. Цикл двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при постоянном объеме

- а-1 (1 такт) – в цилиндр через всасывающий клапан поступает смесь воздуха и паров горючего (нетермодинамический процесс);  
 1-2 (2 такт) – адиабатное сжатие (повышается температура);  
 2-3 – сгорание горючей смеси, давление быстро возрастает при постоянном объеме (подвод теплоты  $q_1$ );

3-4 (3 такт) – адиабатное расширение (рабочий процесс, совершается полезная работа);  
 4-а – открывается выхлопной клапан и отработанные газы покидают цилиндр давление цилиндра падает (отводится тепло  $q_2$ ).

1-а (4 такт) – выталкивание оставшихся в цилиндре газов.

Затем процесс повторяется.

Описанный процесс является необратимым (наличие трения, химической реакции в рабочем теле, конечные скорости поршня, теплообмен при конечной разности температур и т.п.).

Для анализа теории тепловых машин термодинамика рассматривает идеальные циклы обратимые циклы. Диаграмма идеального процесса двигателя внутреннего сгорания показана на рис.7.4.

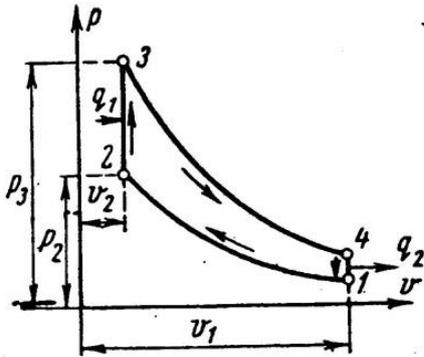


Рис. 7.4.

Из этой диаграммы выводится формула для термического к.п.д. цикла с подводом теплоты при постоянном объеме, который имеет следующий вид:

$$\eta_t = 1 - 1/\varepsilon^\gamma, \quad (7.8)$$

где:  $\varepsilon$  – степень сжатия (основной показатель работы двигателя, чем выше  $\varepsilon$ , тем выше экономичность ДВС);

$\gamma$  – показатель адиабаты.

2). Идеальный цикл ДВС со смешанным подводом теплоты при постоянном объеме (безкомпрессорные дизели). Диаграмма цикла показана на рис.7.5.

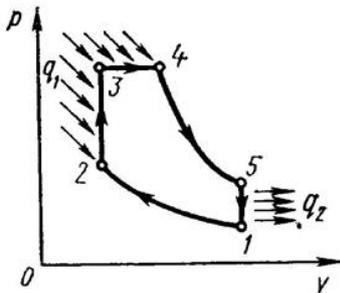


Рис. 7.5. Цикл двигателя внутреннего сгорания со смешанным подводом теплоты

1-2 - чистый воздух с температурой  $T_1$  сжимается до температуры  $T_2$ , которая больше температуры воспламенения топлива. В этот момент в цилиндр через форсунки под давлением впрыскивается топливо.

2-3 – горючая смесь самовоспламеняется и к рабочему телу подводится тепло  $q_1'$ , давление повышается до  $P_3$ .

3-4 – поршень перемещается обратно, поступление и сгорание топлива продолжается при постоянном давлении и подводится тепло  $q_1''$ .

4-5 – поршень продолжает перемещаться в нижнюю мертвую точку, давление падает (адиа-

батное расширение);

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

Термический к.п.д. цикла определяется по формуле:

$$\eta_t = \lambda - (\lambda \cdot \rho^\gamma - 1) / \varepsilon^{\gamma-1} \cdot [(\lambda - 1) + \gamma \cdot \lambda \cdot (\rho - 1)] \quad (7.9)$$

Цикл двигателей с подводом теплоты при постоянном давлении широкое применение не нашли, так как у этих циклов очень большой коэффициент сжатия.

## Раздел 2. Техническая термодинамика

### Тема 2.2. Термодинамический цикл ГТУ

Основными недостатками поршневых двигателей внутреннего сгорания являются ограниченность их мощности и невозможность адиабатного расширения рабочего тела до атмосферного давления, которые отсутствуют в газотурбинных установках. ГТУ рабочим телом являются продукты сгорания жидкого или газообразного топлива.

На рис.7.6 дана схема простейшей газотурбинной установки со сгоранием топлива при постоянном давлении. Топливным насосом 5 и компрессором 4 топливо и воздух через форсунки 6 и 7 поступают в камеру сгорания 1. Из камеры продукты сгорания направляются в комбинированные сопла 2, где они расширяются, и поступают на лопатки газовой турбины 3.

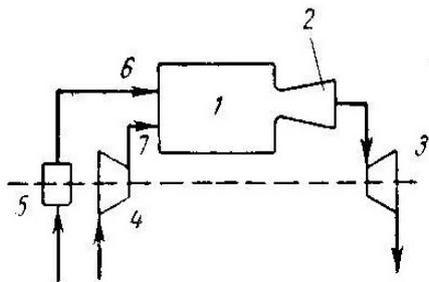


Рис. 7.6.

На рис.7.7 и рис.7.8 представлены идеальный цикл ГТУ на PV и TS диаграммах.

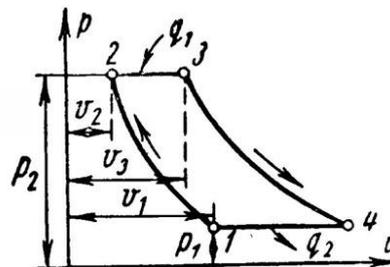


Рис. 7.7.

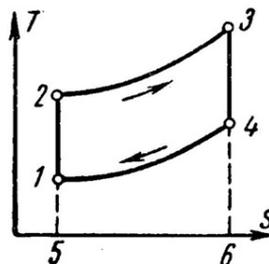


Рис. 7.8.

1-2 - адиабатное сжатие до давления  $P_2$ ;

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

3-4 – адиабатное расширение до первоначального давления  $P_1$ ;

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

Характеристиками цикла являются:  
степень повышения давления -  $\lambda = P_2 / P_1$  ;  
степень изобарного расширения -  $\rho = v_3 / v_2$  .

Работа турбины:

$$l_T = h_3 - h_4 . (7.10)$$

Работа компрессора:

$$l_H = h_2 - h_1 . (7.11)$$

Полезная работа ГТУ равна разности работ турбины и компрессора:

$$L_{ГТУ} = l_T - l_K . (7.12)$$

Термический к.п.д. цикла ГТУ имеет вид:

$$\eta_t = 1 - 1 / \lambda^{(\gamma-1)/\gamma} . (7.13)$$

Теоретическая мощность газовой турбины, компрессора и установки (ГТУ):

$$N_T = l_T \cdot D / 3600 = (h_3 - h_4) \cdot D / 3600 , (7.14)$$

$$N_K = l_K \cdot D / 3600 = (h_2 - h_1) \cdot D / 3600 , (7.15)$$

$$N_{ГТУ} = L_{ГТУ} \cdot D / 3600 = [(h_3 - h_4) (h_2 - h_1) ] \cdot D / 3600 . (7.16)$$

Действительный цикл ГТУ отличается от теоретического наличием потерь на трение и вихреобразование в турбине и компрессоре. Эффективными методами повышения экономичности газотурбинных установок являются: регенерация теплоты, ступенчатое сжатие и расширение рабочего тела и пр.

## Раздел 2. Техническая термодинамика

### Тема 2.3. Термодинамические циклы комбинированных двигателей

Комбинированный ДВС (рис. 7)- поршневая часть плюс газовая турбина.

Преимущества: удачное сочетание: в первом эффективно используется тепло рабочего тела при малых скоростях <sup>9</sup> и больших P-давлениях и наоборот.

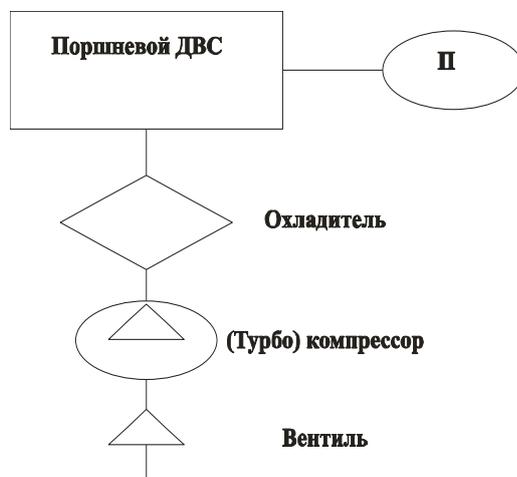


Рис. 7 – Комбинированный ДВС.

Классификация:

- по месту и методу присоединения потребителя (комбинированный ДВС с ведущей поршневой частью и дополнительной газовой турбиной);
- по типу связи (с механической, гидравлической, газовой и комбинированной связью);
- по количеству ступеней наддува (1- и 2-х ступенчатый наддув).

**Наддув** – повышение мощности (форсирование двигателя путем повышения давления воздуха или смеси).

**Цикл комбинированного двигателя.**

Цикл с продольным расширением в газовой турбине 5-6 (рис. 8) и сжатие свежего заряда в компрессоре 1-6.

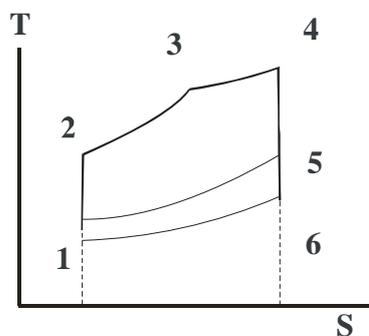


Рис. 8 – Цикл комбинированного двигателя

Коэффициент полезного действия (КПД)-цикловое:

$$\eta_l = 1 - \frac{1}{\varepsilon_0^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \cdot p^k - 1}{(\lambda - 1) + k \cdot \lambda \cdot (\rho - 1)}$$

Среднее цикловое давление:

$$P_l = \frac{P_0 \cdot \varepsilon_0^k \cdot [\lambda - 1 + k \cdot \lambda \cdot (\rho - 1)]}{(k - 1) \cdot (\varepsilon - 1)}, \text{ где } k - \text{показатель адиабаты; } \varepsilon - \text{степень сжатия; } \lambda -$$

степень повышения давления;  $\rho$  - степень предварительного расширения;  $P_0$  - начальное давление.

## Двигатель Стирлинга

Принципиальная схема двигателя Стирлинга представлена на рисунке 9.

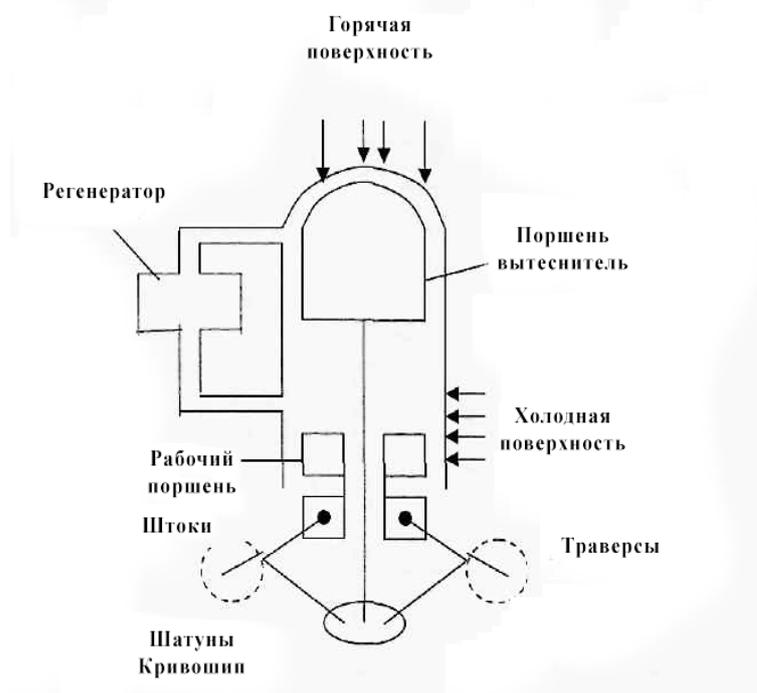


Рис. 9 – Принципиальная схема двигателя Стирлинга

Преимущества двигателя Стирлинга:

- 1) КПД больше, чем у дизеля;
- 2) Экономичность топлива.

Недостатки:

- 1) потребность в тепловой энергии;
- 2) сложная конструкция, большие размеры.

## Цикл работы двигателя Стирлинга.

Цикл работы двигателя Стирлинга представлен на рисунке.10.

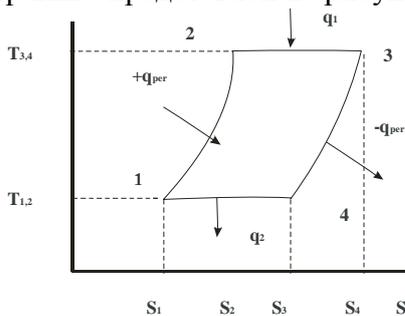


Рис. 10 - Цикл Стирлинга

При цикле происходят следующие процессы:

**1-2:** Поршень движется вверх, вытеснитель стоит в верхнем положении, рабочее тело сжимается, теплота отводится к холодильнику;

**2-3:** Поршень стоит в верхнем положении, вытеснитель движется вниз, рабочее тело перемещается в нагреватель, давление отдают;

**3-4:** Поршень движется вниз, вытеснитель стоит в нижнем положении, рабочее тело, совершает работу, теплота передается нагревателю;

**4-1:** Поршень стоит внизу, вытеснитель движется вверх, рабочее тело перемещается в холодильник вытеснителем, давление растет.

Параметры, характеризующие цикл:

1)  $\eta = 1 - \frac{T_{1,2}}{T_{3,4}}$  - КПД цикла ;

2) Степень изометрического расширения -  $\lambda$  ;

3) Среднее давление цикла  $P_l = P_{\max} * \frac{\ln \lambda}{\lambda - 1} * \eta_l$ , где  $P_{\max}$  - максимальное давление цикла.

## Раздел 3. Основы теории теплообмена

### Тема 3.1. Основные сведения теории теплообмена. Теплопроводность

Теория теплообмена изучает процессы распространения теплоты в твердых, жидких и газообразных телах. Перенос теплоты может передаваться тремя способами:

- теплопроводностью;
- конвекцией;
- излучением (радиацией).

Процесс передачи теплоты теплопроводностью происходит при непосредственном контакте тел или частицами тел с различными температурами и представляет собой молекулярный процесс передачи теплоты. При нагревании тела, кинетическая энергия его молекул возрастает и частицы более нагретой части тела, сталкиваясь с соседними молекулами, сообщают им часть своей кинетической энергии.

Конвекция – это перенос теплоты при перемещении и перемешивании всей массы неравномерно нагретых жидкости или газа. При этом, перенос теплоты зависит от скорости движения жидкости или газа прямо пропорционально. Этот вид передачи теплоты сопровождается всегда теплопроводностью. Одновременный перенос теплоты конвекцией и теплопроводностью называется конвективным теплообменом.

