

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Северо-Кавказский федеральный университет»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к лабораторным работам по дисциплине

**МЕТОДЫ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ПРИНЯТЫХ РЕШЕНИЙ**

по направлению 08.04.01 «Строительство»  
направленность (профиль) «Теплогазоснабжение населенных мест и  
предприятий»

## ОГЛАВЛЕНИЕ

### **Введение**

**Лабораторная работа № 1.** Исследование изобарного и изохорного процессов

**Лабораторная работа № 2.** Исследование изотермического и адиабатного процессов

**Лабораторная работа № 3.** Исследование теплопроводности материалов

**Лабораторная работа № 4.** Исследование процесса конвективного теплообмена на горизонтальной цилиндрической поверхности

**Лабораторная работа № 5.** Определение теплоотдачи и тепловых характеристик отопительных приборов

**Лабораторная работа № 6.** Испытание и составление теплового баланса водогрейного котла

**Лабораторная работа № 7.** Исследование теплового процесса в теплообменном аппарате

**Лабораторная работа № 8.** Определение коэффициента затекания воды в отопительный прибор и его теплоотдачи

**Лабораторная работа № 9.** Определение динамики давления в системе водяного отопления

### **Приложения**

### **Литература**

## **ВВЕДЕНИЕ**

Настоящее учебное пособие предназначено для проведения лабораторного практикума по дисциплине «Методы термодинамической оценки эффективности принятых решений» у магистров, обучающихся по направлению 08.04.01 - Строительство, профиль подготовки " Теплогазоснабжение населенных мест и предприятий».

Учебная дисциплина «Методы термодинамической оценки эффективности принятых решений» предназначена для формирования профессиональных компетенций у магистров, обучающихся по данному направлению.

Лабораторный практикум рассчитан на закрепление и расширение знаний, полученных при изучении наиболее трудоёмких и сложных теоретических разделов дисциплины. Целью выполнения лабораторных работ является изучение основных законов технической термодинамики и теплопередачи как на специализированных лабораторных стендах со сменными модулями, так и на моделях реальных теплотехнических систем, а также получение навыков решения типовых задач, являющихся основой для специализированных расчетов тепловых режимов нефтяных и газовых скважин.

Лабораторный практикум включает в себя: лабораторные работы (№№ 1-2), направленные на изучение выполнения первого закона термодинамики в основных термодинамических процессах; лабораторные работы (№№ 3-7), направленные на изучение основных законов простых и сложных видов теплопередачи; лабораторные работы (№№ 8-9), направленные на освоение методики расчета основных параметров теплогенераторов и систем теплоснабжения; лабораторные работы (№№ 10-11), направленные на освоение методики расчета основных параметров микроклимата в жилых и производственных помещениях.

Учебное пособие разработано в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования, рабочим учебным планом и рабочей программой дисциплины «Термодинамика и теплотехника».

Лабораторный практикум направлен на формирование профессиональной компетенции: способность выбирать и применять соответствующие методы

моделирования физических, химических и технологических процессов. (ПК-6)

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### Исследование изобарного и изохорного процессов

#### 1.1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное исследование изобарного и изохорного термодинамических процессов, определение взаимосвязи между основными параметрами данных процессов.

#### 1.2 ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ

ПК-6 – Способен проводить оценку технологических решений проектов сетей и систем энергообеспечения

Знания, умения и навыки, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы, в рамках формируемых компетенций:

**Знать:** методы моделирования изобарного и изохорного процессов.

**Уметь:** применять изученные методы моделирования изобарного и изохорного процессов.

**Владеть:** способностью выбирать и применять изученные методы моделирования изобарного и изохорного процессов.

#### 1.3 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

##### 1.3.1 Краткое описание изобарного процесса

Изобарный процесс — процесс изменения состояния термодинамической системы, протекающий при постоянном давлении.

Основным законом, описывающим данный процесс, является **закон Гей-Люссака**: *При постоянном давлении объем газа изменяется пропорционально его температуре:*

$$\frac{V}{T} = \text{const} \text{ при } p = \text{const} \quad (1.1)$$

Уравнение **первого закона термодинамики** при изобарном процессе имеет вид:

$$Q = \Delta U + L,$$

(1.2)

где  $Q$  – тепло, выделенное (поглощенное) газом во время процесса;

$\Delta U$  – изменение внутренней энергии газа во время процесса;

$L$  – работа, совершенная газом в течение процесса.

Работа, совершаемая газом при изобарном процессе, определяется выражением:

$$L = p \cdot \Delta V = p \cdot (V_2 - V_1),$$

(1.3)

где  $p$  – давление газа;

$V_1$  – объем газа в начале процесса;

$V_2$  – объем газа в конце процесса.

Графическая функциональная зависимость между основными параметрами состояния газа, иллюстрирующая изобарный процесс на диаграмме, называется изобарой. Графики изобарных процессов в различных координатах приведены на рисунке 1.1.

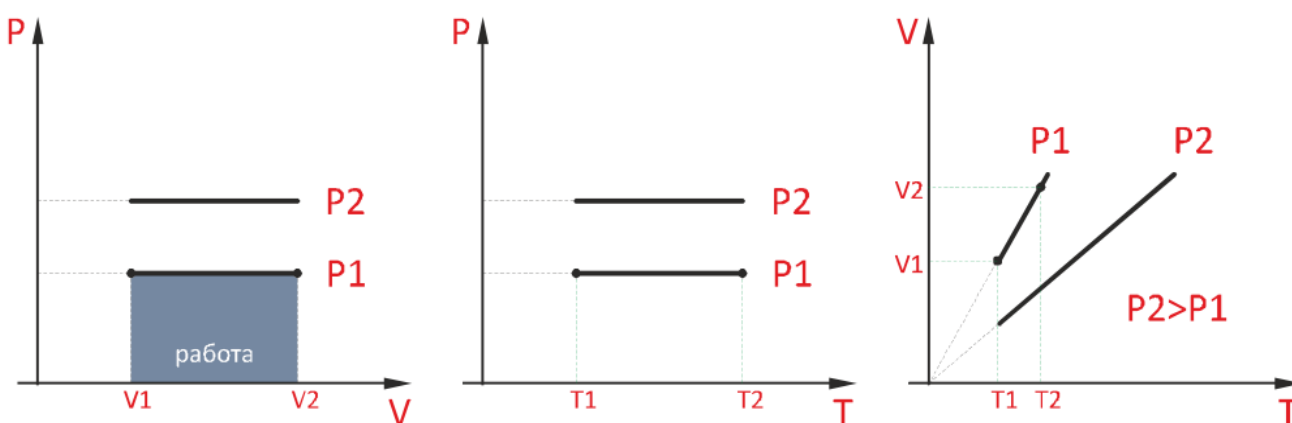


Рисунок 1.1– Графики изобарных процессов

### 1.3.2 Краткое описание изохорного процесса

Изохорный процесс — процесс изменения состояния термодинамической системы, протекающий при постоянном объеме.

Основным законом, описывающим данный процесс, является **закон Шарля**: При постоянном объеме давление газа изменяется пропорционально его температуре:

$$\frac{p}{T} = \text{const при } V = \text{const} \quad (1.4)$$

Уравнение **первого закона термодинамики** при изохорном процессе имеет вид:

$$Q = \Delta U, \quad (1.5)$$

где  $Q$  – тепло, выделенное (поглощенное) газом во время процесса;

$\Delta U$  – изменение внутренней энергии газа во время процесса.

При изохорном процессе работа газом не совершается, так как не происходит изменения его объема:  $L=0$ , так как  $\Delta V=0$

Изменение внутренней энергии газа при изобарном и изохорном процессах определяется выражением:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \cdot \mu R \cdot M \cdot (T_2 - T_1), \quad (1.6)$$

где  $i$  – число степеней свободы газа;

$\mu R = 8,31 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}$  – киломолярная постоянная газа;

$M$  – число молей газа;

$T_1$  – температура газа в начале процесса;

$T_2$  – температура газа в конце процесса.

Графическая функциональная зависимость между основными параметрами состояния газа, иллюстрирующая изохорный процесс на диаграмме, называется изохорой. Графики изохорных процессов в различных координатах приведены на рисунке 1.2.

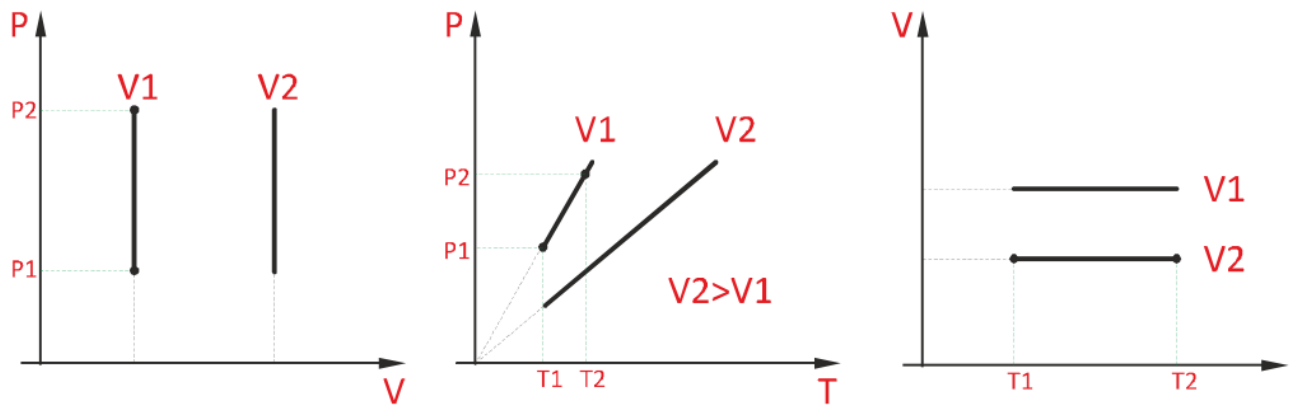
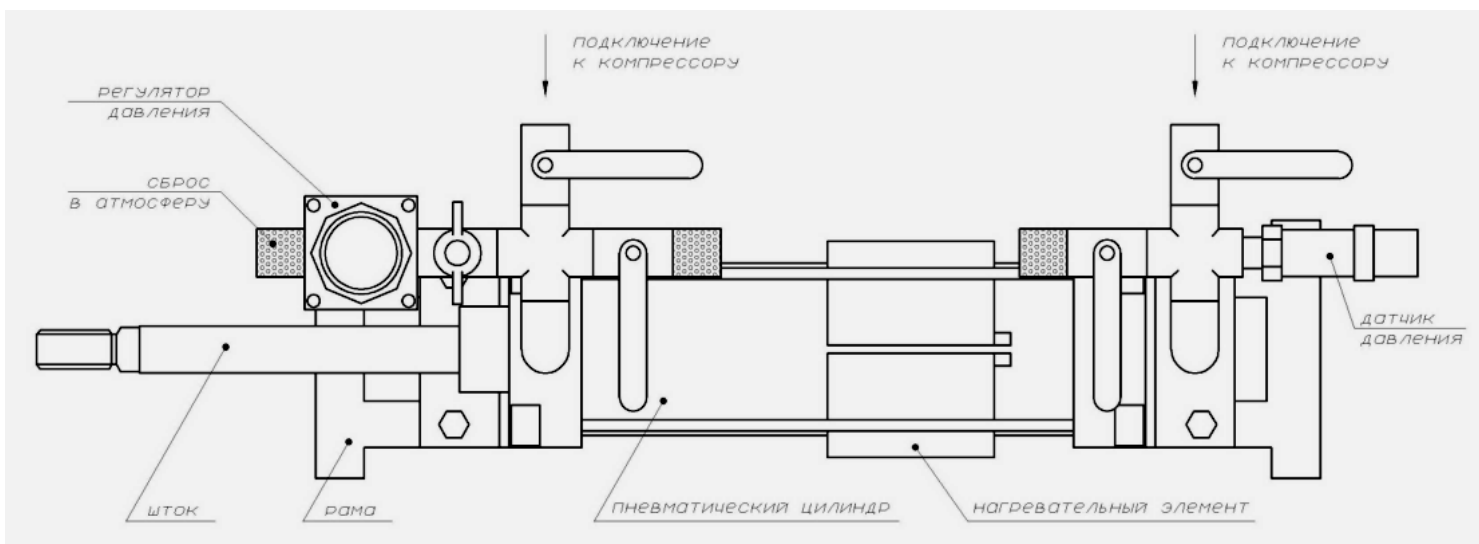


Рисунок 1.2– Графики изохорных процессов

#### 1.4 ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Лабораторная установка представляет собой универсальный стенд НТЦ-14.79, к которому прикрепляется навесное устройство. Навесное устройство конструктивно является пневматическим цилиндром двустороннего действия, установленным на раме (рисунок 1.3). На пневматическом цилиндре смонтирована система подачи и сброса воздуха, а также бандажный нагревательный элемент. Пневматическая схема данного устройства изображена на рисунке 1.4.



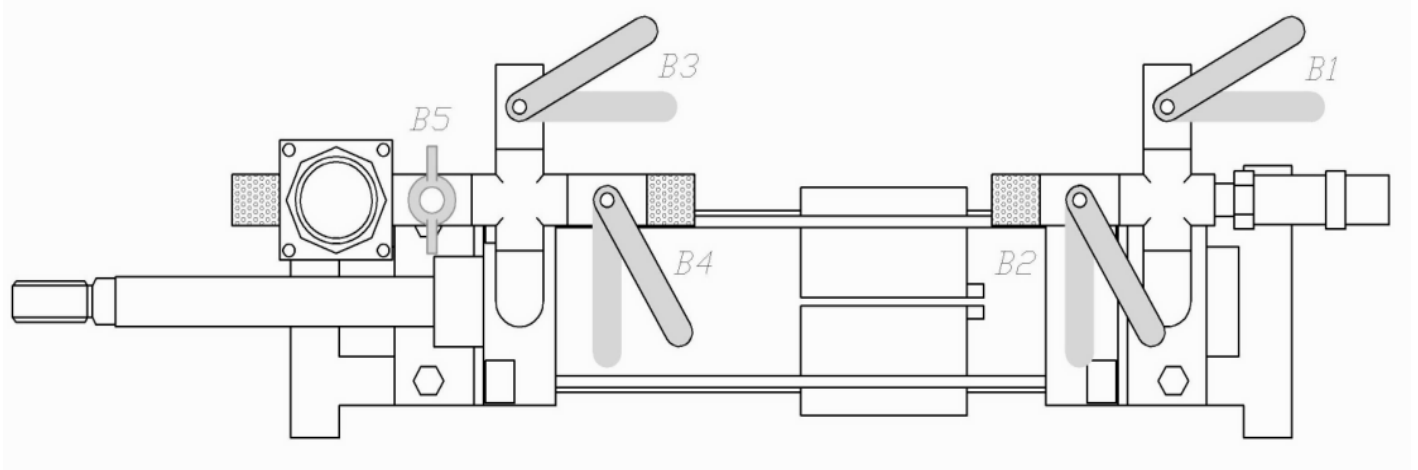


Рисунок 1.3 – Навесное устройство.

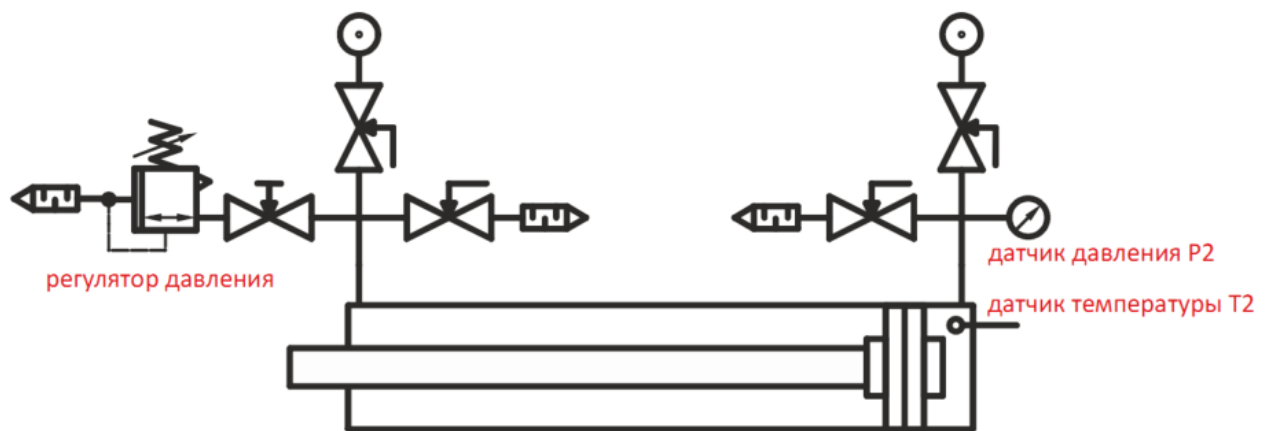


Рисунок 1.4 – Пневматическая схема навесного устройства.