В инженерных расчетах часто определяют конвективный теплообмен между потоками жидкости или газа и поверхностью твердого тела. Этот процесс конвективного теплообмена называют конвективной теплоотдачей или просто теплоотдачей.

Процесс передачи теплоты внутренней энергии тела в виде электромагнитных волн называется излучением (радиацией). Этот процесс происходит в три стадии: превращение части внутренней энергии одного из тел в энергию электромагнитных волн, распространение э/м волн в пространстве, поглощение энергии излучения другим телом. Совместный теплообмен

излучением и теплопроводностью называют радиационно-кондуктивным теплообменом. Совокупность всех трех видов теплообмена называется сложным теплообменом. Процессы теплообмена могут происходить в различных средах: чистых веществах и разных смесях, при изменении и без изменения агрегатного состояния рабочих сред и т.д. В зависимости от этого теплообмен протекает по-разному и описывается различными уравнениями. Процесс переноса теплоты может сопровождаться переносом вещества (массообмен). Например испарение воды в воздух, движение жидкостей или газов в трубопроводах и т.п. и т.д. Тогда процесс теплообмена усложняется, так как теплота дополнительно переносится с массой движущегося вещества.

Будем рассматривать только однородные и изотропные тела, т.е. такие тела, которые обладают одинаковыми физическими свойствами по всем направлениям. При передаче теплоты в твердом теле, температура тела будет изменяться по всему объему тела и во времени. Совокупность значений температуры в данный момент времени для всех точек изучаемого пространства называется температурным полем:

$$t = f(x, y, z, \tau), \quad (9.1)$$

где:  $t$  – температура тела;  
 $x, y, z$  – координаты точки;  
 $\tau$  – время.

Такое температурное поле называется нестационарным  $\partial t / \partial \tau \neq 0$ , т.е. соответствует неустановившемуся теплопроводному режиму теплопроводности

Если температура тела функция только координат и не изменяется с течением времени, то температурное поле называется стационарным:

$$t = f(x, y, z), \quad \partial t / \partial \tau = 0 \quad (9.2)$$

Уравнение двухмерного температурного поля:

для нестационарного режима:

$$t = f(x, y, \tau); \quad \partial t / \partial z = 0 \quad (9.3)$$

для стационарного режима:

$$t = f(x, y), \quad \partial t / \partial z = 0; \quad \partial t / \partial \tau = 0 \quad (9.4)$$

Уравнение одномерного температурного поля:

для нестационарного режима:

$$t = f(x, \tau); \quad \partial t / \partial y = \partial t / \partial z = 0; \quad \partial t / \partial \tau \neq 0 \quad (9.5)$$

для стационарного режима:

$$t = f(x); \quad \partial t / \partial y = \partial t / \partial z = 0; \quad \partial t / \partial \tau = 0 \quad (9.6)$$

Изотермической поверхностью называется поверхность тела с одинаковыми температурой.

Рассмотрим две изотермические поверхности (Рис.9.1) с температурами  $t$  и  $t + \Delta t$ . Градиентом температуры называют предел отношения изменения температуры  $\Delta t$  к расстоянию между изотермами по нормали  $\Delta n$ , когда стремится к нулю:

$$\text{grad}t = |\mathbf{grad}t| = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} [\Delta t / \Delta n]_{\Delta n \rightarrow 0} = \partial t / \partial n \quad (9.7)$$

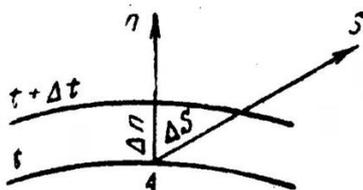


Рис. 9.1.

Температурный градиент – это вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры и численно равный производной температуры  $t$  по нормали  $n$ :

$$\mathbf{grad}t = \partial t / \partial n \mathbf{n}_0, \quad (9.7^*)$$

где:  $\mathbf{n}_0$  – единичный вектор.

Количество теплоты, проходящее через изотермическую поверхность  $F$  в единицу времени называется тепловым потоком –  $Q$ , [ $\text{Вт} = \text{Дж/с}$ ].

Тепловой поток, проходящий через единицу площади называют плотностью теплового потока –  $q = Q / F$ ,

[Вт/м<sup>2</sup>]

Для твердого тела уравнение теплопроводности подчиняется закону Фурье:

**||Тепловой поток, передаваемая теплопроводностью,|| пропорциональна градиенту температуры и площади сечения, ||перпендикулярного направлению теплового потока.**

$$Q = -\lambda \cdot F \cdot \partial t / \partial n, \quad (9.8)$$

или

$$\mathbf{q} = -\lambda \cdot \partial t / \partial n \cdot \mathbf{n}_0 = -\lambda \cdot \mathbf{grad}t, \quad (9.9)$$

где:  $\mathbf{q}$  – вектор плотности теплового потока;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, [Вт/(м·К)].

Численное значение вектора плотности теплового потока равна:

$$q = -\lambda \cdot \partial t / \partial n = -\lambda \cdot |\mathbf{grad}t|, \quad (9.10)$$

где:  $|\mathbf{grad}t|$  – модуль вектора градиента температуры.

Коэффициент теплопроводности является физическим параметром вещества, характеризующим способность тела проводить теплоту, Она зависит от рода вещества, давления и температуры. Также на её величину влияет влажность вещества. Для большинства веществ коэффициент теплопроводности определяются опытным путем и для технических расчетов берут из справочной литературы.

Дифференциальное уравнение теплопроводности для трехмерного нестационарного температурного поля имеет следующий вид:

✘

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \rho \cdot c \cdot \frac{\partial t}{\partial t} \right) = \text{div} (\lambda \cdot \mathbf{grad}t) + q_{\text{вн}}$$

(9.11)

где:  $a = \lambda / (\rho \cdot c)$  – коэффициент температуропроводности [м<sup>2</sup>/с], характеризует скорость изменения температуры.

Для стационарной задачи, дифференциальное уравнение имеет вид:

✘

$$\text{div} (\lambda \cdot \mathbf{grad}t) + q_{\text{вн}} = 0$$

(9.12)

## Стационарная теплопроводность через плоскую стенку.

1). Однородная плоская стенка (Рис.9.2).

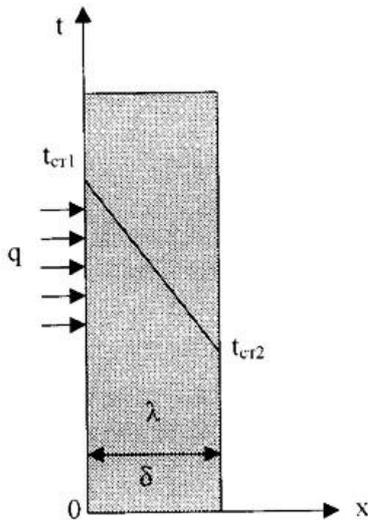


Рис.9.2. Однородная плоская стенка.

Температуры поверхностей стенки –  $t_{ct1}$  и  $t_{ct2}$ .

Плотность теплового потока:

$$q = -\lambda \cdot \partial t / \partial n = -\lambda \cdot \partial t / \partial x = -\lambda \cdot (t_{ct2} - t_{ct1}) / (x_{ct2} - x_{ct1}) \cdot$$

или

$$q = \lambda \cdot (t_{ct2} - t_{ct1}) / (x_{ct2} - x_{ct1}) \cdot \Delta t / \Delta x \quad (9.13)$$

 температурный напор;

 толщина стенки.

Тогда

$$q = \lambda/\delta \cdot (t_{ct1} - t_{ct2}) = \lambda/\delta \cdot \Delta t, \quad (9.14)$$

Если  $R = \delta/\lambda$  - термическое сопротивление теплопроводности стенки  $[(m^2 \cdot K)/Вт]$ , то плотность теплового потока:

$$q = (t_{ct1} - t_{ct2})/R. \quad (9.15)$$

Общее количество теплоты, которое передается через поверхность  $F$  за время  $\tau$  определяется:

$$Q = q \cdot F \cdot \tau = (t_{ct1} - t_{ct2})/R \cdot F \cdot \tau. \quad (9.16)$$

Температура тела в точке с координатой  $x$  находится по формуле:

$$t_x = t_{ct1} - (t_{ct1} - t_{ct2}) \cdot x/\delta. \quad (9.17)$$

## 2). Многослойная плоская стенка.

Рассмотрим 3-х слойную стенку (Рис.9.3). Температура наружных поверхностей стенок  $t_{ct1}$  и  $t_{ct2}$ , коэффициенты теплопроводности слоев  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ , толщина слоев  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ .

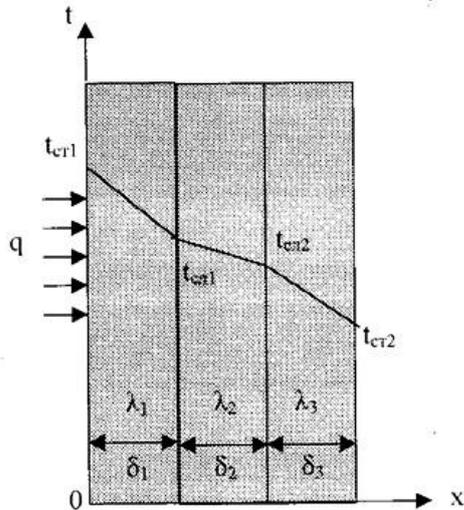


Рис.9.3. Многослойная плоская стенка.

Плотности тепловых потоков через каждый слой стенки:

$$q = \lambda_1/\delta_1 \cdot (t_{ct1} - t_{сл1}), \quad (9.18)$$

$$q = \lambda_2/\delta_2 \cdot (t_{сл1} - t_{сл2}), \quad (9.19)$$

$$q = \lambda_3/\delta_3 \cdot (t_{сл2} - t_{ct2}), \quad (9.20)$$

Решая эти уравнения, относительно разности температур и складывая, получаем:

$$q = (t_1 - t_4)/(\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \delta_3/\lambda_3) = (t_{ct1} - t_{ct2})/R_o, \quad (9.21)$$

где:  $R_o = (\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \delta_3/\lambda_3)$  – общее термическое сопротивление теплопроводности многослойной стенки.

Температура слоев определяется по следующим формулам:

$$t_{сл1} = t_{ct1} - q \cdot (\delta_1/\lambda_1). \quad (9.22)$$

$$t_{сл2} = t_{сл1} - q \cdot \delta_2/\lambda_2. \quad (9.23)$$

## Раздел 3. Основы теории теплообмена

### Тема 3.2. Конвекция. Теплопередача

Конвективным теплообменом называется одновременный перенос теплоты конвекцией и теплопроводностью.

В инженерных расчетах часто определяют конвективный теплообмен между потоками жидкости или газа и поверхностью твердого тела. Этот процесс конвективного теплообмена называют конвективной теплоотдачей или просто теплоотдачей.

Основными факторами, влияющими на процесс теплоотдачи являются следующие:

#### 1). Природа возникновения движения жидкости вдоль поверхности стенки.

Самопроизвольное движение жидкости (газа) в поле тяжести, обусловленное разностью плотностей её горячих и холодных слоев, называют свободным движением (естественная конвекция).

Движение, создаваемое вследствие разности давлений, которые создаются насосом, вентилятором и другими устройствами, называется вынужденным (вынужденная конвекция).

## 2). Режим движения жидкости.

Упорядоченное, слоистое, спокойное, без пульсаций движение называется ламинарным.

Беспорядочное, хаотическое, вихревое движение называется турбулентным.

## 3). Физические свойства жидкостей и газов.

Большое влияние на конвективный теплообмен оказывают следующие физические параметры: коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ), удельная теплоемкость ( $c$ ), плотность ( $\rho$ ), коэффициент температуропроводности ( $a = \lambda/c_p \cdot \rho$ ), коэффициент динамической вязкости ( $\mu$ ) или кинематической вязкости ( $\nu = \mu/\rho$ ), температурный коэффициент объемного расширения ( $\beta = 1/T$ ).

4). Форма (плоская, цилиндрическая), размеры и положение поверхности (горизонтальная, вертикальная).

### **Закон Ньютона-Рихмана.**

Процесс теплообмена между поверхностью тела и средой описывается законом Ньютона-Рихмана, которая гласит, что количество теплоты, передаваемая конвективным теплообменом прямо пропорционально разности температур поверхности тела ( $t_{ст}$ ) и окружающей среды ( $t_{ж}$ ):

$$Q = \alpha \cdot (t_{ст} - t_{ж}) \cdot F, \quad (10.1)$$

или

$$q = \alpha \cdot (t_{ст} - t_{ж}), \quad (10.2)$$

где: коэффициент теплоотдачи [ $Вт/(м^2К)$ ], характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой.

Факторы, которые влияют на процесс конвективного теплообмена, включают в этот коэффициент теплоотдачи. Тогда коэффициент теплоотдачи является функцией этих параметров и можно записать эту зависимость в виде следующего уравнения:

$$\alpha = f_1(X; \Phi; l_0; x_c; y_c; z_c; w_0; \theta; \lambda; a; c_p; \rho; \nu; \beta), \quad (10.3)$$

где:  $X$  – характер движения среды (свободная, вынужденная);

$\Phi$  – форма поверхности;

$l_0$  – характерный размер поверхности (длина, высота, диаметр и т.д.);

$x_c; y_c; z_c$  – координаты;

$w_0$  – скорость среды (жидкость, газ);

$\theta = (t_{ст} - t_{ж})$  – температурный напор;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности среды;

$a$  – коэффициент температуропроводности среды;

$c_p$  – изобарная удельная теплоемкость среды;

$\rho$  – плотность среды;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости среды;

$\beta$  – температурный коэффициент объемного расширения среды.

Уравнение (10.3) показывает, что коэффициент теплоотдачи величина сложная и для её определения невозможно дать общую формулу. Поэтому для определения коэффициента теплоотдачи применяют экспериментальный метод исследования.

Достоинством экспериментального метода является: достоверность получаемых результатов; основное внимание можно сосредоточить на изучении величин, представляющих наибольший практический интерес.

Основным недостатком этого метода является, что результаты данного эксперимента не могут быть использованы, применительно к другому явлению, которое в деталях отличается от изученного. Поэтому выводы, сделанные на основании анализа результатов данного экспериментального исследования, не допускают распространения их на другие явления. Следовательно, при экспериментальном методе исследования каждый конкретный случай должен служить самостоятельным объектом изучения.

### **Краткие сведения из теории подобия.**

Для аналитического метода исследования конвективного теплообмена нужно решить систему дифференциальных уравнений, состоящий из:

1). Уравнения энергии (закон сохранения энергии):

где:  $q_v$  – внутренний источник тепла.

или

4). Уравнение теплообмена (условие теплообмена на границе твердого тела и среды):

$$\alpha = -\lambda/\Delta t \cdot \partial t / \partial r_{n=0}. \quad (10.11)$$

Данные уравнения записаны для несжимаемой жидкости ( $\rho = \text{Const}$ ).

Решение этих дифференциальных уравнений сложная и трудоемкая задача, и она возможна при ограниченных простых случаях. Поэтому при исследовании конвективного теплообмена применяют метод теории подобия.

Теория подобия – это наука о подобных явлениях. Подобными явлениями называются такие физические явления, которые одинаковы качественно по форме и по содержанию, т.е. имеют одну физическую природу, развиваются под действием одинаковых сил и описываются одинаковыми по форме дифференциальными уравнениями и краевыми условиями.

Обязательным условием подобия физических явлений должно быть геометрическое подобие систем, где эти явления протекают. Два физических явления будут подобны лишь в том случае, если будут подобны все величины, которые характеризуют их.

Для всех подобных систем существуют безразмерные комплексы величин, которые называются критериями подобия.

Основные положения теории подобия формулируют в виде 3-х теорем подобия.

1 теорема: Подобные явления имеют одинаковые критерии подобия.

2 теорема: Любая зависимость между переменными, характеризующая какие-либо явления, может быть представлена, в форме зависимости между критериями подобия, составленными из этих переменных, которая будет называться критериальным уравнением.

3 теорема: Два явления подобны, если они имеют подобные условия однозначности и численно одинаковые определяющие критерии подобия.

Условиями однозначности являются:

- наличие геометрического подобия систем;
- наличие одинаковых дифференциальных уравнений;
- существование единственного решения уравнения при заданных граничных условиях;
- известны численные значения коэффициентов и физических параметров.

## **Критериальные уравнения конвективного теплообмена.**

Используя теорию подобия из системы дифференциальных уравнений 10.4, 10.9, 10.10 и 10.11 можно получить уравнение теплоотдачи (10.3) для конвективного теплообмена в случае отсутствия внутренних источников тепла в следующем критериальной форме:

$$Nu = f_2(X; \Phi; X_0; Y_0; Z_0; Re; Gr; Pr) , (10.12)$$

где:  $X_0; Y_0; Z_0$  – безразмерные координаты;

$Nu = \alpha \cdot l_0 / \lambda$  - критерий Нуссельта (безразмерный коэффициент теплоотдачи), характеризует теплообмен между поверхностью стенки и жидкостью (газом);

$Re = w \cdot l_0 / \nu$  - критерий Рейнольдса, характеризует соотношение сил инерции и вязкости и определяет характер течения жидкости (газа);

$Gr = (\beta \cdot g \cdot l_0^3 \cdot \Delta t) / \nu^2$  - критерий Грасгофа, характеризует подъемную силу, возникающую в жидкости (газе) вследствие разности плотностей;

$Pr = \nu / a = (\mu \cdot c_p) / \lambda$  - критерий Прандтля, характеризует физические свойства жидкости (газа);

$l_0$  – определяющий размер (длина, высота, диаметр).

### **Расчетные формулы конвективного теплообмена.**

Приведем некоторые основные расчетные формулы конвективного теплообмена (академика М.А.Михеева), которые даны для средних значений коэффициентов теплоотдачи по поверхности стенки.

#### **1. Свободная конвекция в неограниченном пространстве.**

а). Горизонтальная труба диаметром  $d$  при  $10^3 < (Gr \cdot Pr)_{\text{жсд}} < 10^8$ .

$$Nu_{\text{жср}} = 0,5 \cdot (Gr_{\text{жд}} \cdot Pr_{\text{ж}})^{0,25} \cdot (Pr_{\text{ж}} / Pr_{\text{ст}})^{0,25} . (10.13)$$

б). Вертикальная труба и пластина:

1). ламинарное течение -  $10^3 < (Gr \cdot Pr)_{\text{жс}} < 10^9$ :

$$Nu_{\text{жср}} = 0,75 \cdot (Gr_{\text{жд}} \cdot Pr_{\text{ж}})^{0,25} \cdot (Pr_{\text{ж}} / Pr_{\text{ст}})^{0,25} . (10.14)$$

2). турбулентное течение -  $(Gr \cdot Pr)_{\text{жс}} > 10^9$ :

$$Nu_{\text{жср}} = 0,15 \cdot (Gr_{\text{жд}} \cdot Pr_{\text{ж}})^{0,33} \cdot (Pr_{\text{ж}} / Pr_{\text{ст}})^{0,25} . (10.15)$$

Здесь значения  $Gr_{\text{жд}}$  и  $Pr_{\text{ж}}$  берутся при температуре жидкости (газа), а  $Pr_{\text{ст}}$  при температуре поверхности стенки. Для воздуха  $Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{ст}} = 1$  и формулы (10.13-10.15) упрощаются.

## 2. Вынужденная конвекция.

Режим течения определяется по величине  $Re$ .

а). Течение жидкости в гладких трубах круглого сечения.

1). ламинарное течение –  $Re < 2100$

$$Nu_{\text{ждср}} = 0,15 \cdot Re_{\text{жд}}^{0,33} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,33} \cdot (Gr_{\text{жд}} \cdot Pr_{\text{ж}})^{0,1} \cdot (Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{ст}})^{0,25} \cdot \epsilon_1, \quad (10.16)$$

где  $\epsilon_1$  - коэффициент, учитывающий изменение среднего коэффициента теплоотдачи по длине трубы и зависит от отношения длины трубы к его диаметру ( $l/d$ ). Значения этого коэффициента представлена в таблице 10.1.

Таблица 10.1.

Значение  $\epsilon_1$  при ламинарном режиме.

|              |     |     |      |      |      |      |      |      |     |
|--------------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|-----|
| $l/d$        | 1   | 2   | 5    | 10   | 15   | 20   | 30   | 40   | 50  |
| $\epsilon_1$ | 1,9 | 1,7 | 1,44 | 1,28 | 1,18 | 1,13 | 1,05 | 1,02 | 1,0 |

2). переходной режим –  $2100 < Re < 10^4$

$$Nu_{\text{ждср}} = K_0 \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,43} \cdot (Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{ст}})^{0,25} \cdot \epsilon_1. \quad (10.17)$$

Коэффициент  $K_0$  зависит от критерия Рейнольдса  $Re$  и представлена в таблице 10.2.

Таблица 10.2.

Значение  $K_0$ .

|                 |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
| $Re \cdot 10^4$ | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 3   | 4    | 5    | 6    | 8    | 10   |
| $K_0$           | 1,9 | 2,2 | 3,3 | 3,8 | 4,4 | 6,0 | 10,3 | 15,5 | 19,5 | 27,0 | 33,3 |

3). турбулентное течение –  $Re = 10^4$

$$Nu_{\text{ждср}} = 0,021 \cdot Re_{\text{жд}}^{0,8} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,43} \cdot (Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{ст}})^{0,25} \cdot \epsilon_1. \quad (10.18)$$

Таблица 10.3.

Значение  $\epsilon_1$  при турбулентном режиме.

|       |                     |                     |                     |
|-------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $l/d$ |                     |                     |                     |
|       | $Re = 2 \cdot 10^3$ | $Re = 2 \cdot 10^4$ | $Re = 2 \cdot 10^5$ |
| 1     | 1,9                 | 1,51                | 1,28                |
| 2     | 1,70                | 1,40                | 1,22                |
| 5     | 1,44                | 1,27                | 1,15                |
| 10    | 1,28                | 1,18                | 1,10                |
| 15    | 1,18                | 1,13                | 1,08                |
| 20    | 1,13                | 1,11                | 1,06                |
| 30    | 1,05                | 1,05                | 1,03                |
| 40    | 1,02                | 1,02                | 1,02                |
| 50    | 1,00                | 1,00                | 1,00                |

б). Обтекание горизонтальной поверхности.

1). ламинарное течение –  $Re < 4 \cdot 10^4$

$$Nu_{\text{ждср}} = 0,66 \cdot Re_{\text{жд}}^{0,5} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,33} \cdot (Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{ст}})^{0,25}. \quad (10.19)$$

2). турбулентное течение –  $Re > 4 \cdot 10^4$

$$Nu_{\text{ждср}} = 0,037 \cdot Re_{\text{жд}}^{0,5} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,33} \cdot (Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{ст}})^{0,25}. \quad (10.20)$$

в). Поперечное обтекание одиночной трубы (угол атаки  $\varphi = 90^\circ$ ).

1). при  $Re_{жид} = 5 - 10^3$

$$Nu_{жидср} = 0,57 \cdot Re_{ж}^{0,5} \cdot Pr_{ж}^{0,38} \cdot (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25} \quad (10.21)$$

2). при  $Re_{жид} = 10^3 - 2 \cdot 10^5$

$$Nu_{жидср} = 0,25 \cdot Re_{ж}^{0,6} \cdot Pr_{ж}^{0,38} \cdot (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25} \quad (10.22)$$

### Раздел 3. Основы теории теплообмена

#### Тема 3.3. Излучение

Лучистая энергия возникает за счет энергии других видов в результате сложных молекулярных и внутриаомных процессов. Природа всех лучей одинакова. Они представляют собой распространяющиеся в пространстве электромагнитные волны. Источником теплового излучения является внутренняя энергия нагретого тела. Количество лучистой энергии в основном зависит от физических свойств и температуры излучающего тела. Электромагнитные волны различаются между собой длиной волны

В зависимости от длины волны  $\lambda$  лучи обладают различными свойствами. Наименьшей длиной волны обладают космические лучи  $\lambda = (0,1 - 10)^\circ\text{A}$  (где  $^\circ\text{A}$  — ангстрем, единица длины,  $1^\circ\text{A} = 10^{-10}\text{м}$ ). Гамма-лучи, испускаемые радиоактивными веществами, имеют длину волны до  $10^\circ\text{A}$ ; лучи Рентгена —  $\lambda = (10-200)^\circ\text{A}$ ; ультрафиолетовые лучи —  $\lambda = (200^\circ\text{A} - 0,4 \text{ мк})$  ( $\text{мк}$  — микрон,  $1 \text{ мк} = 0,001 \text{ мм}$ ), световые лучи —  $\lambda = (0,4-0,8)\text{мк}$ , инфракрасные или тепловые лучи —  $\lambda = (0,8 - 400) \text{ мк}$ , радио или электромагнитные лучи —  $\lambda > 400 \text{ мк}$ . Из всех лучей наибольший интерес для теплопередачи представляют тепловые лучи с  $\lambda = (0,8 - 40) \text{ мк}$ .

Лучеиспускание свойственно всем телам, и каждое из них излучает и поглощает энергию непрерывно, если температура его не равна  $0^\circ\text{K}$ . При одинаковых или различных температурах между телами, расположенными как угодно в пространстве, существует непрерывный лучистый теплообмен.

При температурном равновесии тел количество отдаваемой лучистой энергии будет равно количеству поглощаемой лучистой энергии. Спектр излучения большинства твердых и жидких тел непрерывен. Эти тела испускают лучи всех длин волн от малых до больших.

Спектр излучения газов имеет линейчатый характер. Газы испускают лучи не всех длин волн. Такое излучение называется *селективным* (избирательным). Излучение газов носит объемный характер.

Суммарное излучение с поверхности тела по всем направлениям полусферического пространства и по всем длинам волн спектра называется *интегральным* или *полным лучистым потоком* ( $Q$ ).

Интегральный лучистый поток, излучаемый единицей поверхности по всем направлениям, называется *излучательной способностью* тела и обозначается

$$E = dQ / dF, [\text{Вт}/\text{м}^2] \quad (11.1)$$

где  $dQ$  — элементарный лучистый поток, испускаемый элементом поверхности  $dF$ .

Каждое тело способно не только излучать, но и отражать, поглощать и пропускать через себя падающие лучи от другого тела. Если обозначить общее количество лучистой энергии, падающей на тело, через  $Q$ , то часть энергии, равная  $A$ , поглотится телом, часть, равная  $R$ , отразится, а часть, равная  $D$ , пройдет сквозь тело. Отсюда

$$Q = Q_A + Q_R + Q_D, \quad (11.2)$$

или

$$A + R + D = 1. \quad (11.3)$$

Величину  $A$  называют *коэффициентом поглощения*. Он представляет собой отношение поглощенной лучистой энергии ко всей лучистой энергии, падающей на тело. Величину  $R$  называют *коэффициентом отражения*.  $R$  есть отношение отраженной лучистой энергии ко всей падающей. Величину  $D$  называют *коэффициентом прозрачности*.  $D$  есть отношение прошедшей сквозь тело лучистой энергии ко всей лучистой энергии, падающей на тело. Для

большинства твердых тел, практически не пропускающих сквозь себя лучистую энергию,  $A + R = 1$ .

Если поверхность поглощает все падающие на нее лучи, т. е.  $A = 1$ ,  $R = 0$  и  $D = 0$ , то такую поверхность называют *абсолютно черной*. Если поверхность отражает полностью все падающие на нее лучи, то такую поверхность называют *абсолютно белой*. При этом  $R = 1$ ,  $A = 0$ ,  $D = 0$ . Если тело *абсолютно проницаемо* для тепловых лучей, то  $D = 1$ ,  $R = 0$  и  $A = 0$ . В природе абсолютно черных, белых и прозрачных тел не существует, тем не менее понятие о них является очень важным для сравнения с реальными поверхностями.

Кварц для тепловых лучей непрозрачен, а для световых и ультрафиолетовых лучей прозрачен. Каменная соль прозрачна для тепловых лучей и непрозрачна для ультрафиолетовых лучей. Оконное стекло прозрачно для световых лучей, а для ультрафиолетовых и тепловых почти непрозрачно. Белая поверхность (ткань, краска) хорошо отражает лишь видимые лучи, а тепловые лучи поглощает также хорошо, как и темная. Таким образом, свойство тел поглощать или отражать тепловые лучи зависят в основном от состояния поверхности, а не от ее цвета.

Если поверхность отражает лучи под тем же углом, под которым они падают на нее, то такую поверхность называют *зеркальной*. Если падающий луч при отражении расщепляется на множество лучей, идущих по всевозможным направлениям, то такое отражение называют *диффузным* (например поверхность мела).

При исследовании лучистых потоков большое значение имеет распределение лучистой энергии, испускаемой абсолютно черным телом по отдельным длинам волн спектра. Каждой длине волны лучей, при определенной температуре, соответствует определенная интенсивность излучения -  $I_{s\lambda}$ . *Интенсивность излучения* или *спектральная* (монохроматическая) *интенсивность*, представляет собой плотность лучистого потока тела для длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda+d\lambda$ , отнесенная к рассматриваемому интервалу длин волн  $d\lambda$ ;

$$I_{s\lambda} = dE_{s\lambda} / d\lambda, \quad (11.4)$$

где  $I_{s\lambda}$  - спектральная интенсивность излучения абсолютно черного тела.

#### **. Основные законы теплового излучения**

**Закон Планка.** Интенсивности излучения абсолютно черного тела  $I_{s\lambda}$  и любого реального тела  $I_\lambda$  зависят от температуры и длины волны.