Конструктивно универсальный стенд представляет собой основание, оборудованное:

- 1) интегрированной столешницей;
  - 2) вертикальным рабочим полем с сеткой отверстий для быстрого монтажа навесных устройств;
  - 3) рабочую панель с органами управления и устройствами индикации
- К стенду подключается внешний источник сжатого воздуха (компрессор).

Первоначально перед выполнением лабораторных работ необходимо выполнить следующие действия:

1. Установить навесное устройство на рабочее поле стенда при помощи эксцентриков и зафиксировать их поворотом ручки.

2. Соединить шлангом выход компрессора и штуцера на навесном устройстве. Разъем электрического кабеля навесного устройства подключить к разъему X10 на панели стенда.

3. Подключить компрессор к электросети и установить в ресивере компрессора давление 5 – 8 bar. Мертвый объем и конструктивные элементы бесштоковой полости цилиндра при крайнем правом положении штока (максимально задвинут), образуют начальный минимальный объем  $V_0 = 6,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ . Диаметр внутренней полости цилиндра  $d = 0,08 \text{ м}$ . Измерительная система стенда позволяет измерять давление  $p_2$  и температуру  $T_2$  в полости пневматического цилиндра

(исследуемом объеме), атмосферное давление  $p_1$  и температуру  $T_1$ .

Нагрев цилиндра при проведении работ осуществляется бандажным нагревательным элементом. Включение нагревателя осуществляется тумблером SA1, при работающем нагревательном элементе светится индикатор HL2.

### 1.5 УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Студенты обязаны выполнять общие требования безопасности согласно Инструкции по охране труда в лаборатории 11-116. Инструктаж по технике безопасности проводится преподавателем под подпись студента в специальном журнале по технике безопасности.

### 1.6 УКАЗАНИЯ ПО ПОРЯДКУ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

#### 1.6.1 Исследование изобарного процесса

На универсальном лабораторном стенде НТЦ-14.79 изобарный процесс осуществляется путем нагрева воздуха в полости цилиндра. Давление контролируется по прибору и поддерживается путем изменения объема полости цилиндра.

Порядок проведения измерения основных параметров процесса следующий:

1. Включить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).
2. Открыть краны В2, В4.

3. Переместить шток цилиндра в среднее положение.
4. Закрыть краны B2 – B4, B1 оставить открытым.
5. Измерить положение штока, установившиеся значения температуры и давления в полости цилиндра занести в таблицу 1.1.
6. Включить нагревательный элемент цилиндра тумблером SA1.
7. Установить фиксированное значение давления в цилиндре P2.
8. После перемещения штока, измерить его положение  $L_i$ . Величины  $L_i$  и  $t_i$  ( $T_{2i}$ ) занести в таблицу 1.1. Произвести не менее 5 измерений значений данных величин.
9. Выключить нагрев тумблером SA1.
10. Вычислить значения  $V_i$ ,  $p$ ,  $T_i$  и заполнить таблицу 1.1 (левые столбцы).
11. Вычислить для каждого шага сжатия отношение  $V_i/T_i$ . Построить график зависимости  $V = f(T)$ .
12. Повторить измерения параметров  $V_i$  и  $T_i$  при другом значении давления в цилиндре P2, занести их значения в правые столбцы и построить график зависимости  $V = f(T)$  для данных значений.
13. Выключить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).

#### 1.6.2 Исследование изохорного процесса

На универсальном лабораторном стенде НТЦ-14.79 изохорный процесс осуществляется путем нагрева воздуха в полости цилиндра при неизменном объеме.

Порядок проведения измерения основных параметров процесса следующий:

1. Включить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).
2. Отрегулировать на минимум регулятор давления на выходе компрессора. Закрыть все краны на устройстве (B1–B5). Выставить на минимум регулятор давления на устройстве.
3. Включить компрессор. Создать в ресивере давление 5–8 bar.

4. Отрегулировать давление на выходе компрессора до требуемого уровня (24 bar).
5. Открыть краны В2, В4.
6. Переместить шток цилиндра в крайнее левое положение.
7. Закрыть краны В2, В4.
8. Открыть кран В1. Установить в полости цилиндра требуемое давление (0– 5 bar).
10. Закрыть кран В1.
11. Измерить установившиеся значения температуры  $t_i$  ( $T_{2i}$ ) и давления в полости цилиндра  $P_2$  и занести их значения в таблицу 1.2.
12. Включить нагревательный элемент цилиндра тумблером SA1.
13. По мере нагрева воздуха в полости цилиндра занести данные в таблицу 1.2. Произвести не менее 5 измерений значений  $P_{2i}$  и  $t_{i1}$ .
14. Вычислить значения  $p_i$  и  $T_i$  и заполнить таблицу 1.2 (левые столбцы).
15. Вычислить для каждой точки нагрева отношение  $p_i/T_i$ . Построить график зависимости  $p = f(T)$ .
16. Повторить измерения параметров  $p_i$  и  $T_i$  при другом значении объема внутренней полости цилиндра (переместить шток цилиндра в среднее положение), занести их значения в правые столбцы. Построить график зависимости  $p = f(T)$  для данных значений.
17. Выключить нагрев тумблером SA1.
18. Выключить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).
19. Закрыть краны В1, В3. Оставить открытыми краны В2, В4. Сбросить давление из ресивера компрессора. Выключить компрессор.

### *ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ*

#### *Изобарный процесс*

Объем полости цилиндра при любом положении штока определяется выражением:  $V_i = V_0 + L_i \cdot S$ ,

где  $S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$  – площадь поверхности поршня.

Абсолютное давление в исследуемом объеме равно сумме атмосферного давления  $P_1$  и избыточного в полости цилиндра  $P_2$ :

$$p = p_1 + p_2$$

Абсолютная температура определяется выражением:

$$T_j = t_j + 273,15.$$

Таблица 1.1 – Параметры состояния газа при изобарном процессе

[illegible]

### Изохорный процесс

Абсолютное давление в исследуемом объеме равно сумме атмосферного давления  $P_1$  и избыточного в полости цилиндра  $P_2$ :

$$p_i = P_1 + P_2 i$$

Абсолютная температура определяется выражением:

$$T_i = t_i + 273,15.$$

Таблица 1.2– Параметры состояния газа при изохорном процессе

[illegible]

|    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 3. |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 4. |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 5. |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

### 1.7 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет оформляется в 18-листовой тетради или на листах формата А4 и должен содержать:

- название работы,
- цель работы,
- краткое описание работы,
- принципиальную схему опытной установки,
- протокол записи показаний измерительных приборов и таблицы результатов обработки опытных данных,
- подробные расчеты с краткими пояснениями для первого и второго опыта,
- графики зависимостей  $V = f(T)$  и  $p = f(T)$
- выводы по данной лабораторной работе.

Данная лабораторная работа считается выполненной, когда студент, присутствующий на занятии и выполнивший практическую часть работы, представляет преподавателю отчет выполненной лабораторной работы в полном объеме. После выполнения лабораторной работы студент должен её защитить – ответить на все теоретические вопросы (п. 1.9.)

### 1.8 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОТЫ

1. Соотношение параметров состояния газа при изобарном процессе.  
Закон Гей-Люссака.
2. Соотношение параметров состояния газа при изохорном процессе.  
Закон Шарля.
3. Уравнение первого закона термодинамики для изобарного процесса.

4. Уравнение первого закона термодинамики для изохорного процесса.
5. Внутренняя энергия и работа при изобарном и изохорном процессах.
6. Порядок измерения параметров состояния газа при изобарном процессе.
7. Порядок измерения параметров состояния газа при изохорном процессе.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### Исследование изотермического и адиабатного процессов

#### 2.1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное исследование изотермического и адиабатного термодинамических процессов, определение взаимосвязи между основными параметрами данных процессов.

#### 2.2 ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ

ПК-6 Способен проводить оценку технологических решений проектов сетей и систем энергообеспечения

Знания, умения и навыки, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы, в рамках формируемых компетенций:

**Знать:** методы моделирования изотермического и адиабатного процессов.

**Уметь:** применять изученные методы моделирования изотермического и адиабатного процессов .

**Владеть:** способностью выбирать и применять изученные методы моделирования изотермического и адиабатного процессов.

#### 2.3 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

##### 2.3.1 Краткое описание изотермического процесса

Изотермический процесс – процесс изменения состояния термодинамической системы, протекающий при постоянной температуре.

Основным законом, описывающим данный процесс, является **закон Бойля-Мариотта**: *При постоянной температуре давление газа изменяется обратно пропорционально его объему:*

$$p \cdot V = \text{const} \text{ при } T = \text{const} \quad (2.1)$$

Уравнение первого закона термодинамики при изотермическом процессе имеет вид:

$$Q = L, \quad (2.2)$$

где  $Q$  – тепло, выделенное (поглощенное) газом во время процесса,

$L$  – работа, совершенная газом в течение процесса, которая определяется выражением:

$$L = \mu R \cdot M \cdot T \cdot \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) \quad (2.3)$$

где  $\mu R = 8,31 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$  – киломолярная постоянная газа;

$M$  – число молей газа;

$T$  – абсолютная температура газа;

$V_1$  – объем газа в начале процесса;

$V_2$  – объем газа в конце процесса.

Изменение внутренней энергии газа при изотермическом процессе:

$$\Delta U = 0, \text{ так как } T = \text{const и } \Delta T = 0$$

Графическая функциональная зависимость между основными параметрами состояния газа, иллюстрирующая изотермический процесс на диаграмме, называется изотермой. Графики изотермических процессов в различных координатах приведены на рисунке 2.1.

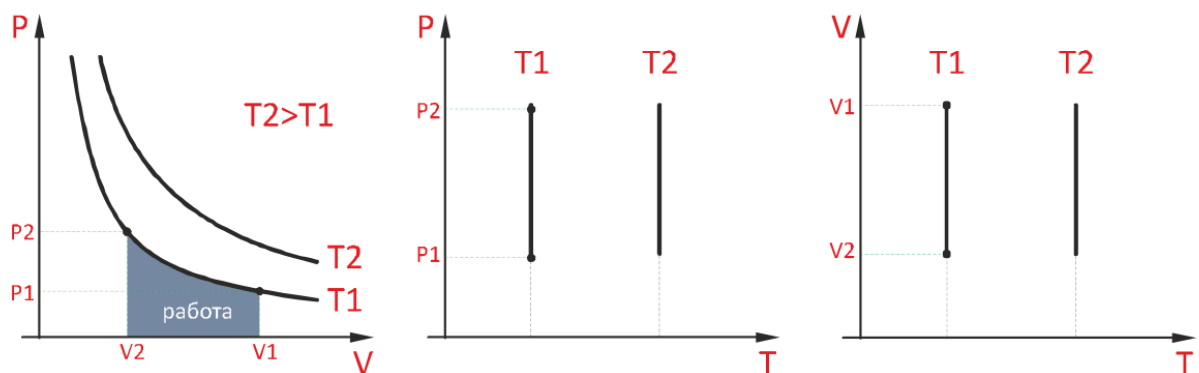


Рисунок 2.1– Графики изотермических процессов

### 2.3.2 Краткое описание адиабатного процесса

Адиабатный процесс — процесс изменения состояния термодинамической

системы, протекающий без обмена теплотой между системой и окружающей средой.

Связь между основными параметрами состояния газа при адиабатном процессе определяется *уравнением Пуассона*:

$$p \cdot V^k = \text{const} \quad (2.4)$$

$$T^k \cdot p^{(1-k)} = \text{const} \quad (2.5)$$

$$T \cdot V^{(k-1)} = \text{const} \quad (2.6)$$

где  $k = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}$  — показатель адиабаты (коэффициент Пуассона).

$C_p$  — удельная массовая теплоемкость газа при изобарном процессе,

$C_v$  — удельная массовая теплоемкость газа при изохорном процессе,

$i$  — число степеней свободы газа;

Уравнение первого закона термодинамики при адиабатном процессе имеет вид:

$$L = -\Delta U = -\frac{i}{2} \cdot \mu R \cdot M \cdot (T_2 - T_1), \quad (2.7)$$

$T_1$  — температура газа в начале процесса;

$T_2$  — температура газа в конце процесса.

Графическая функциональная зависимость между основными параметрами состояния газа, иллюстрирующая адиабатный процесс на диаграмме, называется адиабатой. График адиабатного процесса в координатах  $p$ - $V$ , протекающего при изменении температуры газа в пределах от  $T_1$  до  $T_2$  приведен на рисунке 2.2.

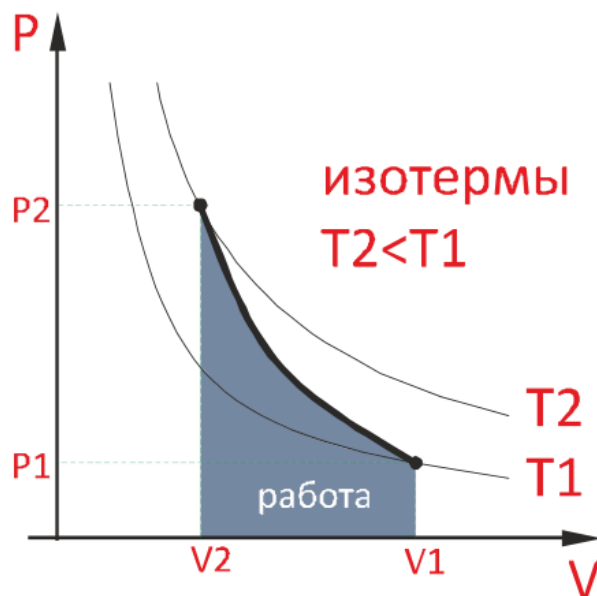


Рисунок 2.1– График адиабатного процесса

## 2.4 ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Лабораторная установка представляет собой универсальный стенд НТЦ-14.79, к которому прикрепляется навесное устройство. Навесное устройство конструктивно является пневматическим цилиндром двустороннего действия, установленным на раме (рисунок 1.3). На пневматическом цилиндре смонтирована система подачи и сброса воздуха, а также бандажный нагревательный элемент. Пневматическая схема данного устройства изображена на рисунке 1.4.

Конструктивно универсальный стенд представляет собой основание, оборудованное:

- 1) интегрированной столешницей;
  - 2) вертикальным рабочим полем с сеткой отверстий для быстрого монтажа навесных устройств;
  - 3) рабочую панель с органами управления и устройствами индикации
- К стенду подключается внешний источник сжатого воздуха (компрессор).

Первоначально перед выполнением лабораторных работ необходимо выполнить следующие действия:

2. Установить навесное устройство на рабочее поле стенда при помощи эксцентриков и зафиксировать их поворотом ручки.
2. Соединить шлангом выход компрессора и штуцера на навесном устройстве. Разъем электрического кабеля навесного устройства подключить к разъему X10 на панели стенда.
3. Подключить компрессор к электросети и установить в ресивере компрессора давление 5 – 8 bar. Мертвый объем и конструктивные элементы бесштоковой полости цилиндра при крайнем правом положении штока (максимально задвинут), образуют начальный минимальный объем  $V_0 = 6,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ . Диаметр внутренней полости цилиндра  $d = 0,08 \text{ м}$ . Измерительная система стенда позволяет измерять давление  $p_2$  и температуру  $T_2$  в полости пневматического цилиндра

(исследуемом объеме), атмосферное давление  $p_1$  и температуру  $T_1$ .