Абсолютно черное тело при данной температуре испускает лучи всех длин волн от  $\lambda = 0$  до  $\lambda = \infty$ . Если каким-либо образом отделить лучи с разными длинами волн друг от друга и измерить энергию каждого луча, то окажется, что распределение энергии вдоль спектра различно. По мере увеличения длины волны энергия лучей возрастает, при некоторой длине волны достигает максимума, затем убывает. Кроме того, для луча одной и той же длины волны энергия его увеличивается с возрастанием температуры тела, испускающего лучи (рис.11.1).

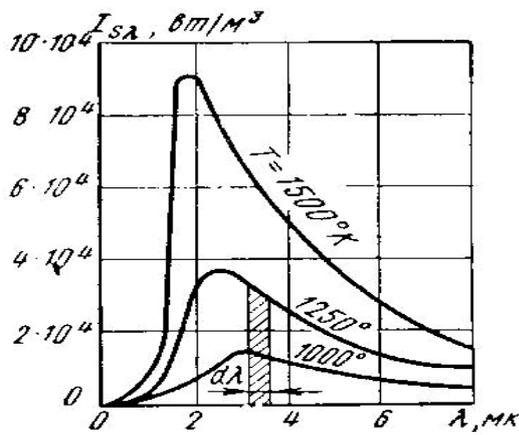


Рис. 11.1.

Планк установил следующий закон изменения интенсивности излучения абсолютно черного тела в зависимости от температуры и длины волны:

$$I_{s\lambda} = c_1 \lambda^{-5} / (e^{c/(\lambda T)} - 1), \quad (11.5)$$

где  $e$  - основание натуральных логарифмов;  $c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$  Вт/м<sup>2</sup>;  $c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$  м\*град;  $\lambda$  - длина волны, м;  $T$  - температура излучающего тела, К.

Из рис.11.1 видно, что для любой температуры интенсивность излучения  $I_{s\lambda}$  возрастает от нуля (при  $\lambda=0$ ) до своего наибольшего значения, а затем убывает до нуля (при  $\lambda=\infty$ ). При повышении температуры интенсивность излучения для каждой длины волны возрастает.

**Закон смещения Вина.** Кроме того, из рис.11.1 следует, что максимумы кривых с повышением температуры смещаются в сторону более коротких волн. Длина волны  $\lambda_{ms}$ , отвечающая максимальному значению  $I_{s\lambda}$ , определяется *законом смещения Вина*:

$$\lambda_{ms} = 2,9 / T. \quad (11.6)$$

С увеличением температуры  $\lambda_{ms}$  уменьшается, что и следует из закона.

Пользуясь законом смещения Вина, можно измерять высокие температуры тел на расстоянии, например, расплавленных металлов, космических тел и др.

**Закон Стефана-Больцмана.** Планк установил, что каждой длине волны соответствует определенная интенсивность излучения, которая увеличивается с возрастанием температуры.

Тепловой поток, излучаемый единицей поверхности черного тела в интервале длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ , может быть определен из уравнения

$$dE_s = I_{s\lambda} \cdot d\lambda. \quad (11.7)$$

Элементарная площадка на рис.11.1, ограниченная кривой  $T = \text{const}$ , основанием  $d\lambda$  ординатами  $\lambda$  и  $\lambda + d\lambda$  ( $I_{s\lambda}$ ) определяет количество лучистой энергии  $dE_s$  и называется *лучеиспускательной способностью абсолютно черного тела* для длин волн  $d\lambda$ . Вся же площадь между любой кривой  $T = \text{const}$  и осью абсцисс равна интегральному излучению черного тела в пределах от  $\lambda = 0$  до  $\lambda = \infty$  при данной температуре.

Подставляя в уравнение (11.7) закон Планка и интегрируя от  $\lambda = 0$  до  $\lambda = \infty$ , найдем, что *интегральное излучение (тепловой поток) абсолютно черного тела* прямо пропорционально четвертой степени его абсолютной температуры (*закон Стефана-Больцмана*).

$$E_s = C_s (T/100)^4, \quad (11.8)$$

где  $C_s = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>\*К<sup>4</sup>) - коэффициент излучения абсолютно черного тела

Отмечая на рис.11.1 количество энергии, отвечающей световой части спектра (0,4—0,8 мк), нетрудно заметить, что оно для невысоких температур очень мало по сравнению с энергией интегрального излучения. Только при температуре солнца  $\sim 6000$ К энергия световых лучей составляет около 50% от всей энергии черного излучения.

Все реальные тела, используемые в технике, не являются абсолютно черными и при одной и той же температуре излучают меньше энергии, чем абсолютно черное тело. Излучение ре-

альных тел также зависит от температуры и длины волны. Чтобы законы излучения черного тела можно было применить для реальных тел, вводится понятие о сером теле и сером излучении. Под серым излучением понимают такое, которое аналогично излучению черного тела имеет сплошной спектр, но интенсивность лучей для каждой длины волны  $I_\lambda$  при любой температуре составляет неизменную долю от интенсивности излучения черного тела  $I_{s\lambda}$ , т.е. существует отношение:

$$I_\lambda / I_{s\lambda} = \varepsilon = \text{const.} \quad (11.9)$$

Величину  $\varepsilon$  называют *степенью черноты*. Она зависит от физических свойств тела. Степень черноты серых тел всегда меньше единицы.

Большинство реальных твердых тел с определенной степенью точности можно считать серыми телами, а их излучение — серым излучением. Энергия интегрального излучения серого тела равна:

$$E = \varepsilon * E_s = C * (T/100)^4. \quad (11.10)$$

Лучеиспускательная способность серого тела составляет долю, равную  $\varepsilon$  от лучеиспускательной способности черного тела.

Величину  $C = \varepsilon * E_s$  называют *коэффициентом излучения серого тела*. Величина  $C$  реальных тел в общем случае зависит не только от физических свойств тела, но и от состояния поверхности или от ее шероховатости, а также от температуры и длины волны. Значения коэффициентов излучения и степеней черноты тел берут из таблиц.

Таблица 11.1

**Степень черноты полного нормального излучения  
для различных материалов**

| Наименование материала                  | t, °C     | $\varepsilon$ |
|---|-----------|---------------|
| Алюминий полированный                   | 50—500    | 0,04—0,06     |
| Бронза                                  | 50        | 0,1           |
| Железо листовое оцинкованное, блестящее | 30        | 0,23          |
| Жесть белая, старая                     | 20        | 0,28          |
| Золото полированное                     | 200 - 600 | 0,02—0,03     |
| Латунь матовая                          | 20-350    | 0,22          |
| Медь полированная                       | 50—100    | 0,02          |
| Никель полированный                     | 200—400   | 0,07—0,09     |
| Олово блестящее                         | 20—50     | 0,04—0,06     |
| Серебро полированное                    | 200—600   | 0,02—0,03     |
| Стальной листовой прокат                | 50        | 0,56          |
| Сталь окисленная                        | 200—600   | 0,8           |
| Сталь сильно окисленная                 | 500       | 0,98          |
| Чугунное литье                          | 50        | 0,81          |
| Асбестовый картон                       | 20        | 0,96          |
| Дерево строганое                        | 20        | 0,8—0,9       |
| Кирпич огнеупорный                      | 500—1000  | 0,8—0,9       |
| Кирпич шамотный                         | 1000      | 0,75          |
| Кирпич красный, шероховатый             | 20        | 0,88—0,93     |
| Лак черный, матовый                     | 40—100    | 0,96—0,98     |
| Лак белый                               | 40—100    | 0,8—0,95      |
| Масляные краски различных цветов . . .  | 100       | 0,92—0,96     |
| Сажа ламповая                           | 20—400    | 0,95          |
| Стекло                                  | 20—100    | 0,91—0,94     |
| Эмаль белая                             | 20        | 0,9           |

**Закон Кирхгофа.** Для всякого тела излучательная и поглощательная способности зависят от температуры и длины волны. Различные тела имеют различные значения  $E$  и  $A$ . Зависимость между ними устанавливается *законом Кирхгофа*:

$$E = E_s * A \text{ или } E / A = E_s = E_s / A_s = C_s * (T/100)^4. \quad (11.11)$$

Отношение лучеиспускательной способности тела (E) к его поглощательной способности (A) одинаково для всех серых тел, находящихся при одинаковых температурах и равно лучеиспускательной способности абсолютно черного тела при той же температуре.

Из закона Кирхгофа следует, что если тело обладает малой поглощательной способностью, то оно одновременно обладает и малой лучеиспускательной способностью (полированные металлы). Абсолютно черное тело, обладающее максимальной поглощательной способностью, имеет и наибольшую излучательную способность. Закон Кирхгофа остается справедливым и для монохроматического излучения. Отношение интенсивности излучения тела при определенной длине волны к его поглощательной способности при той же длине волны для всех тел одно и то же, если они находятся при одинаковых температурах, и численно равно интенсивности излучения абсолютно черного тела при той же длине волны и температуре, т.е. является функцией только длины волны и температуры:

$$E_l / A_l = \Pi_l / A_l = E_{sl} = I_{sl} = f(l, T). \quad (11.12)$$

Поэтому тело, которое излучает энергию при какой-нибудь длине волны, способно поглощать ее при этой же длине волны. Если тело не поглощает энергию в какой-то части спектра, то оно в этой части спектра и не излучает.

Из закона Кирхгофа также следует, что степень черноты серого тела  $e$  при одной и той же температуре численно равно коэффициенту поглощения  $A$ :

$$e = \Pi / I_{sl} = E / E_{sl} = C / C_{sl} = A. \quad (11.13)$$

**Закон Ламберта.** Излучаемая телом лучистая энергия распространяется в пространстве по различным направлениям с различной интенсивностью. Закон, устанавливающий зависимость интенсивности излучения от направления, называется законом Ламберта.

Закон Ламберта устанавливает, что количество лучистой энергии, излучаемое элементом поверхности  $dF_1$  в направлении элемента  $dF_2$ , пропорционально произведению количества энергии, излучаемой по нормали  $dQ_n$ , на величину пространственного угла  $d\omega$  и  $\cos\varphi$ , составленного направлением излучения с нормалью (рис.11.2):

$$d^2Q_n = dQ_n * d\omega * \cos\varphi. \quad (11.14)$$

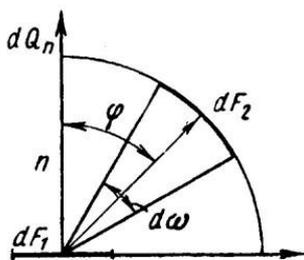


Рис. 11.2.

Следовательно, наибольшее количество лучистой энергии излучается в перпендикулярном направлении к поверхности излучения, т. е. при  $(\varphi = 0)$ . С увеличением  $\varphi$  количество лучистой энергии уменьшается и при  $\varphi = 90^\circ$  равно нулю. Закон Ламберта полностью справедлив для абсолютно черного тела и для тел, обладающих диффузным излучением при  $\varphi = 0 - 60^\circ$ . Для полированных поверхностей закон Ламберта неприменим. Для них лучеиспускание при угле  $\varphi$  будет большим, чем в направлении, нормальном к поверхности.

#### 4.3. Лабораторные работы

Учебным планом не предусмотрены.

#### 4.4. Практические занятия

| <i>№<br/>п/п</i> | <i>Номер<br/>раздела<br/>дисциплины</i> | <i>Наименование тем<br/>практических занятий</i>      | <i>Объ-<br/>ем<br/>(час.)</i> | <i>Вид<br/>занятия в ин-<br/>терактивной,<br/>активной,<br/>инновационной<br/>формах,<br/>(час.)</i> |
|------------------|---|---|-------------------------------|--|
| <b>1</b>         | <b>2</b>                                | <b>3</b>  | <b>4</b>                      | <b>5</b>   |
| 1                | 2.                                      | Исследование цикла Отто                               | 4                             | Проектная дея-<br>тельность (2 час.)   |
| 2                | 2.                                      | Исследование цикла Тринклера                          | 2                             | -  |
| 3                | 3.                                      | Теплопроводность многослойной стенки                  | 2                             | -  |
| 4                | 3.                                      | Расчет термического сопротивления изоляции            | 2                             | -  |
| 5                | 3.                                      | Определение газодинамических свойств рабочей жидкости | 2                             | Дискуссия (2 час.)   |
| 6                | 3.                                      | Теплообменник «Труба в трубе»                         | 2                             | -  |
| 7                | 3.                                      | Гидравлическое сопротивление трубопровода             | 3                             | -  |
| <b>ИТОГО</b>     |   |   | <b>17</b>                     | <b>4</b>   |

#### 4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат

Учебным планом не предусмотрены.

**5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

| <i>Компетенции</i><br><i>№, наименование<br/>разделов дисциплины</i> | <i>Кол-во<br/>часов</i> | <i>Компетенции</i> |              | $\Sigma$<br><i>комп.</i> | <i>t<sub>ср</sub>, час</i> | <i>Вид<br/>учебной<br/>работы</i> | <i>Оценка<br/>результатов</i> |
|--|-------------------------|--------------------|--------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  |                         | <i>ПК-12</i>       | <i>ОПК-3</i> |                          |                            |                                   |                               |
| <b>1</b>   | <b>2</b>                | <b>3</b>           | <b>4</b>     | <b>5</b>                 | <b>6</b>                   | <b>7</b>                          | <b>8</b>                      |
| <b>1. Основы термодинамики</b>                                       | 20                      | 10                 | 10           | 2                        | 20                         | Лк, СРС                           | Зачет                         |
| <b>2. Техническая термодинамика</b>                                  | 20                      | 10                 | 10           | 2                        | 20                         | Лекции,<br>ПЗ, СРС                | Зачет                         |
| <b>3. Основы теории теплообмена</b>                                  | 32                      | 16                 | 16           | 2                        | 32                         | Лекции,<br>ПЗ, СРС                | Зачет                         |
| <b><i>всего часов</i></b>  | <b>72</b>               | <b>36</b>          | <b>36</b>    | <b>2</b>                 | <b>72</b>                  |                                   |                               |

## 6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Теплотехника: Лабораторный практикум / С.Л. Витковский. -- Братск: ГОУ ВПО «БГУ», 2007. – 74 с.
2. Лабораторный практикум по термодинамике и теплопередаче / Под ред. В.И. Крутова, Е.В. Шишова.- М.: Высш. шк. 1988.- 216 с.