Нагрев цилиндра при проведении работ осуществляется бандажным нагревательным элементом. Включение нагревателя осуществляется тумблером SA1, при работающем нагревательном элементе светится индикатор HL2.

## 2.5 УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Студенты обязаны выполнять общие требования безопасности согласно Инструкции по охране труда в лаборатории 11-116. Инструктаж по технике безопасности проводится преподавателем под подпись студента в специальном журнале по технике безопасности.

## 2.6 УКАЗАНИЯ ПО ПОРЯДКУ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### 2.6.1 Исследование изотермического процесса

1. Включить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).
2. Отрегулировать на минимум регулятор давления на выходе компрессора. Закрыть все краны на устройстве (B1 - B5). Выставить на минимум регулятор давления на устройстве.
3. Включить компрессор. Создать в ресивере давление 5 - 8 bar.
4. Отрегулировать давление на выходе компрессора до требуемого уровня (1 - 5 bar).
5. Открыть краны B2, B4.
6. Переместить шток цилиндра в крайнее левое положение.
7. Закрыть краны B2, B4.
8. Открыть кран B1. Установить в полости цилиндра требуемое давление.
9. Измерить положение штока  $L_i$ , установившиеся значения температуры  $t$  ( $T_2$ ) и давления в полости цилиндра  $P_{2i}$  занести в таблицу 2.1.
10. Увеличить давление на выходе компрессора с помощью регулятора.
11. Приоткрыть кран B3, так, чтобы шток цилиндра переместился на несколько сантиметров и исследуемый объем уменьшился.

12. Дождаться, пока температура в полости цилиндра установится равной начальной.
13. Измерить новое положение штока, установившиеся значения температуры и давления в полости цилиндра занести в таблицу 2.1.
14. Повторять пункты 12 - 14, до достижения штоком цилиндра крайнего положения (не менее 5 измерений).
15. Вычислить значения  $V_i$ ,  $p_i$ , и  $T$  и заполнить таблицу 2.1.
16. Вычислить для каждого шага сжатия произведение  $p_i \cdot V_i$ .  
Данные занести в таблицу 2.1 (левые столбцы). Построить график зависимости  
 $p = f(V)$ .
17. Провести новый эксперимент при других начальных условиях (давлении и температуре). Данные занести в таблицу 2.1 (правые столбцы). Построить график зависимости  $p = f(V)$  для данных значений.
18. Выключить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).
19. Закрыть краны В1, В3. Оставить открытыми краны В2, В4. Сбросить давление из ресивера компрессора. Выключить компрессор.

#### 2.6.2 Исследование адиабатного процесса

1. Включить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).
2. Отрегулировать на минимум регулятор давления на выходе компрессора. Закрыть все краны на устройстве (В1 - В5). Выставить на минимум регулятор давления на устройстве.
3. Включить компрессор. Создать в ресивере давление 5 - 8 bar.
4. Отрегулировать давление на выходе компрессора до требуемого уровня (0 - 5 bar).
5. Для перемещения штока цилиндра в крайнее левое положение откройте последовательно краны В1, В4. После остановки штока закрыть В1, В4.
6. Сбросить давление в исследуемом объеме, открыв кран В2. Спустя 1 мин

закрыть В2.

7. Измерить начальные значения параметров:  $P_{2_1}$ ,  $T_{2_1}$ ,  $L_1$ .

8. Быстро открыть кран В3, шток цилиндра начнет движение вправо. Сразу после остановки штока, закрыть В3. Измерить незамедлительно конечное положение штока  $L_2$ , а также конечные значения  $P_{2_2}$  и  $T_{2_2}$ . Данные занести в таблицу 2.2.

9. Вычислить значения  $V_1, V_2, p_1, p_2, T_1, T_2$  и заполнить таблицу 2.2.

10. Вычислить значения показателя адиабаты  $k$ . Данные занести в таблицу 2.2.

11. Провести серию из 3 экспериментов (п.4 - 9), изменяя первоначальное давление в компрессоре. Данные занести в таблицу 2.2.

12. Выключить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).

13. Закрыть краны В1, В3. Оставить открытыми краны В2, В4. Сбросить давление из ресивера компрессора. Выключить компрессор.

### *ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ*

Объем полости цилиндра при любом положении штока определяется выражением:  $V_i = V_0 + L_i \cdot S$ ,

где  $S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$  – площадь поверхности поршня.

Абсолютное давление в исследуемом объеме равно сумме атмосферного давления  $P_1$  и избыточного в полости цилиндра  $P_2$ :

$$p_i = P_1 + P_{2_i}$$

Абсолютная температура определяется выражением:

$$T_i = T_{2_i} + 273,15.$$

Показатель адиабаты определяется выражением:

$$k = \frac{\lg\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}{\lg\left(\frac{V_1}{V_2}\right)}$$

Таблица 2.1 – Параметры состояния газа при изотермическом процессе

| №<br>п/п | Положе-<br>ние штока<br>$L_i$ , мм |  | Избы-<br>точное<br>давление<br>$P_{2i}$ , кПа |  | Темпе-<br>ратура<br>процесса<br>$t$ , °C |  | Объем<br>камеры<br>$V_i$ , м <sup>3</sup> |  | Абсо-<br>лютное<br>давление<br>$p_i$ , кПа |  | Темпе-<br>ратура<br>процесса<br>$T$ , К |  | $p_i \cdot V_i$ ,<br>Па·м <sup>3</sup> |  |
|----------|------------------------------------|--|-----------------------------------------------|--|------------------------------------------|--|-------------------------------------------|--|--------------------------------------------|--|-----------------------------------------|--|----------------------------------------|--|
| 1.       |                                    |  |                                               |  |                                          |  |                                           |  |                                            |  |                                         |  |                                        |  |
| 2.       |                                    |  |                                               |  |                                          |  |                                           |  |                                            |  |                                         |  |                                        |  |
| 3.       |                                    |  |                                               |  |                                          |  |                                           |  |                                            |  |                                         |  |                                        |  |
| 4.       |                                    |  |                                               |  |                                          |  |                                           |  |                                            |  |                                         |  |                                        |  |
| 5.       |                                    |  |                                               |  |                                          |  |                                           |  |                                            |  |                                         |  |                                        |  |

Таблица 2.2– Параметры состояния газа при адиабатном процессе

| Параметр                                     | 1 опыт | 2 опыт | 3 опыт |
|----------------------------------------------|--------|--------|--------|
| Атмосферное давление $P_1$ , кПа             |        |        |        |
| Начальное положение штока $L_1$ , мм         |        |        |        |
| Конечное положение штока $L_2$ , мм          |        |        |        |
| Начальная температура процесса $T_{21}$ , °C |        |        |        |
| Конечная температура процесса $T_{22}$ , °C  |        |        |        |
| Начальное избыточное давление $P_{21}$ , Па  |        |        |        |
| Конечное избыточное давление $P_{22}$ , Па   |        |        |        |
| Начальный объем $V_1$ , м <sup>3</sup>       |        |        |        |
| Конечный объем $V_2$ , м <sup>3</sup>        |        |        |        |
| Начальная температура $T_1$ , К              |        |        |        |
| Конечная температура $T_2$ , К               |        |        |        |
| Начальное абсолютное давление $p_1$ , Па     |        |        |        |
| Конечное абсолютное давление $p_2$ , Па      |        |        |        |
| Показатель адиабаты $k$                      |        |        |        |

## 2.7 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет оформляется в 18-листовой тетради или на листах формата А4 и

должен содержать:

- название работы,
- цель работы,
- краткое описание работы,
- принципиальную схему опытной установки,
- протокол записи показаний измерительных приборов и таблицы

результатов обработки опытных данных,

- подробные расчеты с краткими пояснениями для первого опыта,
- график зависимости  $p = f(V)$  для изотермического процесса.
- выводы по данной лабораторной работе.

Данная лабораторная работа считается выполненной, когда студент, присутствующий на занятии и выполнивший практическую часть работы, представляет преподавателю отчет выполненной лабораторной работы в полном объеме. После выполнения лабораторной работы студент должен её защитить – ответить на все теоретические вопросы (п. 2.8).

## 2.8 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОТЫ

1. Соотношение параметров состояния газа при изотермическом процессе. Закон Бойля-Мариотта.
2. Соотношение параметров состояния газа при адиабатном процессе. Уравнения Пуассона
3. Уравнение первого закона термодинамики для изотермического процесса.
4. Уравнение первого закона термодинамики для адиабатного процесса.
5. Работа газа при изотермическом и адиабатном процессах.
6. Порядок измерения параметров состояния газа при изотермическом процессе.
7. Порядок измерения параметров состояния газа при адиабатном процессе.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### Исследование теплопроводности материалов

#### 3.1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

3.1.1. Изучение физической сущности процесса теплопроводности.

3.1.2. Знакомство с методами определения коэффициента теплопроводности: а) метод «трубы» для сыпучих материалов; б) метод «пластины» для твердых материалов.

3.1.3. Опытное определение коэффициента теплопроводности исследуемого материала методом «пластины» и установление зависимости величины коэффициента теплопроводности от температуры.

#### 3.2 ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ

ПК-6 – Способен проводить оценку технологических решений проектов сетей и систем энергообеспечения.

Знания, умения и навыки, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы, в рамках формируемых компетенций:

**Знать:** методы моделирования процесса теплопроводности в плоских и цилиндрических стенках.

**Уметь:** применять изученные методы моделирования процесса теплопроводности в плоских и цилиндрических стенках.

**Владеть:** способностью выбирать и применять изученные методы моделирования моделирования процесса теплопроводности в плоских и цилиндрических стенках.

#### 3.3 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

##### 3.3.1 Основные понятия

Теплопроводностью называется процесс распространения тепловой энергии в твердом теле при передаче тепла между частицами вещества без их перемешивания. Распространение тепла идет всегда в сторону убывания температуры. Теплопроводность характеризуется функцией изменения температуры внутри этого тела.

Совокупность всех значений температур во всех точках рассматриваемого тела называется температурным полем. Температурное поле в общем случае трехмерное.

Изотермической поверхностью называется поверхность, соединяющая внутри тела точки с одинаковой температурой (рисунок 3.1).

Характеристиками температурного поля в любой его точке являются две величины:

- градиент температуры  $\overrightarrow{\text{grad } t}$ , характеризующий интенсивность изменения температуры по расстоянию;
- удельный тепловой поток ( $q$ ), характеризующий интенсивность переноса тепловой энергии по направлению уменьшения температуры.

Температурным градиентом ( $\overrightarrow{\text{grad } t}$ ) называется вектор, показывающий интенсивность изменения температуры в направлении нормали к изотермической поверхности в данной точке и равный:

$$\text{grad } t = - \frac{dt}{dx_n} \quad (3.1)$$

где  $dt$  – элементарное изменение температуры,

$dx_n$  – соответствующее этому элементарное изменение расстояния в направлении нормали к изотермической поверхности.

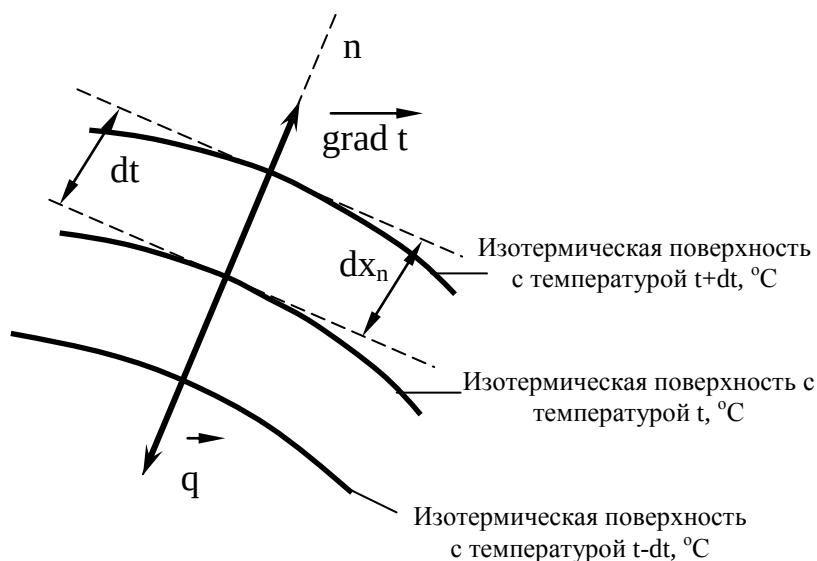


Рисунок 3.1 – К определению градиента температуры

Этот вектор направлен в сторону увеличения температуры.

Удельным тепловым потоком или поверхностной плотностью теплового потока  $q$  называется вектор, определяющий количество тепловой энергии, проходящей в единицу времени через единицу площади изотермической поверхности в направлении нормали в данной точке в сторону понижения температуры.

Основной закон теплопроводности (**закон Фурье**) устанавливает связь между характеристиками температурного поля в любой его точке. Уравнение Фурье дает математическое описание произвольного температурного поля в дифференциальной форме.

Удельный тепловой поток  $q$  при теплопроводности пропорционален градиенту температуры и направлен в обратную сторону:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } t = -\lambda \cdot \frac{dt}{dx_n} \quad (3.2)$$

Знак «—» учитывает, что вектор теплового потока направлен противоположно вектору градиента температур.

Коэффициент пропорциональности  $\lambda$  называется коэффициентом теплопроводности (Вт/(м·°C)) и является важной характеристикой способности материала передавать или задерживать тепло при прохождении теплового потока через толщу материала. Для металлов (сталь – медь), применяемых в теплообменниках, коэффициент теплопроводности принимает значения  $\lambda = 50 \div 400$  Вт/(м·°C), для теплоизоляционных материалов –  $\lambda = 0,2 \div 0,04$  Вт/(м·°C). Значения коэффициентов теплопроводности для различных материалов приведены в таблицах 3.1.

и 3.2.

Таблица 3.1 – Коэффициенты теплопроводности металлов

| Металл | Коэффициент теплопроводности металлов $\lambda$ ,<br>Вт/(м °C) при температурах, °C |   |     |     |     |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|---|-----|-----|-----|
|        | – 100                                                                               | 0 | 100 | 300 | 700 |

|          |     |     |     |     |     |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Алюминий | 245 | 238 | 230 | 226 | 90  |
| Медь     | 405 | 385 | 382 | 376 | 350 |
| Титан    | —   | —   | 16  | 15  | —   |
| Железо   | 94  | 76  | 69  | 55  | 34  |
| Золото   | 330 | 310 | 310 | —   | —   |
| Серебро  | 422 | 418 | 417 | 362 | —   |

Таблица 3.2. – Коэффициенты теплопроводности строительных материалов

| Материал                                                    | Плотность,<br>кг/м <sup>3</sup> | Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м °С) |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------|
| Жидкие керамические теплоизоляторы (Корунд, Астратек и др.) | —                               | 0,0012                                             |
| Бетон                                                       | 2400                            | 1,51                                               |
| Пенобетон                                                   | 1000                            | 0,29                                               |
| Пенобетон                                                   | 300                             | 0,08                                               |
| Стекло                                                      | 2500                            | 0,76                                               |
| Пеностекло                                                  | 400                             | 0,11                                               |
| Пеностекло                                                  | 200                             | 0,07                                               |
| Керамзитобетон                                              | 1800                            | 0,66                                               |
| Керамзитобетон                                              | 500                             | 0,14                                               |
| Керамзит                                                    | 800                             | 0,18                                               |
| Кирпич красный глиняный                                     | 1800                            | 0,56                                               |
| Кирпич, силикатный                                          | 1800                            | 0,70                                               |
| Гранит                                                      | 2800                            | 3,49                                               |
| Мрамор                                                      | 2800                            | 2,91                                               |
| Сосна, ель поперек волокон                                  | 500                             | 0,09                                               |
| Сосна, ель вдоль волокон                                    | 500                             | 0,18                                               |
| Гипсокартон                                                 | 800                             | 0,15                                               |
| Минеральная вата                                            | 200                             | 0,07                                               |
| Минеральная вата                                            | 50                              | 0,048                                              |
| Пенополистирол                                              | 150                             | 0,05                                               |
| Пенополистиролэкструдированный                              | 45                              | 0,036                                              |
| Пенопласт ПВХ                                               | 125                             | 0,052                                              |
| Пенополиуретан                                              | 80                              | 0,041                                              |
| Пенополиуретан                                              | 30                              | 0,020                                              |
| Песок                                                       | 1600                            | 0,35                                               |
| Полиэтилен                                                  | 1500                            | 0,30                                               |
| Линолеум                                                    | 1600                            | 0,33                                               |
| Полипропилен                                                | —                               | 0,2                                                |

|                       |   |      |
|-----------------------|---|------|
| Вспененный полиэтилен | — | 0,04 |
|-----------------------|---|------|

В качестве примера рассмотрим уравнения к решению задач теплопроводности для наиболее простых, но практически важных случаев – теплопроводность плоской и цилиндрической стенки в стационарных условиях.

### 3.3.2. Теплопроводность плоских стенок

Для однородной плоской стенки с толщиной  $\delta$  (м), коэффициентом теплопроводности материала стенки  $\lambda$  (Вт/(м·°C)), при температурах на поверхностях стенки  $t_1$  и  $t_2$  величина удельного теплового потока  $q$  (Вт/м²) определяется по формуле:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta}{\lambda}}. \quad (3.3)$$

Величина  $R = \frac{\delta}{\lambda}$  ((м²·°C)/Вт) называется термическим сопротивлением.

Для многослойной плоской стенки с  $n$  однородными, параллельными плотно прилегающими слоями, толщиной  $\delta_i$  и коэффициентами теплопроводности  $\lambda_i$  в каждом слое, с температурами на наружной поверхности первого слоя во всех точках  $t_1$ , на поверхности последнего слоя -  $t_{n+1}$ . Удельный тепловой поток  $q$  постоянен для всех слоев и направлен в сторону понижения температуры, определяется по формуле:

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{R_1 + R_2 + \dots + R_i + \dots + R_n}. \quad (3.4)$$

Если обозначить  $R_{MH} = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^{i=n} R_i$  – термическое сопротивление многослойной стенки, тогда:

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{R_{MH}}. \quad (3.5)$$

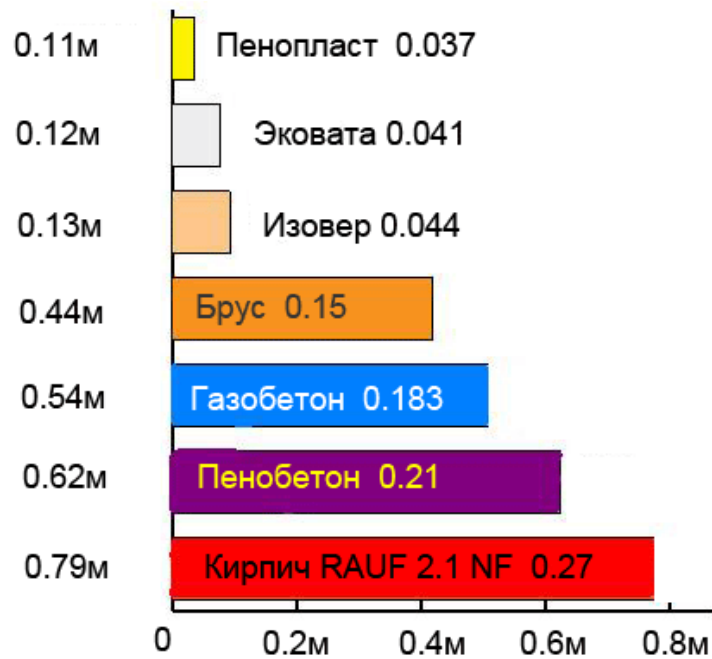


Рисунок 3.2 – Эквивалентные толщины различных строительных материалов при термическом сопротивлении  $R = 2,93 \text{ (м}^2 \cdot \text{К) / Вт}$

### 3.3.3. Теплопроводность цилиндрических стенок

Для однородной однослойной цилиндрической стенки, у которой коэффициент теплопроводности материала равен  $\lambda$ , внутренний и наружный диаметры соответственно  $d_B$  и  $d_H$ , а температуры на наружной и внутренней поверхностях соответственно  $t_1$  и  $t_2$ , удельный линейный тепловой поток  $q_u$  определяется по формуле:

$$q_u = \frac{t_1 - t_2}{R} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_H}{d_B}}. \quad (3.6)$$

Термическое сопротивление цилиндрической стенки ( $\text{м}^\circ\text{С / Вт}$ ) равно:

$$R = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_H}{d_B}. \quad (3.7)$$

Для многослойной цилиндрической стенки, состоящей из  $n$  однородных и концентрических цилиндрических слоев с постоянным коэффициентом теплопроводности  $\lambda_i$  в каждом слое, температура и диаметр внутренней по-

верхности первого слоя равны  $t_1$  и  $d_1$ , на наружной поверхности последнего ( $n$ -ого) слоя  $-t_{n+1}$  и  $d_{n+1}$ , удельный линейный тепловой поток на 1 погонный метр длины цилиндрической стенки  $q_u$  определяется по формуле:

$$q_u = \frac{t_1 - t_{n+1}}{R_{u1} + R_{u2} + \dots + R_{un}}. \quad (3.8)$$

Термическое сопротивление многослойной цилиндрической стенки:

$$R_{u..mn} = R_{u1} + R_{u2} + \dots + R_{un} = \sum_{i=1}^{i=n} R_{ui} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}. \quad (3.9)$$

В общем случае коэффициент теплопроводности зависит как от химической природы тела, обуславливающей все его свойства, так и от параметров его состояния (температура, давление и т.д.). Значения коэффициента теплопроводности отдельных материалов определяются опытным путем.

### 3.4 ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

#### 3.4.1 Исследование теплопроводности сыпучих материалов

##### методом «трубы»

Для испытания теплопроводности сыпучих материалов наиболее подходящим является метод «трубы». При этом исследуемому материалу придается форма цилиндрического слоя, на внутренней и внешней поверхностях которого поддерживаются некоторые средние значения температур, соответственно  $t_1$  и  $t_2$ , причем  $t_1 > t_2$ . При установившемся тепловом режиме количество тепла, проходящего через исследуемый слой сыпучего материала, можно определить по формуле (3.10) для теплового потока через цилиндрическую стенку.

Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования сыпучего материала на теплопроводность представлена на рисунке 1.3. Установка состоит из двух труб – наружной диаметром ( $d_1$ ) и внутренней диаметром ( $d_2$ ), между которыми помещен исследуемый сыпучий материал, коэффициент теплопроводности которого надо определить.

Во внутренней трубе размещен электронагреватель (4), тепловой поток которого распространяется в радиальном направлении через слой сыпучего материала и наружную трубу, в окружающую среду. Это количество тепла определяется по расходу электроэнергии на электрический нагреватель. Потребляемая нагревателем мощность регулируется автотрансформатором (7). Для возможности расчета мощности нагревателя, в его электрическую цепь подключен амперметр (5) и вольтметр (6).

Благодаря хорошему контакту исследуемого сыпучего материала с внутренней и внешней поверхностями трубы можно считать, что соответствующие соприкасающиеся поверхности материала и трубы имеют одну и ту же температуру.

В наружную поверхность внутренней и наружной трубы установлено по три термопары соответственно (1) и (2), соединительные провода которых подключены к потенциометру (3).

Для учета искажения температурного поля по длине исследуемого материала эти термопары расположены равномерно по длине труб – три на внутренней поверхности трубы и три на наружной поверхности трубы. Для того чтобы снизить до минимума потери тепла через боковые поверхности, и направить основной тепловой поток в радиальном направлении, на торцы установки установлены заглушки из теплоизоляционного материала.

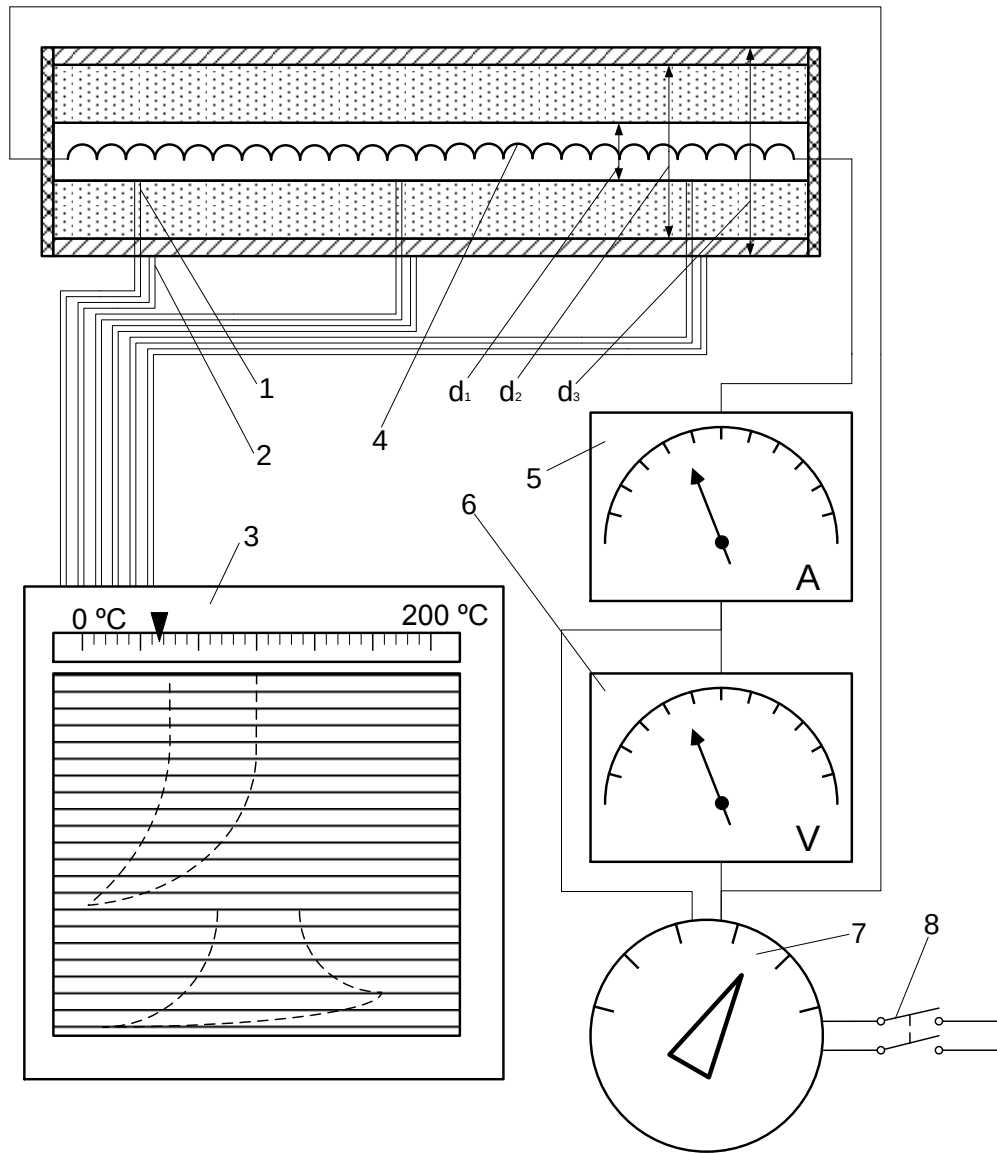


Рисунок 3.3 – Схема лабораторной установки для исследования сыпучих материалов на теплопроводность методом «трубы»

Коэффициент теплопроводности исследуемого сыпучего материала, с учетом конфигурации лабораторной установки (рисунок 3.3), определяется из общего выражения для теплового потока через цилиндрическую двухслойную стенку, состоящую из слоя материала и наружной трубы:

$$\lambda_c = \frac{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}{\frac{2\pi L(t_{\text{вс}} - t_{\text{нт}})}{Q} - \frac{1}{\lambda_{\text{тр}}} \ln\left(\frac{d_3}{d_2}\right)}, \quad (3.10)$$

где  $t_{вс}$  – средняя температура внутренней поверхности сыпучего материала (наружной поверхности внутренней трубы), °C;

$t_{нт}$  – средняя температура наружной поверхности наружной трубы, °C;

$Q$  – тепловой поток, проходящий через двухслойную цилиндрическую конструкцию в радиальном направлении, Вт;

$\lambda_c$  и  $\lambda_{мп}$  – соответственно коэффициенты теплопроводности исследуемого сыпучего материала и наружной трубы, Вт/(м °C).

Геометрические характеристики установки ( $d_1, d_2, d_3, L$ ), а также коэффициент теплопроводности материала наружной трубы  $\lambda_{мп}$  известны, поэтому необходимо опытным путем определить только значение теплового потока, равное мощности нагревательного элемента и средние значения температур, измеренных на внутренней и наружной поверхности цилиндрического слоя материала.

#### 3.4.2 Исследование теплопроводности методом «пластины»

Данный метод используется для испытания на теплопроводность твердых материалов. Исследуемый образец 1 (рисунок 3.4), представляющий собой диск диаметром  $d$  и толщиной  $\delta$ , помещается между нагревательным элементом 2 и охлаждающей поверхностью 3. Таким образом, тепловой поток 7, проходящий через исследуемый плоский образец, отводится циркулирующей за охлаждающей поверхностью водой 4. Для уменьшения потерь теплоты через поверхности нагревателя не контактирующие с исследуемым образцом, предусмотрен теплоизолирующий кожух 5.

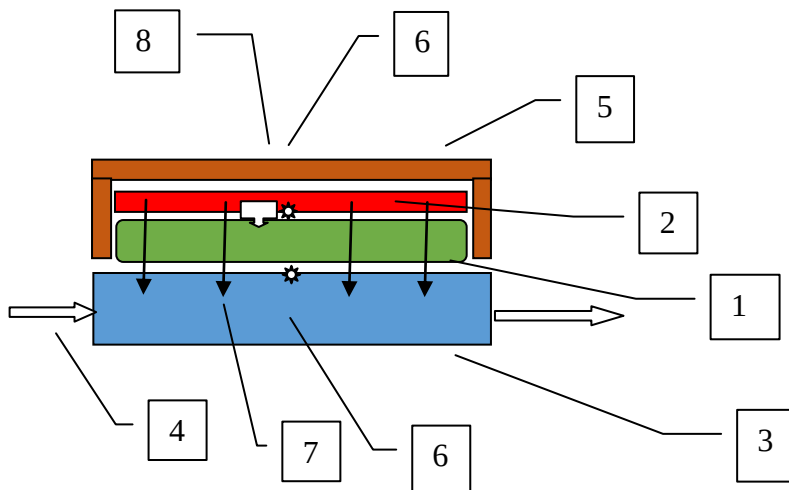


Рисунок 3.4– Принципиальная схема установки для исследования теплопроводности материалов методом «пластины»

Он представляет собой полый цилиндр, выполненный из материала с низкой теплопроводностью. Для измерения температур на поверхностях образца со стороны греющей и охлаждающей поверхностей, расположены датчики температуры 6, цифровые указатели которых размещены на приборной панели лабораторного стенда.

Мощность нагревателя устанавливается с помощью переключателя R1 и контролируется по показаниям индикатора РН1. С помощью датчика 8 определяется удельный тепловой потока  $q$  ( $\text{Вт/м}^2$ ), проходящий через исследуемый образец, величина которого так же отображается на приборной панели стенда.

Конфигурация отображаемых на индикаторах параметров изображена на рисунке 3.5.