## 7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

| №                                | Наименование издания  | Вид занятия | Количество экземпляров в библиотеке, шт. | Обеспеченность, (экз./ чел.) |
|----------------------------------|---|-------------|--|------------------------------|
| 1                                | 2   | 3           | 4  | 5                            |
| <b>Основная литература</b>       |   |             |  |                              |
| 1.                               | Круглов, Г.А. Теплотехника. [Электронный ресурс] / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова.–Электрон. дан.–СПб.: Лань, 2012.–208 с.– Режим доступа: <a href="http://e.lanbook.com/book/3900">http://e.lanbook.com/book/3900</a> | Лк, ПЗ,СР   | 1 ЭР                                     | 1                            |
| <b>Дополнительная литература</b> |   |             |  |                              |
| 2.                               | Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача.-М.:Высш. шк.1980.-469 с.  | Лк, ПЗ,СР   | 152                                      | 1                            |
| 3.                               | Теплотехника : учебник для вузов / В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, Г. М. Камфер и др. - 5-е изд., стереотип.- Москва: Высшая школа, 2006.- 671 с.  | Лк, ПЗ,СР   | 15                                       | 0,8                          |
| 4.                               | Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие.- М.: Энергоатомиздат. 1990.- 365 с.   | Лк, ПЗ,СР   | 16                                       | 1                            |
| 5.                               | Панкратов Г.П. Сборник задач по теплотехнике.- М.: Высш. шк. 1986.- 247 с.  | Лк, ПЗ,СР   | 83                                       | 1                            |
| 6.                               | Стандарт Системы менеджмента кафедры «Автомобильный транспорт» ГОУ ВПО «БрГУ». СТ АТ 2.301-2006. Оформление текстовых учебных документов / Сост. В.Н. Тарасюк.-2006.  | Лк, ПЗ,СР   | 105                                      | 1                            |

## 8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ», НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

- 1.Электронный каталог библиотеки БрГУ  
[http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r\\_15/cgiirbis\\_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=](http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r_15/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=).
2. Электронная библиотека БрГУ  
<http://ecat.brstu.ru/catalog> .
3. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online»  
<http://biblioclub.ru> .
4. Электронно-библиотечная система «Издательство «Лань»  
<http://e.lanbook.com> .
5. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам"  
<http://window.edu.ru> .
6. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU <http://elibrary.ru> .
7. Университетская информационная система РОССИЯ (УИС РОССИЯ)  
<https://uisrussia.msu.ru/> .

## 9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Практическое владение материалом дисциплины предполагает наличие сформированных знаний по законам термодинамики и теплообмену, а также умений и навыков работы с рабочими диаграммами процессов и выполнения тепловых расчётов.

Для того чтобы достигнуть указанного в целевой установке уровня владения материалом дисциплины, следует систематически готовиться к занятиям, выполнять в полном объеме все задания практических занятий и закреплять полученные умения, повторяя пройденный на занятиях материал во время самостоятельной подготовки.

### 9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению практических занятий

#### Практическое занятие №1. Исследование цикла Отто

Занятие проводится в интерактивной форме «Проектная деятельность». Пункты 1, 2 задания направлены на построение цикла Отто и определение параметров в узловых точках. Пункт 3 даёт возможность оценить потери тепла при замене адиабаты на близкую ей политропу при построении индикаторной диаграммы. Пункт 4 делает наглядным влияние степени сжатия на КПД двигателя.

Цель работы – изучение термодинамического цикла теплового двигателя с подводом тепла при постоянном объёме. Цикл Отто лежит в основе работы современного двигателя с принудительным зажиганием (карбюраторного, инжекторного).

Задание: Для своих исходных данных:

1. Построить цикл Отто и политропы 1-5 и 3-6. Кривые строить по 6-8 точкам, равномерно расположенным вдоль кривой для выявления её истинной формы;

2. Определить **температуры** рабочего тела в точках 2, 3, 4, 5, 6. Проверить правильность выражения (7). Рассчитать коэффициент полезного действия для рассматриваемого цикла Отто;

3. Определить **потери тепла**  $\Delta Q_c$  и  $\Delta Q_p$  в процентах от подведенного за цикл тепла  $Q_1$ , если реализуются политропы 1-5 и 3-6. Сделать **вывод** о правомерности считать процессы сжатия и расширения адиабатными при рассмотрении теоретических циклов;

4. Построить график **зависимости КПД** цикла Отто от степени сжатия при её изменении в пределах от 1 до 20. Поместить на график значение КПД, рассчитанное в пункте 2. Сделайте **вывод** о причине повышения КПД при разработке новых моделей двигателей автомобилей.

Порядок выполнения: принимаем, что **рабочим телом** является воздух, имеющий следующие параметры:

$\rho = 1,21 \text{ кг/м}^3$  – плотность (при  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ );

$R = 287 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$  – газовая постоянная;

$k = 1,4$  – показатель адиабаты;

$c_p = 1005 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$  – удельная массовая изобарная теплоемкость ( $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ );

$P_0 = 730 \text{ мм рт. ст.}$  – атмосферное давление;

$T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  – температура воздуха.

Показатель политропы для средней частоты вращения коленчатого вала 2000 об/мин карбюраторного двигателя можно принять равным  $n = 1,35$ .

Расчеты провести для **своего варианта**, соответствующего предпоследней и последней цифре номера зачетной книжке студента в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2

|                            |           |                        |           |               |
|----------------------------|-----------|------------------------|-----------|---------------|
| Предпоследняя цифра номера | $\lambda$ | Последняя цифра номера | $V_1$ , л | $\varepsilon$ |
|----------------------------|-----------|------------------------|-----------|---------------|

|   |     |   |     |      |
|---|-----|---|-----|------|
| 1 | 2,6 | 1 | 0,3 | 7,5  |
| 2 | 2,8 | 2 | 0,4 | 8    |
| 3 | 3   | 3 | 0,5 | 8,5  |
| 4 | 3,2 | 4 | 0,6 | 9    |
| 5 | 3,4 | 5 | 0,7 | 9,5  |
| 6 | 3,6 | 6 | 0,8 | 10   |
| 7 | 3,8 | 7 | 0,9 | 10,5 |
| 8 | 4   | 8 | 1   | 11   |
| 9 | 4,2 | 9 | 1,1 | 11,5 |
| 0 | 4,4 | 0 | 1,2 | 12   |

Форма отчетности: отчёт по практическому занятию выполнить в виде главы заключительного отчёта, представляемого для получения зачёта [7].

Задания для самостоятельной работы:

1. Освоить теоретический материал лекций;
2. Изучить материал дисциплины по учебникам основной литературы [1,2].

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию:

При подготовке к практическому занятию использовать учебно-методическое обеспечение [1,2] и дополнительную литературу [5,6].

Контрольные вопросы для самопроверки

1. В чем состоит цель работы? Чем отличаются теоретические циклы от действительных?
2. Какое современное техническое устройство описывает цикл Отто? Почему?
3. Какие допущения используют при рассмотрении теоретических циклов?
4. Из каких термодинамических процессов состоит цикл Отто? Какие параметры количественно определяют эти процессы?

**Практическое занятие №2.** Исследование цикла Тринклера

Цель работы – изучение термодинамического цикла теплового двигателя со **смешанным подводом тепла**: при постоянном объёме и при постоянном давлении. Цикл Тринклера лежит в основе работы современного дизельного двигателя (двигателя с самовоспламенением).

Задание:

Для своих исходных данных:

1) Построить **цикл Тринклера**. Кривые строить по 6-8 точкам, равномерно расположенным вдоль кривой для выявления её истинной формы. Определить мощность двигателя, работающего по этому циклу;

2) Определить **температуры** рабочего тела в точках **2, 3, 4, 5**. Проверить правильность выражения (7) из предыдущей работы. Рассчитать коэффициент полезного действия и среднее цикловое давление для рассматриваемого цикла Тринклера;

3) Проектирование двигателя выполняют при заданной мощности. Это означает **постоянство подводимого тепла**  $Q_1$  и, в соответствии с (3), равенство константе выражения

$$\lambda - 1 + k \cdot \lambda \cdot (\rho - 1) = const$$

Приняв значение константы за  $a$ , выразите  $\lambda$  через  $\rho$  и постройте зависимость КПД цикла Тринклера от  $\rho$  в пределах  $1 \dots (1+a/k)$  для условия постоянства мощности

$$\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1} \cdot a} \cdot \left[ \frac{a+1}{1+k \cdot (\rho-1)} \cdot \rho^k - 1 \right]$$

Сделайте **выводы** :

– какие параметры цикла ( $\varepsilon$ ,  $\lambda$ ,  $\rho$ ) следует задавать при проектировании дизельного двигателя?

– как выбирать эти параметры с целью увеличения КПД двигателя?

- 4) Построить график зависимости КПД цикла Тринклера от **степени сжатия** при её изменении в пределах от 1 до 25 и постоянстве  $\lambda$  и  $\rho$ . Поместить на график значение

КПД, рассчитанное в пункте 2. Сделайте **вывод** о причине повышения КПД при разработке новых моделей двигателей автомобилей.

Порядок выполнения:

Принимаем, что **рабочим телом** является воздух, имеющий следующие параметры:

$\rho = 1,25 \text{ кг/м}^3$  – плотность (при  $t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ );

$R = 287 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$  – газовая постоянная;

$k = 1,4$  – показатель адиабаты;

$c_p = 1005 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$  – удельная массовая изобарная теплоемкость ( $t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ );

$P_0 = 710 \text{ мм рт. ст.}$  – атмосферное давление;

$T_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  – температура воздуха.

Расчеты провести для **своего варианта**, соответствующего предпоследней и последней цифре номера зачетной книжке студента в соответствии с таблицей 3.

Таблица 3

| Предпоследняя цифра номера | $\lambda$ | $\rho$ | Последняя цифра номера | $n$ , об/м | $V_1$ , л | $\varepsilon$ |
|----------------------------|-----------|--------|------------------------|------------|-----------|---------------|
| <b>1</b>                   | 1,3       | 1,5    | <b>1</b>               | 1800       | 0,3       | 16            |
| <b>2</b>                   | 1,4       | 1,6    | <b>2</b>               | 1900       | 0,4       | 17            |
| <b>3</b>                   | 1,5       | 1,7    | <b>3</b>               | 2000       | 0,5       | 18            |
| <b>4</b>                   | 1,6       | 1,8    | <b>4</b>               | 2100       | 0,6       | 19            |
| <b>5</b>                   | 1,7       | 1,9    | <b>5</b>               | 2200       | 0,7       | 20            |
| <b>6</b>                   | 1,8       | 2,0    | <b>6</b>               | 2300       | 0,8       | 21            |
| <b>7</b>                   | 1,9       | 2,1    | <b>7</b>               | 2400       | 0,9       | 22            |
| <b>8</b>                   | 2,0       | 2,2    | <b>8</b>               | 2500       | 1         | 23            |
| <b>9</b>                   | 2,1       | 2,3    | <b>9</b>               | 2600       | 1,1       | 24            |
| <b>0</b>                   | 2,2       | 2,4    | <b>0</b>               | 2700       | 1,2       | 25            |

Форма отчетности: отчёт по практическому занятию выполнить в виде главы заключительного отчёта, представляемого для получения зачёта [7].

Задания для самостоятельной работы:

3. Освоить теоретический материал лекций;

4. Изучить материал дисциплины по учебникам основной литературы [1,2].

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию:

При подготовке к практическому занятию использовать учебно-методическое обеспечение [1,2] и дополнительную литературу [5,6].

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Как определяются степень повышения давления  $\lambda$  и степень предварительного расширения  $\rho$ ?

2. Что такое КПД теплового двигателя? Как КПД цикла Тринклера зависит от параметров  $\varepsilon$ ,  $\lambda$ ,  $\rho$  ?

3. Как найти работу и тепло для процессов изохорного и изобарного подвода тепла?

4. Почему процессы сжатия и расширения дизельного двигателя, протекающие с потерями тепла, представлены в теоретическом цикле адиабатными?

**Практическое занятие №3.** Теплопроводность многослойной стенки

Цель работы – исследование процесса передачи тепла теплопроводностью через **плоскую** стенку в **стационарных** условиях.

Порядок выполнения:

1. Выбрать программу "Теплопроводность " и запустить на исполнение (поместить на пиктограмму программы курсор мыши и дважды щелкнуть левой клавишей мыши). На экране компьютера появится окно программы;

2. Выбрать нужную лабораторную установку, для этого необходимо поместить курсор мыши на закладку "Плоская стенка" или "Цилиндрическая стенка" и щелкнуть левой клавишей;

3. Задать площадь поверхности плоской стенки или высоту цилиндрической стенки и наружный диаметр нагревательного элемента.

4. Задать толщину и материал слоев стенки.

5. Установить напряжение нагревателя.

Таблица 4

**Результаты измерений**

|  |                | Номер опыта |   |   |   |
|--|----------------|-------------|---|---|---|
|  |                | 1           | 2 | 3 | 4 |
| Площадь поверхности стенки<br>$F, \text{ м}^2$             |                |             |   |   |   |
| Высота цилиндрической<br>стенки $L, \text{ м}$             |                |             |   |   |   |
| Диаметр нагревательного<br>Элемента $d, \text{ м}$         |                |             |   |   |   |
| Толщина слоя стенки<br>$\delta, \text{ мм}$                | 1              |             |   |   |   |
|  | 2              |             |   |   |   |
|  | 3              |             |   |   |   |
| Материал слоя стенки                                       | 1              |             |   |   |   |
|  | 2              |             |   |   |   |
|  | 3              |             |   |   |   |
| Сопротивление<br>нагревателя $R_H, \text{ Ом}$             |                |             |   |   |   |
| Напряжение<br>нагревателя $U, \text{ В}$                   |                |             |   |   |   |
| Температура на поверх-<br>ности стенки, $^{\circ}\text{C}$ | $t_{w1}$       |             |   |   |   |
|  | $t_{w2}$       |             |   |   |   |
| Температура между сло-<br>ями стенки, $^{\circ}\text{C}$   | $t_1$          |             |   |   |   |
|  | $t_2$          |             |   |   |   |
| Глубина<br>установки<br>термопар<br>в слое, $\text{мм}$    | $\delta_1$     |             |   |   |   |
|  | $\delta_2$     |             |   |   |   |
|  | $\delta_3$     |             |   |   |   |
|  | $\delta_4$     |             |   |   |   |
| Температура по толщине<br>слоя, $^{\circ}\text{C}$         | $t_{\delta 1}$ |             |   |   |   |
|  | $t_{\delta 2}$ |             |   |   |   |
|  | $t_{\delta 3}$ |             |   |   |   |
|  | $t_{\delta 4}$ |             |   |   |   |

6. Произвести измерение температур в различных точках стенки в стационарном режи-  
ме.

7. Повторить пункты 5-8 до выполнения задачи исследования.

Данные измерений занести в таблицу 4 «Результаты измерений».

Для обработки результатов:

1) Рассчитать тепловой поток через стенку:

плоская стенка:

$$q = \frac{U^2}{R_H F}, \text{ Вт/м}^2;$$

цилиндрическая стенка

$$q_L = \frac{U^2}{R_H L}, \text{ Вт/м};$$

где  $U$  – напряжение тока в цепи нагревателя. В;

$R_H$  – сопротивление нагревателя, ом;

$F$  – площадь поверхности плоской стенки, м<sup>2</sup>;

$L$  – высота цилиндрической стенки, м.

2) По справочникам определить значение коэффициентов теплопроводности материалов стенки.