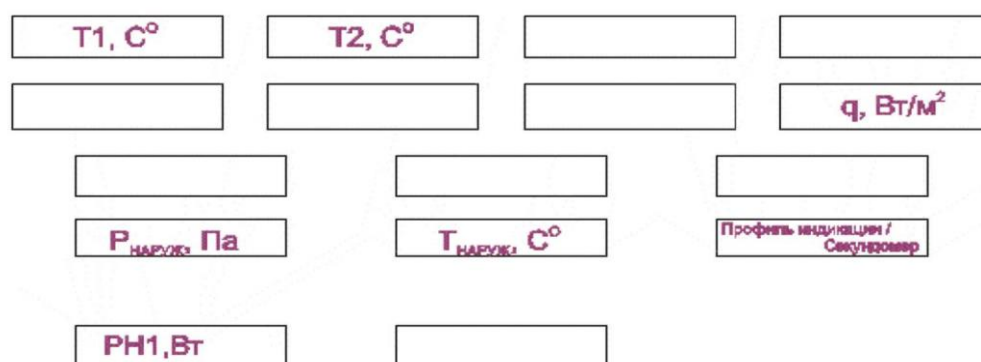


Рисунок 3.5—Конфигурация отображаемых на индикаторах параметров установки

Вид рабочей части лабораторного стенда представлен на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6— Рабочая часть установки по исследованию материалов на теплопроводность методом «пластины»

### 3.5 УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Студенты обязаны выполнять общие требования безопасности согласно Инструкции по охране труда в лаборатории 11-108. Инструктаж по технике безопасности проводится преподавателем под подпись студента в специальном журнале по технике безопасности.

### 3.6 УКАЗАНИЯ ПО ПОРЯДКУ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Для проведения лабораторной работы необходимо перед включением стенда установить рабочую часть №1 «Исследование теплопроводности

материалов методом пластины» (рисунок 3.6) на перфорированную панель и закрепить поворотом крепежных рукояток во встречном направлении на четверть оборота.

2. Произвести подключение кабелей к стенду в разъемы, размещенные на верхней стальной крышке.

**ВНИМАНИЕ!** Необходимо соблюдать соответствие подключаемых парно разъемов друг другу: одна коммутируемая пара – разъемы типа «папа/мама».

3. Исследуемый образец в форме диска диаметром 100 мм, толщиной  $\delta$  установить внутри установки и с помощью винтового механизма слегка зажать его между нагревателем и датчиком теплового потока.

**ВНИМАНИЕ!** Не прилагать усилий при сжатии, чтобы не повредить датчик плотности теплового потока.

4. Подключить к установке рукава (красного цвета) подачи охлаждающей воды, открыть вентиль охлаждающего контура (красного цвета).

5. Тумблер регулятора напряжения РН1 установить в положение «отключен».

6. Регулятор R1 установить на отметку «min».

7. Включить автоматические выключатели QF1 и QF2 на панели стенда. По умолчанию установится профиль индикации «L1», что соответствует номеру выполняемой работы. Конфигурация отображаемых на индикаторах параметров изображена на рис.3.5.

8. Включить насос подачи охлаждающей воды Н2, включить тумблер РН1 и регулятором R1 плавно увеличить мощность, подаваемую на нагреватель до значения, заданного преподавателем. Величина мощности контролируется по индикатору РН1, Вт.

9. Дождаться, когда процесс теплообмена можно будет считать установившимся, т.е. изменение значений температуры  $T_1$  и  $T_2$  за 2 минуты не будет

превышает  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Зафиксировать показания приборов и занести их в таблицу 3.3.

10. Регулятором R1 установить мощность, подаваемую на нагреватель до значения, соответствующего следующему режиму, заданному преподавателем. Выполнить пункт 3.6.9.

11. Пункт 3.6.10 выполняется в соответствие с количеством режимов, заданных преподавателем.

12. По окончании работы установить регулятор R1 на отметку «min» и отключить тумблер регулятора напряжения РН1, отключить насос подачи охлаждающей воды Н2, отключить автоматические выключатели QF1 и QF2.

### *ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ*

1. Результаты измерений и обработки экспериментальных данных заносятся в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты измерений и обработки экспериментальных данных

| № режима | $\delta$ | РН1 | $t_1$              | $t_2$              | q                      | $\lambda$                                | $t_{\text{cp}}$    | $\lambda_0$                              | b                                          |
|----------|----------|-----|--------------------|--------------------|------------------------|------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|
|          | мм       | Вт  | $^{\circ}\text{C}$ | $^{\circ}\text{C}$ | $\text{Вт}/\text{м}^2$ | $\text{Вт}/(\text{м } ^{\circ}\text{C})$ | $^{\circ}\text{C}$ | $\text{Вт}/(\text{м } ^{\circ}\text{C})$ | $\text{Вт}/(\text{м } ^{\circ}\text{C}^2)$ |
| 1        |          |     |                    |                    |                        |                                          |                    |                                          |                                            |
| 2        |          |     |                    |                    |                        |                                          |                    |                                          |                                            |
| 3        |          |     |                    |                    |                        |                                          |                    |                                          |                                            |

2. Определить значения коэффициента теплопроводности исследуемого материала для каждого режима установки из уравнения (3.3) для плоской однородной однослойной стенки, т.е. по формуле:

$$\lambda = \frac{q \cdot \delta}{t_1 - t_2}. \quad (3.11)$$

3. Определить средние температуры исследуемого образца для каждого режима установки по формуле:

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2}. \quad (3.12)$$

4. Значение коэффициента теплопроводности испытуемого материала зависит от температуры, поэтому полученное значение  $\lambda$  для каждого режима следует отнести к средней температуре исследуемого образца соответствующего теплового режима установки. По полученным значениям теплопроводности  $\lambda$  необходимо получить аналитическую зависимость теплопроводности от температуры  $\lambda = f(t)$ . Приблизительно эту зависимость можно представить в виде линейной функции:

$$\lambda = \lambda_0 \pm b t_{cp} \quad (3.13)$$

где  $\lambda_0$  – коэффициент теплопроводности материала при температуре 0 °С;

$b$  – постоянная, численно равная тангенсу угла наклона линии изменения  $\lambda$  к оси температуры.

Знаки «+» или «−» ставятся в зависимости от того, увеличивается ли теплопроводность материала с ростом температуры или уменьшается.

В данной работе требуется определить  $\lambda_0$  и  $b$ .

На основании расчетных данных необходимо построить в масштабе график функциональной зависимости. Ось ординат коэффициента теплопроводности должна начинаться с 0 Вт/(м·°С).

Из графика необходимо определить величины  $\lambda_0$  и коэффициента  $b$ .

Полученные значения  $\lambda_0$  и  $b$  заносятся в таблицу 3.3 и записывается аналитическая зависимость  $\lambda = \lambda_0 \pm b t_{cp}$  с подставленными численными значениями  $\lambda_0$  и  $b$ .

5. По результатам работы делается вывод о зависимости теплопроводности исследуемого материала от температуры.

### 3.7 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет оформляется в 18-листовой тетради или на листах формата А4 и должен содержать:

- название работы,
- цель работы,
- краткое описание работы,
- принципиальную схему опытной установки,
- протокол записи показаний измерительных приборов и таблицу результатов обработки опытных данных,
- подробные расчеты с краткими пояснениями для первого опыта,
- график зависимости коэффициента теплопроводности от средней температуры,
- определение опытных величин  $b$  и  $\lambda_0$  и сопоставление результатов опыта с литературными данными,
- выводы по данной лабораторной работе.

Данная лабораторная работа считается выполненной, когда студент, присутствующий на занятии и выполнивший практическую часть работы, представляет преподавателю отчет выполненной лабораторной работы в полном объеме. После выполнения лабораторной работы студент должен её защитить – ответить на все теоретические вопросы и решить одну задачу из перечня вопросов и задач, представленных в пункте 3.8.

### 3.8 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОТЫ

1. Физическая сущность процесса теплопроводности.
2. Основной закон теплопроводности (закон Фурье) и его приложение к телам простой геометрической формы.
3. Коэффициент теплопроводности и факторы, влияющие на его величину.
4. Дать определение градиента температуры с графической интерпретацией.
5. Методика определения теплопроводности методом «пластины».

6. Как описывается температурное поле?
7. Назвать основные виды теплообмена.
8. Размерность коэффициента теплопроводности.
9. Размерность коэффициента термического сопротивления.
10. Связь между температурами, измеренными по шкале Цельсия и по шкале Кельвина.
11. Связь между удельным и абсолютным тепловым потоком, их размерности.
12. Термическое сопротивление многослойной плоской стенки.
13. Указать параметры неустановившегося температурного поля.
14. Формула для определения линейной плотности теплового потока для многослойной цилиндрической стенки.
15. Формула для определения теплового потока через многослойную плоскую стенку.
16. Определить тепловой поток через поверхность паропровода длиной  $L=5$  м с внутренним диаметром  $d_b=180$  мм, толщиной трубы  $\delta_t=10$  мм, изолированного теплоизоляцией толщиной  $\delta_{из}=50$  мм. Коэффициент теплопроводности трубы  $\lambda_t=58$  Вт/(м·К), изоляции  $\lambda_{из}=0,05$  Вт/(м·К). Температура на внутренней поверхности трубы  $t_b=170^\circ\text{C}$  и на наружной поверхности изоляции  $t_n=50^\circ\text{C}$ .
17. Определить коэффициент теплопроводности кирпичной стенки печитолщиной  $\delta = 380$  мм (1,5 кирпича), если температура на внутренней поверхности стенки  $t_b=900^\circ\text{C}$  и на наружной  $t_n = 110^\circ\text{C}$ . Потери теплоты через стенку  $q=300$  Вт/м<sup>2</sup>.
18. Определить толщину стали с коэффициентом теплопроводности 40 Вт/(м·К) теплотехнически эквивалентную (одинаковое термическое сопротивление) слою накипи толщиной  $\delta_n = 1$  мм с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_n = 0,4$  Вт/(м·К).



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### Исследование процесса конвективного теплообмена на горизонтальной цилиндрической поверхности

#### 4.1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Опытное определение коэффициента теплоотдачи для горизонтальной трубы при свободном движении воздуха в зависимости от температурного напора.

#### 4.2 ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ

ПК-6 – Способен проводить оценку технологических решений проектов сетей и систем энергообеспечения.

Знания, умения и навыки, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы, в рамках формируемых компетенций:

**Знать:** методы моделирования процесса конвективного теплообмена на горизонтальной цилиндрической поверхности.

**Уметь:** применять изученные методы моделирования процесса конвективного теплообмена на горизонтальной цилиндрической поверхности.

**Владеть:** способностью выбирать и применять изученные методы моделирования процесса конвективного теплообмена на горизонтальной цилиндрической поверхности.

#### 4.3 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Перенос тепла конвекцией происходит при омывании поверхности твердых тел жидкостями и газами.

Явление переноса тепла конвекцией при соприкосновении горячих жидкостей или газов с холодными поверхностями твердых тел, или наоборот, называется теплоотдачей или конвективным теплообменом. Количество тепла, отдаваемого при теплоотдаче от горячих тел к холодным, определяется по формуле

Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha(t_1 - t_2)F, \text{ Вт} \quad (4.1)$$

или

$$q = \alpha(t_1 - t_2), \text{ Вт/м}^2, \quad (4.2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К),

$t_1$  – температура тела, отдающего тепло, °С,

$t_2$  – температура тела, воспринимающего тепло, °С,

$F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), представляет собой мощность теплового потока, проходящего через 1 м<sup>2</sup> стенки при разности температуры между жидкой или газообразной средой и стенкой в 1 градус.

Под режимом движения жидкости или газа подразумевается характер течения, создающий либо слоистое (ламинарный режим), либо завихренное беспорядочное течение, называемое турбулентным.

Экспериментальное изучение явлений теплообмена в большинстве случаев сводится к определению коэффициента теплоотдачи.

Уравнения теплоотдачи конвекций обычно представляют в критериальной форме, например, в виде функциональной зависимости:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr) \quad (4.3)$$

где  $Re$ ,  $Gr$ ,  $Pr$  – соответственно, критерии Рейнольдса, Грасгофа и Прандтля.

Различают вынужденное и свободное движение жидкости.

Применительно к вынужденному турбулентному движению жидкости критериальная зависимость значительно упрощается устранением критерия Грасгофа, т.е. имеет вид:

$$Nu = f(Re, Pr). \quad (4.4)$$

Специальными исследованиями, проведенными в области теплоотдачи, установлены расчетные формулы для определения коэффициента теплоотдачи, в которых зависимость между критериями представлена в виде степенных функций. Например, в результате исследования турбулентного движения воздуха по трубопроводу получена формула:

$$Nu = 0,018 \cdot Re^{0,8}. \quad (4.5)$$

Из приведенных соотношений при известных значениях физических параметров жидкости можно определить величину коэффициента теплоотдачи.

Свободным называется также движение жидкости, которое обуславливается разностью плотностей нагретых и холодных ее частиц и всецело определяется наличием теплообмена.

Для рассматриваемого случая теплообмена плотность воздуха и подъемная сила определяются температурным напором, а зона распространения процесса – поверхностью исследуемой трубы. Таким образом, теплоотдача тела определяется, в первую очередь, разностью температур тела и окружающей среды, т.е. температурным напором.

Как известно, процесс теплообмена при свободном движении жидкости зависит от режима ее движения около тепловоспринимающей (теплоотдающей) поверхности.

Применительно к теплообмену на горизонтальных трубах этот процесс имеет ряд особенностей. На нижней половине периметра трубы вследствие увеличения толщины ламинарной пленки, коэффициент теплоотдачи уменьшается. Это происходит до тех пор, пока увеличение толщины пленки не приводит к ее срыву, разрушению и началу турбулизации среды. Турбулизация, в свою очередь, ведет к увеличению коэффициента теплоотдачи до некоторого значения, которое в дальнейшем остается постоянным.

В зависимости от диаметра трубы переход от ламинарного режима к турбулентному происходит по разному. При диаметре горизонтальной трубы  $20 \div 50$  мм, ламинарный характер потока сохраняется до некоторой высоты над поверхностью трубы, после чего начинается турбулентный режим движения. При большом диаметре горизонтальных труб ( $200 \div 300$  мм) ламинарное движение среды переходит в турбулентное еще до верхней кромки трубы. Имеющие аналитические решения задачи конвективного теплообмена при свободном движении среды выполнено при целом ряде упрощающих предпосылок и мало соответствует действительным условиям протекания

процесса. Поэтому на практике широко используется экспериментальный метод с привлечением теории подобия.

Критериальное уравнение, описывающее конвективный теплообмен при свободном движении жидкости в неограниченном пространстве, имеет вид:

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n, \quad (4.6)$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта;

Критерий Нуссельта как комплекс физических величин определяется по формуле:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}, \quad (4.7)$$

$Gr$  – критерий Грасгофа:

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot d^3 \cdot \Delta T}{\nu^2}, \quad (4.8)$$

$Pr$  – критерий Прандтля:

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (4.9)$$

В аналитические выражения критериев теплообмена (4.6–4.9) входят следующие коэффициенты и физические величины:

$C$  и  $n$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от режима движения (ламинарный, переходный, турбулентный) и определяемые по таблице 4.1 по численному значению произведения критериев ( $Gr \cdot Pr$ );

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$d$  – определяющий геометрический размер, для цилиндрических поверхностей принимается диаметр трубы, м;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$\beta = 1/T_{\text{погр}}$  – коэффициент объемного расширения, 1/К;

$T_{\text{погр}} = (T_{\text{ст}} + T_{\text{ж}})/2$  – определяющая температура (температура теплового пограничного слоя), К;

$g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;

$\Delta T = T_{\text{ст}} - T_{\text{ж}}$  – температурный напор, К;

$a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$\nu$  – кинематическая вязкость воздуха,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Значения физических параметров, входящих в выражения критериев теплообмена, определяются при температуре теплового пограничного слоя ( $t_{\text{погр}}$ , °C) по или по материалам приложений 1, 2 и 3 данного лабораторного практикума.