3) Рассчитать тепловую проводимость или термическое сопротивление стенки по формулам:

для **плоской стенки** тепловая проводимость равна

$$k = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

термическое сопротивление:

$$R = \frac{1}{k} = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}, (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт};$$

для **цилиндрической стенки** линейная тепловая проводимость равна

Таблица 5

**Результаты расчётов**

|  |                | Номер опыта |   |   |   |
|--|----------------|-------------|---|---|---|
|  |                | 1           | 2 | 3 | 4 |
| Тепловой поток через плоскую стенку $q$ , Вт/м <sup>2</sup>      |                |             |   |   |   |
| Тепловой поток через Цилиндр-кую ст. $q_L$ , Вт/м                |                |             |   |   |   |
| Коэффициент теплопроводности слоя стенки, Вт/(м·К)               | $\lambda_1$    |             |   |   |   |
|  | $\lambda_2$    |             |   |   |   |
|  | $\lambda_3$    |             |   |   |   |
| Тепловая проводимость плоской ст-ки $k$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К) |                |             |   |   |   |
| Термическое сопр-ние плоской ст-ки $R$ , (м <sup>2</sup> ·К)/Вт  |                |             |   |   |   |
| Тепловая проводимость Цилиндр. стенки $k_L$ , Вт/(м              |                |             |   |   |   |
| Термическое сопротив-е цилиндр. ст-и $R_L$ , (м·К)/Вт            |                |             |   |   |   |
| Температура наружной поверхности ст. $t_{w2p}$ , °С              |                |             |   |   |   |
| Температура между слоями стенки, °С                              | $t_{1p}$       |             |   |   |   |
|  | $t_{2p}$       |             |   |   |   |
| Температура внутри слоя стенки, °С                               | $t_{\delta 1}$ |             |   |   |   |
|  | $t_{\delta 2}$ |             |   |   |   |
|  | $t_{\delta 3}$ |             |   |   |   |
|  | $t_{\delta 4}$ |             |   |   |   |

$$k_L = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

линейное термическое сопротивление:

$$R_L = \frac{1}{k_L} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}, (\text{м} \cdot \text{К})/\text{Вт};$$

4) По формулам (4) или (8) рассчитать температуры наружной поверхности стенки  $t_{w2p}$  между слоями стенки  $t_{1p}, t_{2p}, t_{3p}$ , внутри одного из слоев  $t_{\delta 1} - t_{\delta 4}$ .

Данные расчетов занести в таблицу 5 «Результаты расчётов». Строки 3, 10 и 11 заполняются при проведении лабораторной работы на цилиндрической стенке, 2, 8 и 9 - на плоской стенке. Строки 8 и 10 заполняются при исследовании влияния различных факторов на тепловую проводимость стенки, 9 и 11 - на термическое сопротивление стенки.

По результатам расчетов построить графики зависимостей согласно задаче исследования.

Выполнить анализ результатов исследования. Для обработки результатов:

1. На основании проведенных исследований произвести расчет массового расхода теплоносителя  $G$ , его средней скорости движения  $w$ , критериев  $Re$ ,  $Pr$ . Теплофизические свойства теплоносителя, материалов трубы и изоляции найти по определяющей температуре.

2. В зависимости от режима движения теплоносителя в трубе (значения критерия  $Re$ ) по уравнениям (3) – (5) рассчитать критерий  $Nu$  и коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$ . По уравнениям (6) – (9) рассчитать коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$ . Далее определить максимальное располагаемое количество тепла на входе в трубопровод  $Q_{max}$  по уравнению (10), потери тепла в трубопроводе  $Q_R$  и  $Q_T$  по уравнениям (1) и (11) и долю потерь в процентах:

$$\Delta Q = \frac{Q_R}{Q_{max}} \cdot 100 \%$$

Если температура теплоносителя на выходе превышает температуру воздуха менее чем на один градус, то расчет  $Q_R$  по формуле (1) не выполнять, а потери тепла через стенку трубы и слой теплоизоляции  $Q_R$  принять равными максимальному располагаемому количеству тепла на входе в трубопровод  $Q_{max}$ .

3. Полученные данные занести в табл. 2 приложения, записи в которой должны соответствовать записям в табл. 1 приложения.

4. По результатам расчетов построить графики:

**Задача 1.** Зависимость линейного термического сопротивления от толщины изоляции  $R_L=f(\delta_{из})$  для различных материалов изоляции и диаметров трубопровода. Зависимость располагаемого количества тепла на выходе из трубопровода от толщины изоляции  $Q=f(\delta_{из})$ .

**Задача 2.** Зависимость линейного термического сопротивления от толщины изоляции  $R_L=f(\delta_{из})$ . Зависимость потерь тепла от длины трубопровода для различной толщины изоляции. По графику определить толщину изоляции для допустимого значения теплопотерь. Построить несколько графиков для различных диаметров и материалов изоляции.

Форма отчетности: отчет по практическому занятию выполнить в виде главы заключительного отчёта, представляемого для получения зачёта [7].

Задания для самостоятельной работы:

5. Освоить теоретический материал лекций;

6. Изучить материал дисциплины по учебникам основной литературы [1,2].

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию:

При подготовке к практическому занятию использовать учебно-методическое обеспечение [1,2] и дополнительную литературу [5,6].

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Какова цель работы? Из чего состоит лабораторная установка?

2. Что такое коэффициент теплопроводности? Сформулируйте закон теплопроводности Фурье.

3. Запишите дифференциальное уравнение теплопроводности. Какие задачи решает это уравнение?

4. Перечислите условия однозначности решения дифференциального уравнения теплопроводности.

5. Какие граничные условия задаются при решении задачи о теплопроводности плоских и цилиндрических стенок?

#### **Практическое занятие №4.** Расчет термического сопротивления изоляции

Цель работы – изучение **термического сопротивления изоляции трубопроводов.**

Задание:

1. На основании проведенных исследований произвести расчет массового расхода теплоносителя  $G$ , его средней скорости движения  $w$ , критериев  $Re$ ,  $Pr$ . Теплофизические свойства теплоносителя, материалов трубы и изоляции найти по определяющей температуре.

2. В зависимости от режима движения теплоносителя в трубе (значения критерия  $Re$ ) по уравнениям (3) – (5) рассчитать критерий  $Nu$  и коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$ . По уравнениям (6) – (9) рассчитать коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$ . Далее определить максимальное располагаемое количество тепла на входе в трубопровод  $Q_{max}$  по уравнению (10), потери тепла в трубопроводе  $Q_R$  и  $Q_T$  по уравнениям (1) и (11) и долю потерь в процентах:

$$\Delta Q = \frac{Q_R}{Q_{max}} \cdot 100 \%$$

Если температура теплоносителя на выходе превышает температуру воздуха менее чем на один градус, то расчет  $Q_R$  по формуле (1) не выполнять, а потери тепла через стенку трубы и слой теплоизоляции  $Q_R$  принять равными максимальному располагаемому количеству тепла на входе в трубопровод  $Q_{max}$ .

3. Полученные данные занести в табл. 2 приложения, записи в которой должны соответствовать записям в табл. 1 приложения.

4. По результатам расчетов построить графики:

**Задача 1.** Зависимость линейного термического сопротивления от толщины изоляции  $R_L=f(\delta_{из})$  для различных материалов изоляции и диаметров трубопровода. Зависимость располагаемого количества тепла на выходе из трубопровода от толщины изоляции  $Q=f(\delta_{из})$ .

**Задача 2.** Зависимость линейного термического сопротивления от толщины изоляции  $R_L=f(\delta_{из})$ . Зависимость потерь тепла от длины трубопровода для различной толщины изоляции. По графику определить толщину изоляции для допустимого значения теплопотерь. Построить несколько графиков для различных диаметров и материалов изоляции.

Порядок выполнения:

1. В каталоге AD диска C выбрать файл “Изоляция” и запустить на исполнение (поместить на пиктограмму курсор мыши и дважды щелкнуть по левой клавише мыши). На экране компьютера появится окно программы, аналогичное рис.10;

2. Выбрать материал стенки трубы и теплоизоляции при помощи комбинированных списков;

3. Установить размеры трубы и толщину изоляции регуляторами.

4. Задать температуру теплоносителя на входе в трубу, температуру воздуха, расход теплоносителя и скорость воздуха.

5. Записать в таблицу размеры и материал трубы и теплоизоляции; показания приборов, определить теплопотери по графику .

6. Пункты 2 – 5 повторить до выполнения задачи исследования.

Форма отчетности: отчёт по практическому занятию выполнить в виде главы заключительного отчёта, представляемого для получения зачёта [7].

Задания для самостоятельной работы:

7. Освоить теоретический материал лекций;

8. Изучить материал дисциплины по учебникам основной литературы [1,2].

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию:

При подготовке к практическому занятию использовать учебно-методическое обеспечение [1,2] и дополнительную литературу [5,6].

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Определите цель работы.

2. В чем заключается методика проведения эксперимента?

3. Как произвести расчет теплопередачи через многослойную цилиндрическую стенку?

4. Что даёт анализ термических сопротивлений теплопередачи через многослойную цилиндрическую стенку?

5. Что является движущей силой процесса теплопередачи? Опишите способы снижения теплопотерь.

#### **Лабораторная работа №5.** Определение газодинамических свойств рабочей жидкости

Занятие проводится в интерактивной форме «Дискуссия». Расширенный список вопросов для самопроверки позволяет студентам высказаться по широкому кругу вопросов, связанных с эксплуатацией автотранспорта. Обсуждению подлежит также практическое исследование влияния различных факторов на скорость падения тела в вязкой среде.

Цель работы – изучение влияния **вязкости** среды на скорость падения. Вязкость веществ количественно определяется коэффициентами кинематической  $\nu$  и динамической  $\mu$  вязкости, зависящими от температуры, и проявляется в возникновении вязких сил, **тормозящих движение и распространение тепла** в текучих веществах.

#### Задание:

1. Рассчитать скорость осаждения по результатам опытов

$$w_O = \frac{H}{\tau},$$

где  $H$  – расстояние, пройденное частицей, м;

$\tau$  – время осаждения частицы, с;

$w_O$  – экспериментальная скорость осаждения, м/с.

2. Определить значение критерия  $Ar$  по формуле (7). Данные для расчета взять из журнала наблюдений и справочников.

3. Рассчитать критерий  $Re$  по формуле (6) и определить режим осаждения.

4. По формулам (3) – (5) рассчитать теоретическую скорость осаждения  $w_T$  и найти расхождение между опытной  $w_O$  и теоретической  $w_T$  скоростью осаждения по формуле

$$\Delta w = \frac{|w_O - w_T|}{w_O} 100 \%.$$

5. Результаты расчетов занести в таблицу 1.

6. По полученным данным построить **зависимости скорости** осаждения от величин, **влияющих** на процесс осаждения, согласно поставленной задачи исследования.

На основании проведенных исследований и выполненных расчетов сделать анализ работы.

#### Порядок выполнения:

1. Запустить операционную систему *Windows3.1*, для этого нужно набрать команду *win*;

2. В окне “*Лабораторные работы*” выбрать программу “*Осаждение*” и запустить на исполнение (поместить на пиктограмму программы курсор мыши и дважды щелкнуть по левой клавише мыши). На экране компьютера появится окно программы, аналогичное рис. 2;

3. Выбрать рабочую среду из списка и материал частиц из списка;

4. Задать температуру рабочей среды регулятором;

5. Запустить секундомеры кнопкой запуска, частицы начнут двигаться вниз;

6. По достижении частицей нижнего края цилиндра секундомер остановить кнопкой остановки. Опыт продолжается до тех пор, пока все частицы не коснутся нижнего края цилиндров;

7. В журнал наблюдений записать информацию о рабочей среде, материале и размерах частиц, показания термометра, секундомеров и высоту осаждения частиц;

8. После того, как установка будет готова к работе, пункты 3 – 7 повторить требуемое количество раз.

Свойства материалов частиц и рабочих сред определить при температуре среды в опытах из справочной литературы.

Форма отчетности: отчет по практическому занятию выполнить в виде главы заключительного отчёта, представляемого для получения зачёта [7].

#### Задания для самостоятельной работы:

9. Освоить теоретический материал лекций;

10. Изучить материал дисциплины по учебникам основной литературы [1,2].

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию:

При подготовке к практическому занятию использовать учебно-методическое обеспечение [1,2] и дополнительную литературу [5,6].

Контрольные вопросы для самопроверки

1. В чем состоит цель работы?
2. Опишите баланс сил при установившемся осаждении одиночной частицы.
3. Что такое коэффициент сопротивления среды, от чего он зависит, какое отношение имеет к автомобилю?
4. Как вязкость моторного масла влияет на процесс запуска двигателя?
5. Как изменится скорость осаждения, если плотность частицы увеличить в два раза, если диаметр частицы уменьшить в два раза, если вязкость среды увеличить в два раза, если плотность среды уменьшить в два раза?
6. Как влияет температура среды на скорость осаждения?
7. Что такое установившееся и неустойчивое осаждение?
8. Какие теплотехнические свойства автоэксплуатационных материалов влияют на эффективность использования автомобиля в процессе перевозок грузов?

**Практическое занятие №6.** Теплообменник «Труба в трубе»

Цель работы – исследование параметров, влияющих на **теплопередачу** в теплообменнике типа “труба в трубе”.

Задание:

1. Рассчитать массовые расходы  $G_1$  и  $G_2$ , скорости движения теплоносителей  $w_1$  и  $w_2$ , критерии  $Re_1$  и  $Re_2$  для теплоносителей во внутренней трубе и кольцевом канале. Теплофизические свойства теплоносителей и материала стенки трубы найти по справочникам при определяющей температуре.

2. По критериям  $Re$  определить режим движения теплоносителя (**ламинарный, переходный, турбулентный**) и рассчитать коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1$  во внутренней трубе по формулам (3) – (7) и  $\alpha_2$  в кольцевом канале по формулам (3) – (9).

3. Вычислить **расчетный** коэффициент теплопередачи  $k_P$  по формуле (2).

4. По формуле (1) рассчитать количество тепла  $Q$ , переданное через стенку трубы **от одного** теплоносителя **к другому**. Вычислить изменения количества тепла  $Q_1$  во внутренней трубе по формуле (10) и  $Q_2$  в кольцевом канале по формуле (11).

5. По данным проведенных измерений рассчитать коэффициент теплопередачи  $k_{И}$  (по результатам **измерений**) через цилиндрическую стенку по формуле

$$k_{И} = \frac{Q_1 + Q_2}{2\Delta t F}.$$

6. Найти расхождение между  $k_{И}$  и  $k_P$  в процентах (относительную погрешность  $k$ , полученного по результатам измерений

$$\delta = \frac{k_{И} - k_P}{k_{И}} 100 \%.$$

7. Полученные данные занести в таблицу 10, записи в которой должны соответствовать записям в таблице 9. По результатам расчетов студенты строят графики зависимостей согласно задаче исследования.

Порядок выполнения:

1. Выбрать программу “Труба в трубе” и запустить на исполнение (поместить на пиктограмму программы курсор мыши и дважды щелкнуть по левой клавише мыши). На экране компьютера появится окно программы, аналогичное рисунку 14;

2. Задать размеры труб регуляторами;

3. Выбрать материал стенки внутренней трубы и вид теплоносителей из списков;

4. Выбрать схему движения теплоносителей при помощи переключателей;

5. Задать расходы теплоносителей, температуры теплоносителей на входе во внутреннюю трубу и в кольцевом канале;

6. В таблицу результатов наблюдений записать материал и размеры труб, тип теплоносителя, схема движения потоков, показания приборов;

7. Пункты 3 – 6 повторить до выполнения задачи исследования.

Форма отчетности: отчёт по практическому занятию выполнить в виде главы заключительного отчёта, представляемого для получения зачёта [7].

Задания для самостоятельной работы:

11. Освоить теоретический материал лекций;

12. Изучить материал дисциплины по учебникам основной литературы [1,2].

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию:

При подготовке к практическому занятию использовать учебно-методическое обеспечение [1,2] и дополнительную литературу [5,6].

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Какова цель работы?

2. В чём заключается методика выполнения работы?

3. Как рассчитать теплопередачу через цилиндрическую стенку при граничных условиях третьего рода?

4. Назовите основные типы теплообменных аппаратов. Каковы достоинства и недостатки теплообменника “труба в трубе”?

5. Назовите движущую силу процесса теплопередачи? Что такое термическое сопротивление процесса теплопередачи?

### **Практическое занятие №7. Гидравлическое сопротивление трубопровода**

Цель работы – исследование влияния различных факторов на гидравлическое сопротивление **прямой гладкой** трубы при **стабилизированном движении** в ней однофазной жидкости (газа). Объект исследования – модель реального трубопровода, выполненная на компьютере.

Задание:

1. Определить плотность  $\rho$  и вязкость  $\mu$  жидкости (газа) при температуре рабочего вещества.

2. Рассчитать массовый расход  $G$  и среднюю скорость движения жидкости  $w$ .

3. Рассчитать **гидравлические диаметры** труб  $d$  по формуле (2), критерии  $Re$  по формуле (3), по таблицам 14 – 17 найти фактор формы  $k_H$  верхней трубы, по формулам (4) – (6) или таблицам определить линейные коэффициенты сопротивления трения  $\lambda$ , рассчитать  $\lambda_H$  по формуле (7).

4. Определить перепад давления  $\Delta p_O$  в трубах по показаниям дифманометров (**опытный**), рассчитать перепад давления  $\Delta p_T$  (**теоретический**) по формуле (1).

5. Сравнить значения  $\Delta p_O$  и  $\Delta p_T$ , определив относительную погрешность в процентах.

Порядок выполнения:

1. В окне “*Лабораторные работы*” выбрать программу “*Гидравлическое сопротивление*” и запустить на исполнение (поместить на пиктограмму программы курсор мыши и дважды щелкнуть по левой клавише мыши). На экране компьютера появится окно программы, аналогичное рисунку 15;

2. Выбрать форму сечения трубы из списка и задать размеры сечения регуляторами;

3. Установить длину труб регулятором;

4. Выбрать рабочее вещество из списка;

5. Задать температуру рабочего вещества и массовый расход регуляторами;

6. В журнал наблюдений записать информацию о рабочем веществе, форме и размерах сечения трубы, длине трубы, показания приборов;

7. Пункты 2 – 6 повторить нужное количество раз.

Форма отчетности: отчёт по практическому занятию выполнить в виде главы заключительного отчёта, представляемого для получения зачёта [7].

Задания для самостоятельной работы:

13. Освоить теоретический материал лекций;

14. Изучить материал дисциплины по учебникам основной литературы [1,2].

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию:

При подготовке к практическому занятию использовать учебно-методическое обеспечение [1,2] и дополнительную литературу [5,6].

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Какова цель работы?
2. Опишите методику измерения перепада давления в трубопроводе.
3. Какие свойства жидкости (газа), движущейся в трубе, влияют на перепад давления?
4. Как рассчитать перепад давления по длине трубы?

## **10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

Microsoft Imagine Premium: Microsoft Windows Professional 7;

Microsoft Office 2007 Russian Academic OPEN No Level;

Антивирусное программное обеспечение Kaspersky Security;

Adobe Reader.

## **11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

| <i>Вид занятия</i> | <i>Наименование аудитории</i>      | <i>Перечень основного оборудования</i>   | <i>№ ПЗ</i> |
|--------------------|------------------------------------|--|-------------|
| <b>1</b>           | <b>2</b>                           | <b>3</b>   | <b>4</b>    |
| Лк                 | Лекционная / семинарская аудитория | Учебная мебель   |             |
| ПЗ                 | Лекционная / семинарская аудитория | Учебная мебель   | №1 ... №7   |
| СР                 | Читальный зал №1                   | Учебная мебель; Оборудование 10-ПК i5-2500/Н67/4Gb (монитор TFT19 Samsung); принтер HP LaserJet P2055D | -           |

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ  
ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)**

| № компетенции | Элемент компетенции   | Раздел                       | Тема   | ФОС                         |
|---------------|---|------------------------------|--|-----------------------------|
| ПК-12         | владением знаниями направлений полезного использования природных ресурсов, энергии и материалов при эксплуатации, ремонте и сервисном обслуживании транспортных и транспортно-технологических машин и оборудования различного назначения, их агрегатов, систем      | 1. Основы термодинамики      | 1.1. Предмет теплотехники. Основные понятия и определения термодинамики. | вопросы к зачету<br>1.1-1.8 |
|               |   |                              | 1.2. Первый закон термодинамики  |                             |
|               |   |                              | 1.3. Второй закон термодинамики  |                             |
|               |   |                              | 1.4. Термодинамические процессы  |                             |
| ОПК-3         | готовностью применять систему фундаментальных знаний (математических, естественнонаучных, инженерных и экономических) для идентификации, формулирования и решения технических и технологических проблем эксплуатации транспортно-технологических машин и комплексов | 2. Техническая термодинамика | 2.1. Термодинамические циклы ДВС   | вопросы к зачету<br>2.1-2.5 |
|               |   |                              | 2.2. Термодинамический цикл ГТУ  |                             |
|               |   |                              | 2.3. Термодинамические циклы комбинированных двигателей                  |                             |
|               |   |                              | 2.4. Термодинамические циклы ДВС   |                             |
| ОПК-3         | готовностью применять систему фундаментальных знаний (математических, естественнонаучных, инженерных и экономических) для идентификации, формулирования и решения технических и технологических проблем эксплуатации транспортно-технологических машин и комплексов | 3. Основы теории теплообмена | 3.1. Основные сведения теории теплообмена. Теплопроводность              | вопросы к зачету<br>3.1-3.6 |
|               |   |                              | 3.2. Конвекция. Теплопередача  |                             |
|               |   |                              | 3.3. Излучение   |                             |

## 2. Вопросы к зачету

| № п/п | Компетенции |   | ВОПРОСЫ К ЗАЧЁТУ   | № и наименование раздела |                              |
|-------|-------------|---|--|--------------------------|------------------------------|
|       | Код         | Определение   |  |                          |                              |
| 1     | 2           | 3   | 4  | 5                        |                              |
| 1.    | ПК-12       | <p>владение знаниями направлений полезного использования природных ресурсов, энергии и материалов при эксплуатации, ремонте и сервисном обслуживании транспортных и транспортнотехнологических машин и оборудования различного назначения, их агрегатов, систем</p>       | <p><b>1.1.</b> Предмет теплотехники. Связь с другими отраслями знаний. Основные понятия и определения термодинамики: равновесное состояние, равновесный процесс, PV-диаграмма.</p> <p><b>1.2.</b> Первый закон термодинамики: сущность, формулировка, аналитическое выражение, дифференциальная форма.</p> <p><b>1.3.</b> Второй закон термодинамики: сущность, формулировка, аналитическое выражение.</p> <p><b>1.4.</b> Цикл теплового двигателя. КПД цикла Карно. Термический КПД.</p> <p><b>1.5.</b> Изотермический процесс. Диаграммы, вид кривых, определение работы и тепла.</p> <p><b>1.6.</b> Изобарный процесс. Диаграммы, вид кривых, определение работы и тепла.</p> <p><b>1.7.</b> Адиабатный процесс. Диаграммы, вид кривых, определение работы и тепла.</p> <p><b>1.8.</b> Изохорный процесс. Диаграммы, вид кривых, определение работы и теп</p> | 1. Основы термодинамики  |                              |
|       |             |   | <p><b>2.1.</b> Термодинамический цикл Отто.</p> <p><b>2.2.</b> Термодинамический цикл Тринклера.</p> <p><b>2.3.</b> Термодинамический цикл Дизеля.</p> <p><b>2.4.</b> Термодинамический цикл ГТУ.</p> <p><b>2.5.</b> Термодинамические циклы комбинированных двигателей.</p>   |                          | 2. Техническая термодинамика |
|       |             |   | <p><b>3.1.</b> Теория теплообмена. Три вида теплообмена. Основные сведения теории теплообмена.</p> <p><b>3.2.</b> Теплопроводность. Уравнение Фурье. Теплопроводность плоской стенки.</p> <p><b>3.3.</b> Теплопроводность плоской стенки. Коэффициент термического сопротивления.</p>  |                          |                              |
| 2.    | ОПК-3       | <p>готовностью применять систему фундаментальных знаний (математических, естественнонаучных, инженерных и экономических) для идентификации, формулирования и решения технических и технологических проблем эксплуатации транспортнотехнологических машин и комплексов</p> | <p><b>1.1.</b> Предмет теплотехники. Связь с другими отраслями знаний. Основные понятия и определения термодинамики: равновесное состояние, равновесный процесс, PV-диаграмма.</p> <p><b>1.2.</b> Первый закон термодинамики: сущность, формулировка, аналитическое выражение, дифференциальная форма.</p> <p><b>1.3.</b> Второй закон термодинамики: сущность, формулировка, аналитическое выражение.</p> <p><b>1.4.</b> Цикл теплового двигателя. КПД цикла Карно. Термический КПД.</p> <p><b>1.5.</b> Изотермический процесс. Диаграммы, вид кривых, определение работы и тепла.</p> <p><b>1.6.</b> Изобарный процесс. Диаграммы, вид кривых, определение работы и тепла.</p> <p><b>1.7.</b> Адиабатный процесс. Диаграммы, вид кривых, определение работы и тепла.</p> <p><b>1.8.</b> Изохорный процесс. Диаграммы, вид кривых, определение работы и теп</p> | 1. Основы термодинамики  |                              |
|       |             |   | <p><b>2.1.</b> Термодинамический цикл Отто.</p> <p><b>2.2.</b> Термодинамический цикл Тринклера.</p> <p><b>2.3.</b> Термодинамический цикл Дизеля.</p> <p><b>2.4.</b> Термодинамический цикл ГТУ.</p> <p><b>2.5.</b> Термодинамические циклы комбинированных двигателей.</p>   |                          | 2. Техническая термодинамика |
|       |             |   | <p><b>3.1.</b> Теория теплообмена. Три вида теплообмена. Основные сведения теории теплообмена.</p> <p><b>3.2.</b> Теплопроводность. Уравнение Фурье. Теплопроводность плоской стенки.</p> <p><b>3.3.</b> Теплопроводность плоской стенки. Коэффициент термического сопротивления.</p>  |                          |                              |

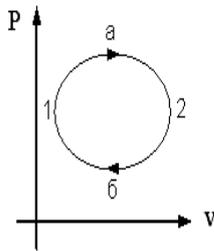
|  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
|  |  |  | <p><b>3.4.</b> Конвекция. Уравнение Ньютона. Тепловой и динамический подслон.</p> <p><b>3.5.</b> Тепловое излучение. Теплопередача, интенсификация теплообмена.</p> <p><b>3.6.</b> Теплообменные аппараты.</p> |  |
|--|--|--|--|--|

### 3. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

| Показатели  | Оценка     | Критерии   |
|---|------------|--|
| <p><b>Знать:</b><br/><b>ПК-12</b><br/>- основные законы термодинамики и теории теплообмена;<br/>- способы интенсификации теплообмена;<br/>- принципы теплоизоляции;<br/><b>ОПК-3</b><br/>- основные физические явления, фундаментальные понятия, законы и теории классической и современной физики; современную научную аппаратуру; основные физические явления; фундаментальные понятия, законы и теории классической и современной физики;</p> <p><b>Уметь:</b><br/><b>ПК-12</b><br/>- использовать методы анализа функционирования теплотехнических устройств и аппаратов, способы экономии тепловой энергии, способы использования вторичных энергетических ресурсов;<br/><b>ОПК-3</b><br/>- выделять конкретное физическое содержание в прикладных задачах профессиональной деятельности;</p> <p><b>Владеть:</b><br/><b>ПК-12</b><br/>- методами расчета основных термодинамических процессов, тепловых циклов двигателей внутреннего сгорания, анализа их эффективности по исходным данным.<br/><b>ОПК-3</b><br/>- методами выполнения элементарных исследований в области профессиональной деятельности.</p> | зачтено    | <p>Обучающийся демонстрирует знание базовых понятий дисциплины, термодинамических процессов.<br/>Умеет грамотно излагать свои мысли.<br/>Владеет способностью свободно изображать на диаграммах термодинамические циклы, описывать процессы, происходящие в реальном теплотехническом устройстве, решать задачи с расчётами термодинамических параметров, способен вести профессиональный диалог.</p>            |
|   | не зачтено | <p>Не знает базовых понятий и терминов; не знает некоторых термодинамических процессов.<br/>Затрудняется изображать на диаграммах термодинамические циклы, описывать процессы, происходящие в реальном теплотехническом устройстве; демонстрирует низкий уровень умений при работе с текстом задач.<br/>Не владеет способностью формулировать свои мысли о задачах, решаемых для теплотехнических устройств.</p> |

#### 4. Тесты

##### ■ Задание № 1



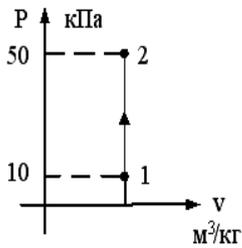
Рабочее тело (например, водяной пар) (см. рис.) совершает ...

Варианты ответа

[Решение](#)

- круговой процесс (цикл) 1 – а – 2 – б – 1
- обратимый термодинамический процесс 1 – а – 2
- обратимый термодинамический процесс 2 – б – 1
- необратимый круговой процесс

##### ■ Задание № 2



$T_1 = 100 \text{ K}$ . В точке 2 изохорного процесса, представленного на графике, температура равна \_\_\_ K.

Варианты ответа

[Решение](#)

- $T_2 = 500 \text{ K}$
- $T_2 = 100 \text{ K}$
- $T_2 = 20 \text{ K}$
- $T_2 = 500^\circ \text{C}$

##### ■ Задание № 3

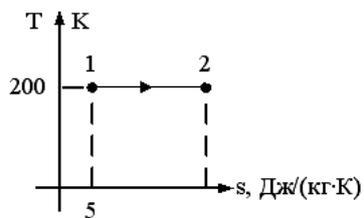
Аналитическое выражение первого закона термодинамики имеет вид ...