Значения коэффициентов  $C$  и  $n$ , входящих в уравнение (4.6), определяются в зависимости от численного значения произведения критериев Грасгофа и

Прандтля по таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Численные значения коэффициентов  $C$  и  $n$  для различных режимов движения

| п/п | $Gr \cdot Pr$                       | Режим движения     | $C$   | $n$ |
|-----|-------------------------------------|--------------------|-------|-----|
| 1   | $1 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^2$ | ламинарный режим   | 1,48  | 1/8 |
| 2   | $5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$    | переходный режим   | 0,54  | 1/4 |
| 3   | $2 \cdot 10^7 \div 1 \cdot 10^{13}$ | турбулентный режим | 0,135 | 1/3 |

Ориентировочные значения коэффициентов теплоотдачи представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Ориентировочные значения коэффициентов теплоотдачи

| Условие                               | Ориентировочный коэффициент теплоотдачи $\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Спокойная вода – металлическая стенка | 450                                                                                     |
| Текущая вода – металлическая стенка   | $450 + 2100 \cdot W^{0,5}$                                                              |
| Кипящая вода – металлическая стенка   | 4500                                                                                    |
| Конденсирующийся водяной пар          | 10500                                                                                   |
| Воздух – гладкая поверхность          | $5,6 + 4 \cdot W$                                                                       |

Примеры графиков изменения температуры в тепловых пограничных слоях и в толще строительных материалов представлены на рисунке 4.1.

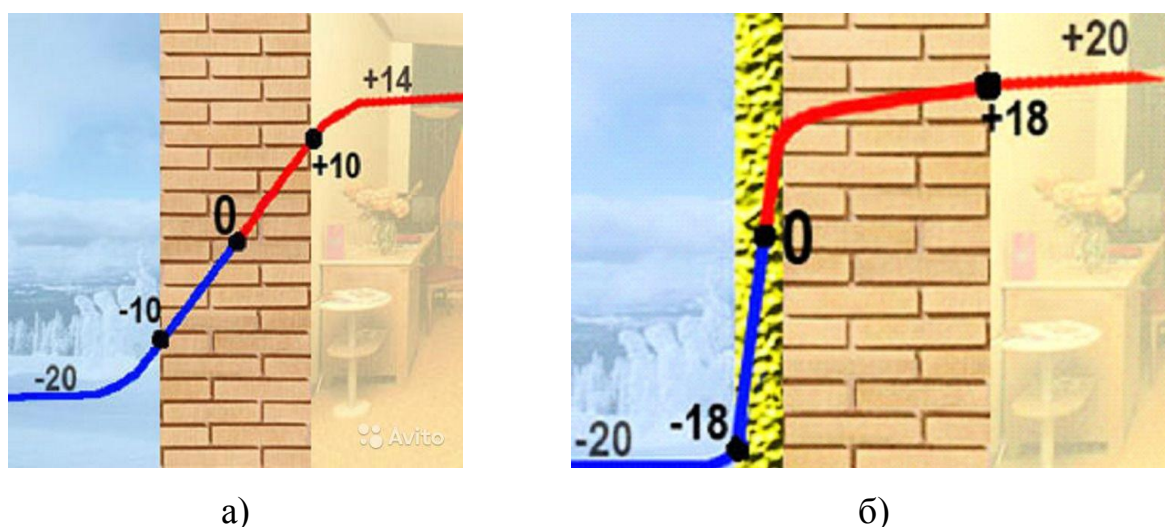


Рисунок 4.1 – Графики изменения температуры в тепловых пограничных слоях и в толще строительных материалов: а) без утеплителя; б) с наружным утеплением

#### 4.4 ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Экспериментальная установка размещена в достаточно большом помещении, размеры которого значительно больше габаритов опытной трубы. Поэтому можно считать, что процесс теплообмена протекает в неограниченном пространстве. Принципиальная схема и общий вид экспериментального блока установки изображен на рисунках 4.2 и 4.3.

Объектом исследования является горизонтальная труба (1) длиной  $L=500$  мм и диаметром  $d=38$  мм, представленная на рисунке 4.3. Труба выполнена из нержавеющей стали. Внутри трубы имеется электрический нагреватель (2), обеспечивающий равномерный нагрев по ее длине. С торцов труба закрыта теплоизоляционными пробками (3) для уменьшения тепловых потерь в осевом направлении. Температура теплоотдающей поверхности (наружной стенки трубы) определяется с помощью пяти термодатчиков (4), закрепленных на наружной поверхности трубы.

В целях увеличения точности усреднения температуры (с учетом характера изменения теплоотдачи по периметру трубы) два датчика укреплены на трубе сверху и три снизу по осевой линии.

Количество выделяемого и передаваемого в окружающую среду тепла определяется по расходу электроэнергии электронагревателем. Его мощность может регулироваться регулятором напряжения  $R1$ , величина которого отображается на индикаторе  $PH1$ .

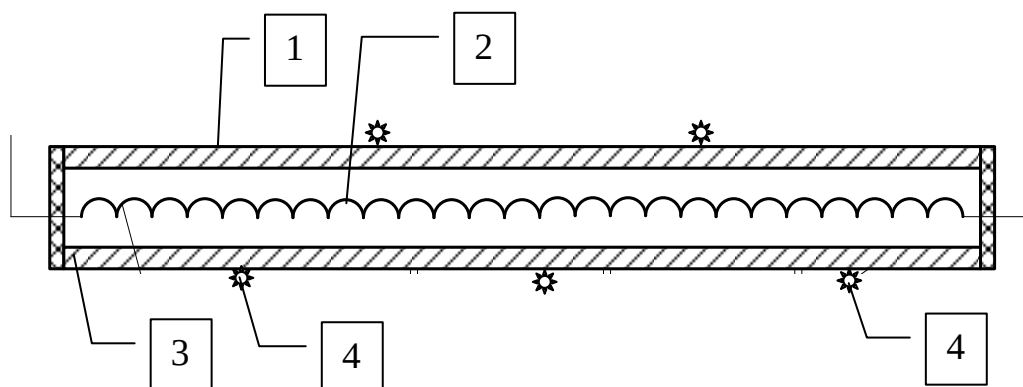


Рис. 4.2 – Принципиальная схема лабораторной установки

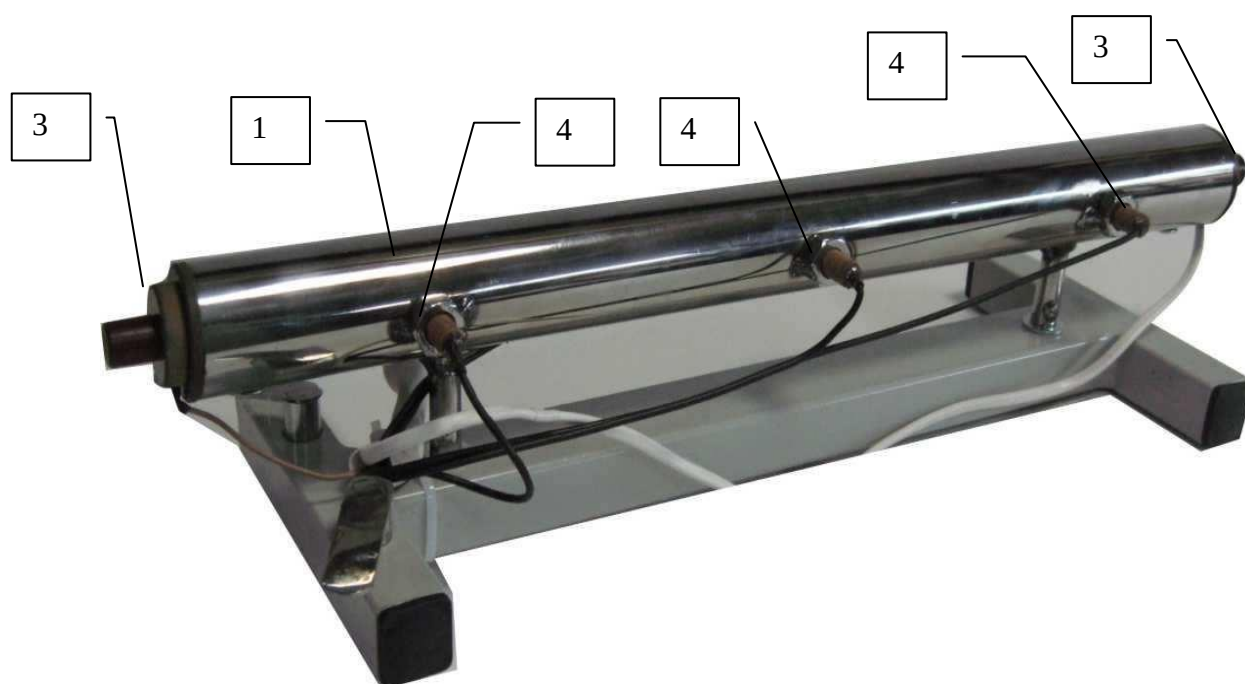


Рис. 4.3 – Общий вид экспериментального блока установки

#### 4.5 УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Студенты обязаны выполнять общие требования безопасности согласно Инструкции по охране труда в лаборатории 11-108. Инструктаж по технике

безопасности проводится преподавателем под подпись студента в специальном журнале по технике безопасности.

#### 4.6 УКАЗАНИЯ ПО ПОРЯДКУ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Для проведения лабораторной работы необходимо перед включением стенда установить лабораторную установку «Исследование теплопередачи при естественной конвекции воздуха около горизонтального цилиндра» (Рисунок 2.3) на перфорированную панель лабораторного стенда в горизонтальном положении и закрепить поворотом крепежных рукояток во встречном направлении на четверть оборота.

2. Далее необходимо произвести подключение кабелей к стенду в разъемы, размещенные на верхней стальной крышке.

**ВНИМАНИЕ!** Соблюдайте соответствие подключаемых попарно разъемов друг другу: одна коммутируемая пара – разъемы типа «папа/мама».

3. Включить автоматические выключатели QF1 и QF2 на панели стенда. Снятие показаний для каждого рабочего модуля данного лабораторного стенда программируется. По умолчанию установится профиль индикации запрограммированной лабораторной работы № 1 на данном стенде – «L 1», необходим профиль индикации «L 2». Изменить профиль индикации с помощью датчика SA10.

Конфигурация отображаемых на индикаторах параметров изображена на рисунке 4.5.

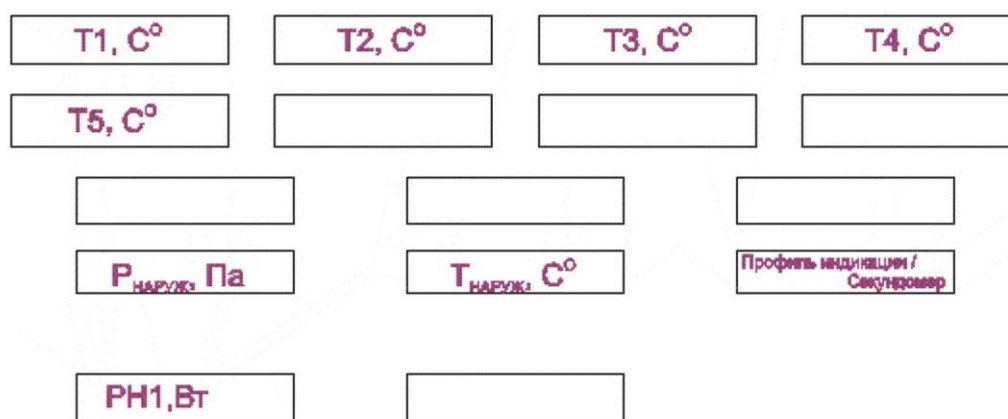


Рисунок 4.5 – Конфигурация отображаемых на индикаторах параметров на приборной панели лабораторного стенда.

4. Включить тумблер и плавно увеличить мощность, подаваемую на нагреватель (контролируется по индикатору РН1, Вт) до величины, заданной преподавателем.

5. Дождаться когда процесс теплопередачи можно будет считать установившимся (изменение среднего значения температуры за 2 мин не превышает  $0,1^{\circ}\text{C}$ ). Зафиксировать показания приборов индикаторов на приборной панели установки (мощность нагревателя, температуры поверхности трубы, температуру окружающего воздуха), записав их в форме таблицы 4.3.

6. Регулятором R1 установить мощность, подаваемую на электронагреватель до значения, соответствующего следующему режиму (опыту), заданному преподавателем. Выполнить пункт 4.6.5.

7. Пункт 5 выполняется в соответствии с количеством режимов, заданных преподавателем.

Таблица 4.3 – Экспериментальные значения параметров по результатам

наблюдений

| №<br>опыта | $Q_{п},$<br>Вт | $t_1,$<br>$^{\circ}\text{C}$ | $t_2,$<br>$^{\circ}\text{C}$ | $t_3,$<br>$^{\circ}\text{C}$ | $t_4,$<br>$^{\circ}\text{C}$ | $t_5,$<br>$^{\circ}\text{C}$ | $t_{\text{НАР}},$<br>$^{\circ}\text{C}$ | $T_{\text{ст}},$<br>К | $T_{\text{ж}},$<br>К | $\Delta T,$<br>К |
|------------|----------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------|----------------------|------------------|
| 1          |                |                              |                              |                              |                              |                              |                                         |                       |                      |                  |
| 2          |                |                              |                              |                              |                              |                              |                                         |                       |                      |                  |
| 3          |                |                              |                              |                              |                              |                              |                                         |                       |                      |                  |

8. По окончании работы установить регулятор R1 на отметку «min» и отключить тумблер регулятора напряжения РН1.

### *ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ*

1. Определить среднюю арифметическую температуру стенки трубы по формуле (4.10) и записать полученное значение в таблицу 4.3.

$$T_{\text{ст}} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5} + 273, \text{ К}; \quad (4.10)$$

2. Перевести температуру наружного воздуха из градусов Цельсия в Кельвины:

$$T_{\text{ж}} = t_{\text{НАР}} + 273, \text{ К}. \quad (4.11)$$

3. Определить температурный напор по формуле (4.12).

$$\Delta T = T_{\text{ст}} - T_{\text{ж}}, \text{ К}. \quad (4.12)$$

*I. Экспериментально-аналитический способ определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К)*

4. Вычислить площадь поверхности трубы, через которую осуществляется теплообмен, по формуле (4.14) и записать полученное значение в таблицу 4.4.

$$F = \pi dL, \text{ м}^2, \quad (4.14)$$

где  $L$  – длина трубы, м;

$d$  – диаметр трубы, м.

Таблица 4.4 – Результаты обработки экспериментальных данных

| № опыта | $F$ , м <sup>2</sup> | $Q_{\text{л}}$ , Вт | $Q_{\text{к}}$ , Вт | $\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К) |
|---------|----------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------------|
| 1       |                      |                     |                     |                                   |
| 2       |                      |                     |                     |                                   |
| 3       |                      |                     |                     |                                   |

5. Вычислить количество теплоты, передаваемой трубой в окружающую среду посредством излучения, по формуле (4.15).

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot F \cdot \left[ \left( \frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{ж}}}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт} \quad (4.15)$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты поверхности трубы, принимаемая для установки, равной 0,7;

$C_0 = 5,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – коэффициент излучения абсолютного черного тела.

6. Вычислить мощность теплового потока, передаваемого опытной трубой в окружающую среду путем конвективного теплообмена по уравнению (4.16).

$$Q_K = Q_{II} - Q_L, \text{ Вт} \quad (4.16)$$

где  $Q_{II}$  – полное количество тепла, которое выделяется электронагревателем и передается путем конвекции и лучеиспускания. Оно численно равно мощности электронагревателя, которая отображается на индикаторе РН1 приборной панели установки, Вт;

7. Определить среднее значение коэффициента теплоотдачи по уравнению (4.17).

$$\alpha = \frac{Q_K}{F \cdot \Delta T}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (4.17)$$

*II. Аналитический способ определения коэффициента теплоотдачи с использованием теории подобия*

8. Вычислить температуру теплового пограничного слоя по формуле (4.18) и записать полученное значение в таблицу 4.5.

$$T_{\text{погр}} = \frac{T_{\text{ст}} + T_{\text{ж}}}{2}, \text{ К} \quad (4.18)$$

Таблица 4.5 – Результаты расчета коэффициента теплоотдачи с использованием теории подобия

| № опы-та | $T_{\text{погр}}, \text{ К}$ | Gr | Pr | Gr·Pr | C | n | режим движения воздуха | $\alpha, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ |
|----------|------------------------------|----|----|-------|---|---|------------------------|-------------------------------------------|
| 1        |                              |    |    |       |   |   |                        |                                           |
| 2        |                              |    |    |       |   |   |                        |                                           |
| 3        |                              |    |    |       |   |   |                        |                                           |

9. Определить физические величины воздуха ( $\lambda, \nu, a$ ), входящие в выражения критериев теплообмена.

10. Вычислить критерии Грасгофа и Прандтля по формулам (4.8) и (4.9).

11. Воспользовавшись таблицей 4.1 определить эмпирические коэффициенты критериального уравнения  $C$  и  $n$  и режим движения воздуха вокруг опытной трубы.

12. Вычислить критерий Нуссельта по критериальному уравнению для свободной конвекции по формуле (4.6).

13. Определить коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , выразив его из уравнения (4.7).

14. Сравнить значения коэффициентов теплоотдачи, полученные двумя методами, по формуле (4.19). Относительная ошибка не должна превышать 30%.

$$\Delta\alpha = \left| \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha_1} \right| \cdot 100\% < 30\% . \quad (4.19)$$

Инженерно-технические работники (ИТР), проектировщики теплообменного оборудования чаще всего используют метод определения коэффициента теплоотдачи с использованием теории подобия.

15. На основании полученных расчетных данных построить график функциональной зависимости  $\alpha_{cp} = f(\Delta T)$ , где  $\alpha_{cp}$  – среднее значение коэффициента теплоотдачи от исследуемой горизонтальной трубы к окружающему воздуху, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

16. Представить зависимость  $\alpha_{cp} = f(\Delta T)$  в виде критериального уравнения (4.1), которое описывает процесс конвективного теплообмена для случая свободного движения воздуха около исследуемой трубы. С этой целью вычисляют значение критериев Нуссельта ( $Nu$ ), Грасгофа ( $Gr$ ) и Прандтля ( $Pr$ ). Критерий Прандтля может быть непосредственно найден по приложению 1. Вычисление указанных величин выполняется для всех опытов и сводится в таблицу 4.5. После этого строится график зависимости в соответствии с формулой (4.6). Логарифмируя зависимость (4.6), получаем уравнение вида (4.20).

$$\lg Nu_m = \lg C + n \cdot \lg(Gr \cdot Pr)_m . \quad (4.20)$$

Следовательно, в логарифмической системе координат эта зависимость имеет вид прямой линии (линейная зависимость).

Откладывая по оси абсцисс величину  $\lg(Gr \cdot Pr)_m$ , а по оси ординат  $\lg Nu_m$ , получаем линейную зависимость в соответствии с уравнением (4.20).

Показатель степени  $n$  в уравнении (4.6) будет равен тангенсу угла наклона этой прямой к оси абсцисс. Постоянная  $C$  находится из соотношения

(4.20) для любой точки прямой.

$$C = \frac{Nu_m}{(Gr \cdot Pr)_m^n}. \quad (4.21)$$

Расчеты и построения рекомендуется выполнять с использованием редактора электронных таблиц Excel.

Если для построения зависимости (4.20) использовать электронные инструменты точечной диаграммы Excel, то коэффициенты  $lgC$  и  $n$  будут рассчитаны автоматически в процессе построения.

Полученные экспериментальные значения коэффициентов сравнивают с литературными данными.

Данная лабораторная работа считается выполненной, когда студент, присутствующий на занятии и выполнивший практическую часть работы, представляет преподавателю письменный отчет выполненной лабораторной работы в полном объеме.

#### 4.8 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет оформляется в 18-листовой тетради или на листах формата А4 и должен содержать:

- название работы,
- цель работы,
- краткое описание работы,
- принципиальную схему опытной установки,
- протокол записи показаний измерительных приборов и таблицы результатов обработки опытных данных,
- подробные расчеты с краткими пояснениями для первого опыта,
- график зависимости коэффициента теплоотдачи от температурного напора,
- выводы по данной лабораторной работе.

Данная лабораторная работа считается выполненной, когда студент, присутствующий на занятии и выполнивший практическую часть работы,

представляет преподавателю отчет выполненной лабораторной работы в полном объеме. После выполнения лабораторной работы студент должен её защитить – ответить на все теоретические вопросы и решить одну задачу из перечня вопросов и задач, представленных в пункте 4.9.

#### 4.8 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОТЫ

1. Физическая сущность процесса конвективной теплоотдачи. В чем состоит принципиальная разница между процессом конвективного теплообмена и процессом теплопроводности.
2. Лучистый теплообмен: основные понятия и законы теплового излучения.
3. Закон Стефана-Больцмана.
4. Излучение и поглощение энергии газами.
5. Лучистый теплообмен между телами; экраны для защиты от излучения.
6. Закон Ньютона-Рихмана; коэффициент теплоотдачи.
7. Теория подобия, критерии подобия.
8. Как определяется коэффициент теплоотдачи в лабораторной работе?
9. Критерий Нуссельта и Грасгофа. Физический смысл. Обозначить входящие в него величины.
10. Критерий подобия Прандтля и Рейнольдса. Физический смысл. Обозначить входящие в него величины.
11. Назвать гидродинамические режимы при вынужденном движении жидкости. Указать граничные значения критерия, характеризующего эти режимы.
12. Общий вид критериального уравнения для вынужденного конвективного теплообмена.
13. Общий вид критериального уравнения для свободного конвективного теплообмена.
14. Коэффициент теплоотдачи, его размерность.
15. Что является движущей силой жидкости при свободной и при вы-

нужденной конвекции?

16. Термическое сопротивление конвективного теплообмена (теплоотдачи) для плоской стенки.

17. Найти ошибку в расчете термического сопротивления стены дома, который представлен ниже в таблице.

| Материал       | Толщина (м) | Теплопроводность (Вт/м*С) | Сопротивление (м2*С/Вт) |
|----------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| Брус           | 0,15        | 0,15                      | 1,0                     |
| Вата минер.    | 0,05        | 0,05                      | 1,0                     |
| Зазор воздушн. | 0,05        | 0,03                      | 1,67                    |
| Кирпич         | 0,15        | 0,63                      | 0,24                    |
| Итого:         | 0,4 м       | 0,102 Вт/м*С              | 3,91 м2*С/Вт            |

18. Какое количество теплоты в космических условиях может передать излучатель из анодированного алюминия площадью  $5 \text{ м}^2$  при температуре  $200^\circ\text{С}$ ? Степень черноты анодированного алюминия 0,95.

19. Определить коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  от газов к внутренней поверхности трубки воздухоподогревателя при средней температуре газов  $t = 200^\circ\text{С}$  и скорости  $W = 15 \text{ м/с}$ , если диаметр трубы  $d = 51 \text{ мм}$ , длина  $L = 4 \text{ м}$ . Справочные данные: при  $t=200^\circ\text{С}$  для дымовых газов  $\lambda=4,012 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  и  $\nu=32,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Критериальное уравнение вынужденного движения газов внутри трубы имеет вид  $\text{Nu} = 0,018 \cdot \text{Re}^{0,8}$ .

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### Определение теплоотдачи и тепловых характеристик отопительных приборов

#### 5.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Опытное определение теплоотдачи и коэффициента теплопередачи для стального и алюминиевого радиаторов при различных температурах и расходах теплоносителя через прибор.

#### 5.2 ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ

ПК-6 Способен проводить оценку технологических решений проектов сетей и систем энергообеспечения Знания, умения и навыки, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы, в рамках формируемых компетенций:

**Знать:** методы моделирования процесса теплоотдачи от основных типов отопительных приборов.

**Уметь:** применять изученные методы моделирования процесса теплоотдачи от основных типов отопительных приборов.

**Владеть:** способностью выбирать и применять изученные методы моделирования процесса теплоотдачи от основных типов отопительных приборов.

#### 5.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

##### 5.3.1 Основные характеристики отопительных приборов

Отопительными приборами называются устройства для передачи тепла от теплоносителя непосредственно к отапливаемому помещению. Через стенки прибора происходит теплообмен между протекающим внутри отопительного прибора теплоносителем (как правило, это нагретая вода или водяной пар) и воздухом помещения.

Отопительные приборы должны удовлетворять теплотехническим, технико-экономическим, санитарно-гигиеническим и эстетическим требованиям.

Основной теплотехнической характеристикой отопительного прибора

является его коэффициент теплопередачи. Обычно наиболее эффективными являются отопительные приборы, имеющие более высокий коэффициент теплопередачи. Для теплотехнической оценки и сравнения различных типов отопительных приборов вводится понятие «эквивалентный квадратный метр» поверхности отопительного прибора (экм).

Эквивалентным квадратным метром называют условную наружную поверхность отопительного прибора, имеющую теплоотдачу (тепловой поток) мощностью 506 Вт, при средней разности температур горячей воды и воздуха в помещении равной 64,5 °С и стандартной (открытой) установке прибора с подачей горячей воды по схеме «сверху вниз».

При этих показателях расход воды в приборе на 1 экм составит

$$V = \frac{3.6 \cdot 506}{4.19 \cdot (95 - 70)} = 17.4 \quad \frac{\text{кг}}{\text{ч} \cdot \text{экм}}, \quad (5.1)$$

коэффициент теплопередачи, соответствующий 1 экм прибора, равен

$$k = \frac{506}{82.5 - 18} = 7.84 \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}. \quad (5.2)$$

Измерение теплоотдающей поверхности в эквивалентных метрах есть сравнение данного прибора с эталонным. За эталонный принят чугунный секционный радиатор типа Н-136 (строительная глубина 136 мм, монтажная высота 500 мм). Через 1 м<sup>2</sup> внешней физической поверхности эталонного радиатора (площадь четырех секций) при испытании в стандартных условиях передается в помещение тепловой поток, равный 506 Вт. Следовательно, эквивалентная площадь теплоотдающей поверхности секции эталонного радиатора равна его физической площади.

Сопоставление площади поверхности одного элемента какого-либо отопительного прибора в эквивалентных квадратных метрах, с площадью его поверхности в квадратных метрах, дает возможность судить об относительной теплотехнической эффективности прибора.

Для сравнительной теплотехнической характеристики разных типов отопительных приборов вводится «коэффициент пересчета», который равен отношению теплоотдачи 1 м<sup>2</sup> действительной поверхности нагрева отопи-

тельного прибора к теплоотдаче 1 экм его поверхности при одинаковых условиях работы прибора.

Технико-экономические характеристики отопительного прибора определяются его первоначальной стоимостью, отнесенной к единице тепла, отдаваемого помещению при оценке отопительных приборов, изготовленных из одного и того же материала, технико-экономическим критерием может служить тепловое напряжение материала.

Под тепловым напряжением материала понимают количество тепла, создаваемого прибором в течение 1ч при разности температур теплоносителя и окружающего воздуха в 1°C, отнесенного к 1кг массы нагревательного прибора, Вт/(кг·К)

$$g = \frac{Q}{G \cdot (t_{\text{пр}} - t_{\text{в}})}, \quad (5.3)$$

где  $Q$  – мощность теплового потока, от прибора, Вт;

$G$  – масса прибора, кг;

$t_{\text{пр}}$  – средняя температура поверхности прибора, °C;

$t_{\text{в}}$  – температура внутри помещения, °C.

Чем больше тепловое напряжение, тем экономичней отопительный прибор по расходованию металла на его изготовление.

Повысить тепловое напряжение можно, как это видно из уравнения (5.3), путем повышения коэффициента теплопередачи, обеспечивающего увеличение мощности теплового потока, уменьшения массы прибора, отнесенной к 1м<sup>2</sup> поверхности нагрева, снижением массы экм, либо путем соответственного изменения обоих факторов.

Санитарно-гигиеническая оценка отопительного прибора характеризуется конструктивным решением прибора, облегчающего содержание его в чистоте, удобством регулирования теплоотдачи, долей тепла лучеиспусканием (лучистые системы отопления имеют наивысшую санитарно-гигиеническую характеристику).

Отопительный прибор должен отдавать помещению расчетное количество тепла, определяемое величиной теплопотерь здания.

Отопительные приборы должны иметь красивую форму и быть достаточно компактными. Кроме упомянутого, прибор должен удовлетворять монтажно-строительным требованиям: обладать возможно меньшими строительными габаритами (длиной и глубиной для возможности установки приборов без ниш), допускать возможность компоновки прибора, требуемой поверхности нагрева путем сборки из отдельных элементов.

### 5.3.2 Виды отопительных приборов

Отопительные приборы делятся на пять основных видов: радиаторы секционные и панельные, гладкотрубные приборы (три вида приборов этого типа имеют гладкую внешнюю поверхность), конвекторы, ребристые трубы (имеют ребристую поверхность). К приборам с ребристой внешней поверхностью относятся также калориферы, применяемые для нагревания воздуха в системах вентиляции и воздушного отопления.

По материалу, из которого изготавливаются отопительные приборы, различают металлические, комбинированные и неметаллические приборы. Металлические приборы выполняют в основном из серого чугуна и стали (листовой стали и стальных труб). Применяют также медные трубы, листовой алюминий и другие материалы.

По тепловой инерции приборы можно разделить на малоинерционные и инерционные. Малоинерционные приборы имеют небольшую массу и вмещают малое количество воды. Такие приборы, выполненные на основе металлических труб малого диаметра, быстро изменяют теплопередачу в помещении при регулировании количества теплоносителя. Теплоинерционные приборы – массивные, вмещающие значительное количество воды, медленно изменяют теплопередачу в помещении.