Варианты ответа

[Решение](#)

- $\delta Q = dU$
- $\delta Q = dU + \delta \mathcal{L}$
- $\delta Q = \delta \mathcal{L}$
- $\delta \mathcal{L} = -dU$

I Задание № 4



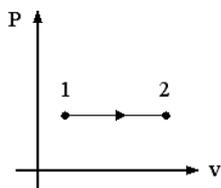
Если количество теплоты, которое подводится в изотермическом процессе 1 – 2 равно 500 Дж/кг, то энтропия в точке 2 равна ...

Варианты ответа

Решение

- 5,4
- 7,5
- 2,5
- 4,6

I Задание № 5



Количество теплоты, сообщаемое газу при нагревании в процессе 1 – 2, изображенном на графике, равно ...

Варианты ответа

Решение

- $q = \mu c_p \int_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1)$
- $q = c_v \int_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1)$
- $q = c_p \int_{t_2}^{t_1} (t_1 - t_2)$
- $q = c_p \int_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1)$

I Задание № 6

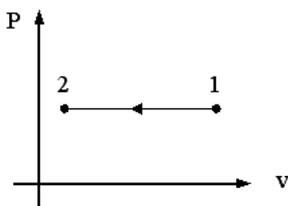
Максимально возможное влагосодержание достигается при ...

Варианты ответа

Решение

- в точке пересечения линии постоянного влагосодержания с линией  $\varphi = 60\%$
- $\varphi = 0\%$
- $\varphi = 50\%$
- $\varphi = 100\%$

I Задание № 7



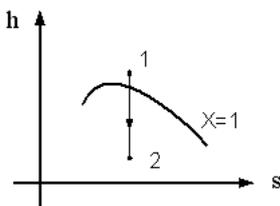
Для идеального газа изменение температуры в процессе 1 – 2, изображенном на графике, соответствует соотношению ...

Варианты ответа

Решение

- $T_2 = T_1$
- $T_2 \leq T_1$
- $T_2 > T_1$
- $T_2 < T_1$

I Задание № 8



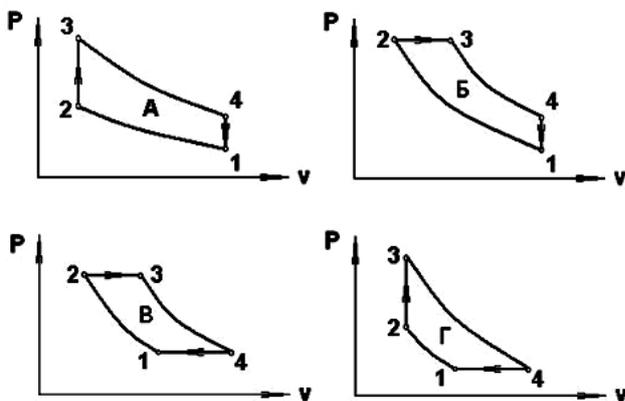
Работа расширения пара в процессе 1 – 2, изображенном на графике, вычисляется по формуле ...

Варианты ответа

Решение

- $\ell = h_1 - h_2 - (p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2)$
- $\ell = h_1 - h_2$
- $\ell = p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2$
- $\ell = 0$

I Задание № 9



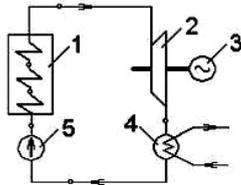
Цикл карбюраторного ДВС на представленных графиках обозначен буквой ...

Варианты ответа

Решение

- Б
- А
- В
- Г

I Задание № 10



Элементы 4 и 5 паросиловой установки, изображенной на рисунке, соответствуют ...

Варианты ответа

[Решение](#)

- 4 – паровая турбина, 5 – электрический генератор
- 4 – паровой котел, 5 – конденсатор
- 4 – конденсатор, 5 – питательный насос
- 4 – паровой котел, 5 – паровая турбина

I Задание № 11

Холодильный коэффициент обратного цикла Карно при  $t_1=127^\circ\text{C}$ ,  $t_2=27^\circ\text{C}$  равен ...

Варианты ответа

[Решение](#)

- 0,33
- 0,27
- 3,7
- 3

I Задание № 12

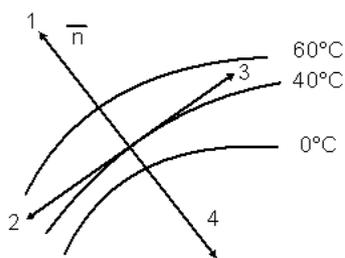
Техническую работу на сжатие и перемещение газа в поршневом компрессоре производят ...

Варианты ответа

[Решение](#)

- цилиндр с поршнем компрессора
- приводной двигатель
- всасывающий и нагнетательный клапаны
- шатун и коленвал

I Задание № 13



Направление градиента температуры, показанного на графике, обозначено цифрой ...

Варианты ответа

[Решение](#)

- 3
- 4
- 1
- 2

Задание № 14

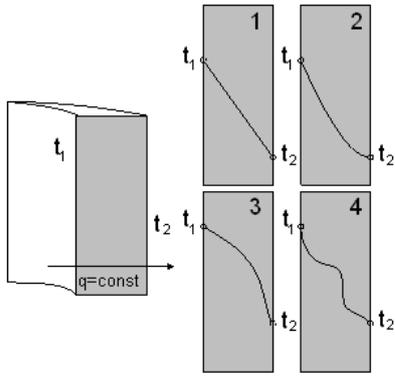


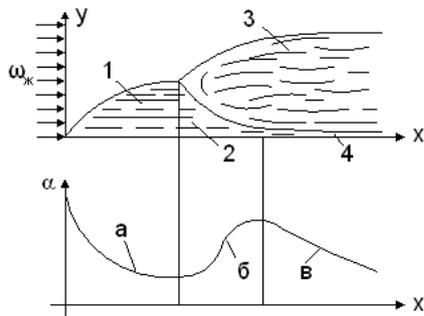
График распределения температуры по толщине однородной однослойной цилиндрической стенки, представленной на рисунке, обозначен цифрой ...

Варианты ответа

Решение

- 1
- 2
- 4
- 3

Задание № 15



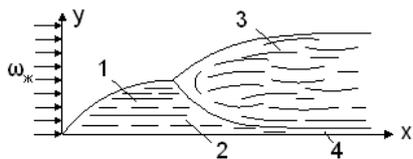
На участке б коэффициент теплоотдачи увеличивается из-за ...

Варианты ответа

Решение

- увеличения толщины ламинарного подслоя
- уменьшения толщины ламинарного подслоя
- увеличения или постоянства толщины ламинарного подслоя
- постоянства толщины ламинарного подслоя

Задание № 16



Для расчета локальных коэффициентов теплоотдачи на участке 3 используется уравнение подобия ...

Варианты ответа

Решение

- $\overline{Nu}_{жс} = 0,66 \cdot Re_{жс}^{0,5} \cdot Pr^{0,33} \cdot (Pr_{жс}/Pr_c)^{0,25}$
- $Nu_{жс} = 0,33 \cdot X^{-0,5} \cdot Re_{жс}^{0,5} \cdot Pr^{0,33} \cdot (Pr_{жс}/Pr_c)^{0,25}, Re_{жс}$
- $\overline{Nu}_{жс} = 0,037 \cdot Re_{жс}^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot (Pr_{жс}/Pr_c)^{0,25}$
- $Nu_{жс} = 0,03 \cdot X^{-0,2} \cdot Re_{жс}^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot (Pr_{жс}/Pr_c)^{0,2}$

Задание № 17

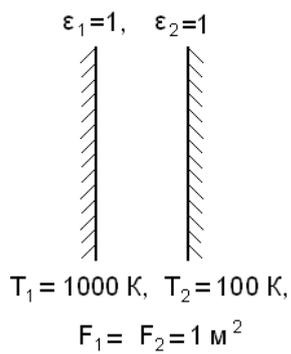
Не излучают и не поглощают лучистую энергию следующие газы ...

Варианты ответа

Решение

- $C_2H_5OH$  и  $H_2O$
- $CO_2$  и  $H_2O$
- $Ar$  и  $N_2$
- $NH_3$  и  $H_2O$

Задание № 18



Для 2-х плоскопараллельных поверхностей, представленных на рисунке, плотность результирующего теплового потока от первого тела на второе равна ...

Варианты ответа

Решение

- $q_{1,2} \approx 5,67 \cdot 10^4$
- $q_{1,2} \approx 5,67 \cdot 10^2$
- $q_{1,2} \approx 5,67 \cdot 10^{-4}$
- $q_{1,2} \approx 5,67 \cdot 10^8$

Задание № 19

Стационарный процесс передачи теплоты от более нагретого теплоносителя к менее нагретому через разделяющую их стенку называется ...

Варианты ответа

Решение

- теплоотдачей
- теплопередачей
- тепловым излучением
- теплопроводностью

Задание № 20

Поверхность, необходимая для передачи теплового потока  $Q$  от горячего теплоносителя к холодному, определяется из ...

Варианты ответа

Решение

- уравнения Ньютона – Рихмана
- уравнения теплопередачи
- $Q = k \cdot F \cdot \Delta t$
- уравнения теплового баланса
- уравнения Фурье

Задание № 21

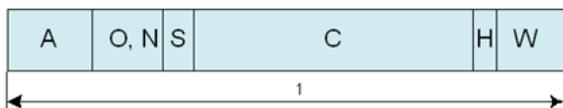
Формула Менделеева МДж/кг для твердого топлива имеет вид ...

Варианты ответа

Решение

- $Q_i^r = 0,34C^r + 1,03H^r - 0,11(O^r - S_C^r) - 0,025W^r$
- $Q_i^r = 0,34C^r + 1,03H^r + 0,11(O^r - S_C^r) - 0,025W^r$
- $Q_i^r = 0,34C^r + 1,03H^r + 0,11(O^r - S_C^r) + 0,025W^r$
- $Q_i^r = 0,34C^r + 1,03H^r - 0,11(O^r - S_C^r) + 0,025W^r$

Задание № 22



На рис. представлен состав жидкого топлива. Цифрой 1 обозначена \_\_\_ масса топлива.

Варианты ответа

Решение

- рабочая
- сухая
- органическая
- влажная беззольная



Задание № 27

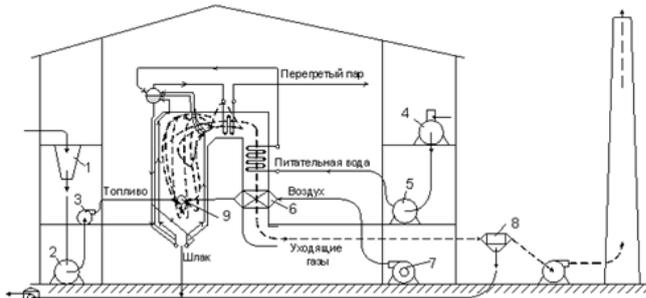
КПД «брутто» современных котлов \_\_\_\_ %.

Варианты ответа

Решение

- ≤ 50
- ≥ 90
- = 100
- ≤ 20

Задание № 28



Варианты ответа

Решение

- золоуловитель
- пылеугольная горелка
- бункер сырого угля
- вентилятор для подачи угольной пыли

## АННОТАЦИЯ рабочей программы дисциплины

### Теплотехника

#### 1. Цель и задачи дисциплины

Целью изучения дисциплины является получение знаний о методах преобразования, передачи и использования теплоты в такой степени, чтобы они могли выбирать и эксплуатировать необходимое теплотехническое оборудование в области автомобильного транспорта, обеспечивая максимальную экономию топливно-энергетических ресурсов и материалов, интенсификацию и оптимизацию технологических процессов, выявление и использование вторичных ресурсов, а также получение практических навыков в решении инженерных задач.

Задачами дисциплины являются:

- получение знаний о теплотехнической терминологии, о законах получения и преобразования энергии, методах анализа эффективности использования теплоты;
- получение знаний о принципах действия, схем, областей применения и потенциальных возможностях основного теплотехнического и теплоэнергетического оборудования (тепловые двигатели, теплообменники, печи и др.);
- приобретение умения экспериментально определять и теоретически рассчитывать характеристики теплового и теплоэнергетического оборудования, производить измерение основных теплотехнических показателей, связанных с профилем инженерной деятельности.

#### 2. Структура дисциплины

2.1. Распределение трудоемкости по отдельным видам учебных занятий, включая самостоятельную работу: лекций – 17 часов, практических занятий – 17 часа, самостоятельная работа обучающихся – 38 часов.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 72 часа, 2 зачетных единицы.

2.2. Основные разделы дисциплины:

- 1 – Термодинамика.
- 2 – Техническая термодинамика.
- 3 – Основы теории теплообмена.

#### 3. Планируемые результаты обучения (перечень компетенций)

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

**ПК-12** владение знаниями направлений полезного использования природных ресурсов, энергии и материалов при эксплуатации, ремонте и сервисном обслуживании транспортных и транспортно-технологических машин и оборудования различного назначения, их агрегатов, систем.

**ОПК-3** готовностью применять систему фундаментальных знаний (математических, естественнонаучных, инженерных и экономических) для идентификации, формулирования и решения технических и технологических проблем эксплуатации транспортно-технологических машин и комплексов

4. Вид промежуточной аттестации: зачет.

*Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе  
на 20\_\_-20\_\_ учебный год*

1. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие дополнения:

---

---

2. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие изменения:

---

---

---

Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.,  
*(разработчик)*

И.о. заведующего кафедрой МиТ \_\_\_\_\_  
*(подпись)* \_\_\_\_\_  
*(Ф.И.О.)*

Программа составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки: 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» от «14» декабря 2015 года № 1470

**для набора 2015 года:** и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «03» июля \_\_\_\_\_ 2018 г. № 413.

**для набора 2016 года:** и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «03» июля \_\_\_\_\_ 2018 г. № 413.

**для набора 2017 года:** и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «03» июля \_\_\_\_\_ 2018 г. № 413.

**для набора 2018 года** и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «03» июля \_\_\_\_\_ 2018 г. № 413.

**Программу составил (и):**

Камнев А.В., ассистент \_\_\_\_\_

Рабочая программа рассмотрена и утверждена на заседании кафедры МиТ

от «11» декабря \_\_\_\_\_ 2018 г., протокол № 6

И.о. заведующего кафедрой МиТ \_\_\_\_\_ Е.А. Слепенко

**СОГЛАСОВАНО:**

И.о. заведующего выпускающей кафедрой \_\_\_\_\_ Е.А. Слепенко

Директор библиотеки \_\_\_\_\_ Т.Ф. Сотник

Рабочая программа одобрена методической комиссией механического факультета

от « 14 » декабря \_\_\_\_\_ 2018 г., протокол № 4.

Председатель методической комиссии факультета \_\_\_\_\_ Г.Н. Плеханов

**СОГЛАСОВАНО:**

Начальник  
учебно-методического управления \_\_\_\_\_ Г.П. Нежевец

Регистрационный № \_\_\_\_\_