Таблица 5.1 – Технические характеристики ребристых чугунных труб

| Длина, м | Поверхность нагрева |     | Коэффициент пересчета | Масса одной трубы, |
|----------|---------------------|-----|-----------------------|--------------------|
|          | м <sup>2</sup>      | экм |                       |                    |

|      |     |      | м <sup>2</sup> /экм | кг   |
|------|-----|------|---------------------|------|
| 0,5  | 1   | 0,69 | 0,69                | 18,0 |
| 0,75 | 1,5 | 1,03 | 0,69                | 26,2 |
| 1    | 2   | 1,37 | 0,69                | 37,5 |
| 1,5  | 3   | 2,07 | 0,69                | 56,5 |
| 2    | 4   | 2,76 | 0,69                | 75,2 |

Таблица 5.2 – Технические характеристики чугунных секционных радиаторов

| Наименование прибора | Поверхность нагрева секции (панели) |       | Коэф. пересчета, м <sup>2</sup> /экм | Высота |           | Ширина | Глубина | Масса одной секции, кг |
|----------------------|-------------------------------------|-------|--------------------------------------|--------|-----------|--------|---------|------------------------|
|                      |                                     |       |                                      | полная | монтажная |        |         |                        |
| М-140                | 0,254                               | 0,310 | 1,22                                 | 582    | 500       | 96     | 140     | 7,60                   |
| РД-90                | 0,203                               | 0,275 | 1,35                                 | 582    | 500       | 96     | 90      | 6,96                   |
| М-140-АО             | 0,299                               | 0,35  | 1,17                                 | 585    | 500       | 96     | 140     | 7,52                   |
| М-140-АО-300         | 0,17                                | 0,217 | 1,276                                | 382    | 300       | 96     | 140     | 5,29                   |
| РД-90-С              | 0,203                               | 0,275 | 1,35                                 | 582    | 50        | 96     | 90      | 6,95                   |

Таблица 5.3 – Технические характеристики конвекторов плинтусного типа без кожуха с оребрением

| Наименование показателя                         | Тип конвектора |       |       |       |       |
|-------------------------------------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|
|                                                 | 15 КП          | 16 КП | 17 КП | 18 КП | 19 КП |
| Высота, мм                                      | 80             | 80    | 80    | 80    | 80    |
| Глубина (ширина), мм                            | 60             | 60    | 60    | 60    | 60    |
| Длина секции, мм                                | 750            | 1000  | 1250  | 1500  | 1750  |
| Масса элемента, кг                              | 2,6            | 3,4   | 4,2   | 5,0   | 5,9   |
| Поверхность нагрева, м <sup>2</sup>             | 0,55           | 0,73  | 0,95  | 1,14  | 1,37  |
| Поверхность нагрева (однорядная установка), экм | 0,34           | 0,46  | 0,6   | 0,7   | 0,86  |

Таблица 5.4 – Технические характеристики стальных панельных радиаторов

| Наименование прибора | Поверхность нагрева секции (панели) | Коэффициент пересчета, м <sup>2</sup> /экм | Высота |           | Ширина | Глубина | Масса одной секции, кг |
|----------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|--------|-----------|--------|---------|------------------------|
|                      |                                     |                                            | Полная | Монтажная |        |         |                        |

|          | м <sup>2</sup> | ЭКМ  |      |     |     |      |    |      |
|----------|----------------|------|------|-----|-----|------|----|------|
| M3-500-1 | 0,64           | 0,83 | 1,3  | 564 | 500 | 518  | 25 | 7,5  |
| M3-500-2 | 0,96           | 1,25 | 1,3  | 564 | 200 | 766  | 25 | 11,0 |
| M3-500-3 | 1,20           | 1,56 | 1,3  | 564 | 500 | 952  | 25 | 13,8 |
| M3-500-4 | 1,60           | 2,08 | 1,3  | 564 | 500 | 1260 | 25 | 18,8 |
| M3-500-5 | 1,92           | 2,40 | 1,25 | 564 | 500 | 1510 | 25 | 22,6 |
| M3-350-1 | 0,425          | 0,60 | 1,4  | 406 | 350 | 518  | 25 | 5,97 |
| M3-350-2 | 0,637          | 0,89 | 1,4  | 406 | 350 | 766  | 25 | 8,65 |
| M3-350-3 | 0,797          | 1,2  | 1,4  | 406 | 350 | 952  | 25 | 10,8 |
| M3-350-4 | 0,062          | 1,49 | 1,4  | 406 | 350 | 1262 | 25 | 14,4 |

Таблица 5.5 – Технические характеристики конвекторов типа “Комфорт”

| Диаметр<br>трубы,<br>мм | Шаг пла-<br>стин, мм | Поверхность нагрева в экм<br>при длине конвектора, м |      |      | Высота, мм |        | Глубина,<br>мм |
|-------------------------|----------------------|------------------------------------------------------|------|------|------------|--------|----------------|
|                         |                      | 0,71                                                 | 0,11 | 1,51 | кожуха     | полная |                |
| 15                      | 7,5                  | 0,76                                                 | 1,27 | 1,70 | 215        | 275    | 62             |
| 15                      | 7,5                  | 0,985                                                | 1,64 | 2,30 | 215        | 315    | 124            |
| 15                      | 5,0                  | 1,24                                                 | 2,06 | 2,87 | 215        | 315    | 124            |
| 20                      | 7,5                  | 1,53                                                 | 2,55 | 3,57 | 215        | 315    | 124            |

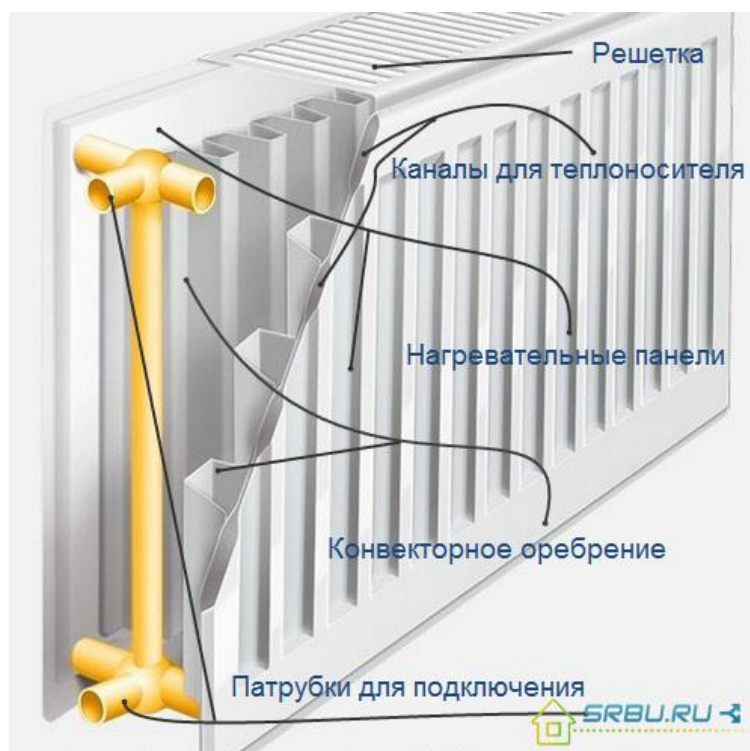


Рисунок 5.1 – Общий вид стального радиатора (тип 21)

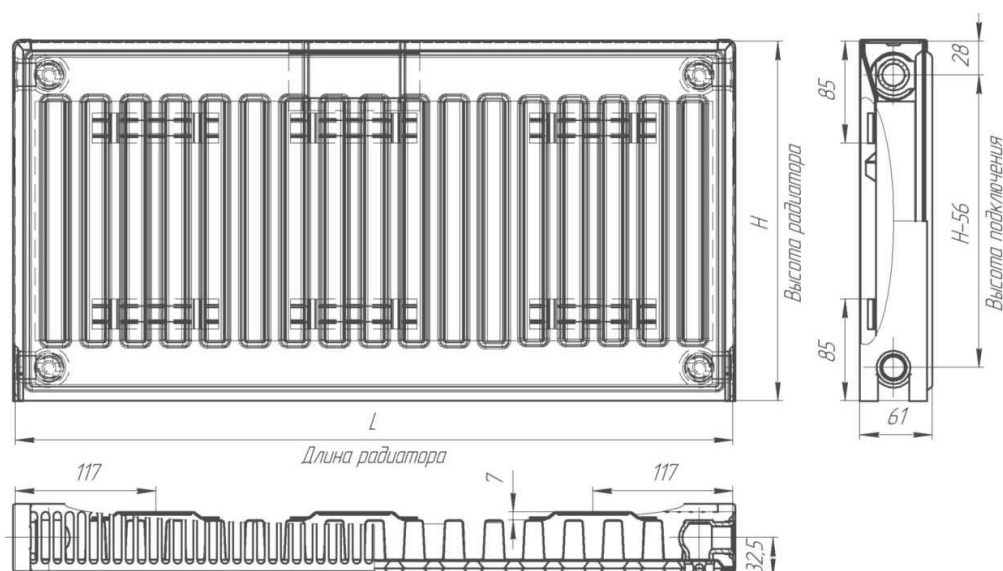


Рисунок 5.2 – Рабочий чертеж стального радиатора (тип 11)

Таблица 5.6 – Технические характеристики стальных радиаторов

| Типоразмер радиатора | Длина L, мм | Номинальный тепловой поток, Вт |                               | Масса, кг | Объем, л |
|----------------------|-------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------|----------|
|                      |             | $\Delta T=70^{\circ}\text{C}$  | $\Delta T=50^{\circ}\text{C}$ |           |          |
| ЛК 11 – 504          | 400         | 503                            | 325                           | 6,6       | 1,3      |
| ЛК 11 – 505          | 500         | 629                            | 406                           | 7,9       | 1,6      |
| ЛК 11 – 506          | 600         | 755                            | 487                           | 9,2       | 1,9      |
| ЛК 11 – 507          | 700         | 881                            | 569                           | 10,6      | 2,2      |
| ЛК 11 – 508          | 800         | 1006                           | 650                           | 11,9      | 2,6      |
| ЛК 11 – 509          | 900         | 1132                           | 731                           | 13,2      | 2,9      |
| ЛК 11 – 509          | 1000        | 1258                           | 812                           | 14,6      | 3,2      |



Рисунок 5.3 – Общий вид алюминиевого радиатора

Таблица 5.7– Технические характеристики алюминиевых радиаторов Condor

| Модели алюминиевых радиаторов Condor | Габариты, мм | Межосевое расстояние, мм | Q, Вт | V, л | t <sub>max</sub> , °C | m, кг | p, бар |
|--------------------------------------|--------------|--------------------------|-------|------|-----------------------|-------|--------|
| A 350/80                             | 425×80×85    | 350                      | 138   | 0,3  | 120                   | 1,16  | 18     |
| A 350/80                             | 580×80×80    | 500                      | 185   | 0,4  | 120                   | 1,35  | 18     |
| A 350/80                             | 588×80×96    | 500                      | 205   | 0,48 | 120                   | 1,48  | 18     |

#### 5.4 ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Лабораторная установка представляет собой специальный стенд, состоящий из теплогенератора - электрического отопительного котла и четырех замкнутых контуров. В лабораторной работе изучается работа модели системы отопления на примере двух контуров - через стальной и алюминиевый радиаторы, схема работы которых приведена на рис.5.4 и рис.5.5.

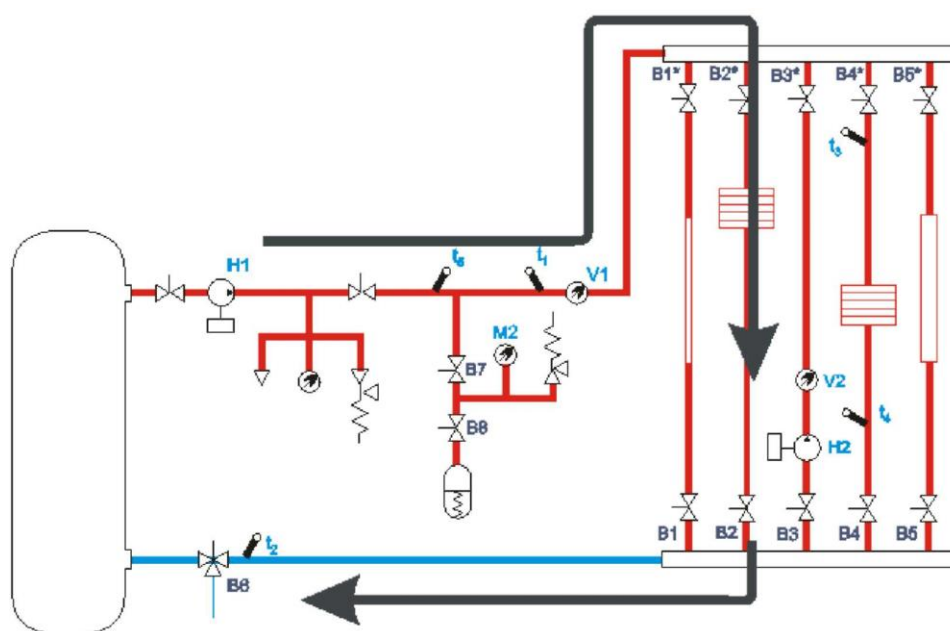


Рисунок 5.4–Контур системы отопления через стальной радиатор

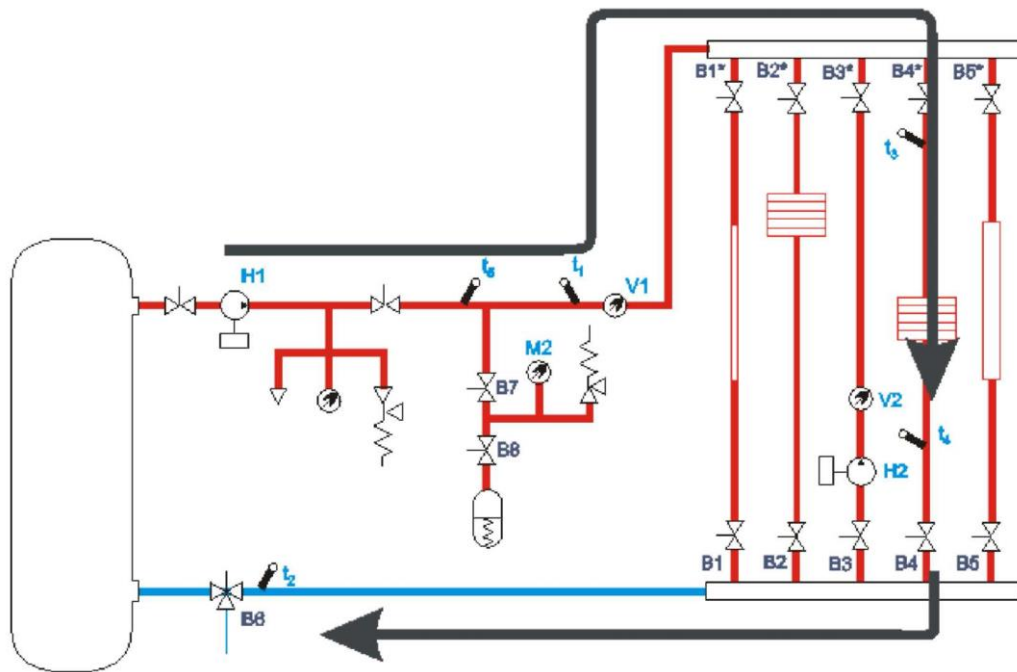


Рисунок 5.5 –Контур системы отопления через алюминиевый радиатор

#### 5.5 УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Студенты обязаны выполнять общие требования безопасности согласно Инструкции по охране труда в лаборатории 11-108. Инструктаж по технике безопасности проводится преподавателем под подпись студента в специальном журнале по технике безопасности.

#### 5.6 УКАЗАНИЯ ПО ПОРЯДКУ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Установить скорость работы циркуляционного насоса Н1 на заданную преподавателем. Для этого необходимо перевести регулятор на корпусе насоса в соответствующее положение I, II или III.
2. Включить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).
3. Убедиться, что все вентили на подающем и обратном трубопроводах открыты (ручки вдоль трубопроводов), при необходимости перевести их в открытое состояние.
4. Открыть полностью вентиль В2 на распределителе (рисунок 5.4), остальные закрыть, т.е. перевести контур системы отопления через стальной радиатор.

5. Перевести переключатель SA1 в положение «Внутр.», тумблер SA5 в положение Q1, тумблер SA6 в положение T1.

6. Установить требуемую величину задания для котла по температуре (с помощью регулятора температуры или кнопок на передней панели управления котла). Установившееся значение температуры теплоносителя на подаче контролируется непосредственно по индикатору T1.

7. Если температура теплоносителя превышает требуемую более чем на 10°C, откройте вентили B1–B5 на распределителе. Включите котел на минимальной настройке температуры (нагревательный элемент не должен включаться) и дождитесь падения температуры.

8. Включить котел (переключатель на передней панели котла).

9. После достижения температуры теплоносителя требуемой величины, снять показания теплосчетчика Q1.

10. Спустя фиксированный интервал времени (5 мин) снять показания теплосчетчика Q1 и занести их в таблицу 5.8. Расходованное тепло найти как разность показаний теплосчетчика в начале и конце отрезка времени  $\Delta Q = Q_2 - Q_1$ , Дж, и занести его в таблицу 5.9.

11. Снять данные по температуре на выходе участка теплосети. Для смены режима индикации температур T1 и T2 переключить тумблер SA6 в соответствующее положение. Данные занести в таблицу 5.8.

12. Открыть полностью вентиль B4 на распределителе (рисунок 5.5), остальные вентили закрыть, т.е. перевести контур системы отопления через алюминиевый радиатор.

13. Если температура теплоносителя превышает требуемую более чем на 10°C, откройте вентили B1–B5 на распределителе. Включите котел на минимальной настройке температуры (нагревательный элемент не должен включаться) и дождитесь падения температуры.

14. Повторите пункты 5.6.9–5.6.11. Данные занести в таблицу 5.8.

15. Выключить котел и автоматические выключатели на лабораторном стенде.

Таблица 5.8 – Экспериментальные значения рабочих параметров по результатам наблюдений

| Тип радиатора | Наименование параметров                                        | Численные значения параметров |    |    |
|---------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------|----|----|
| стальной      | Экспериментальная скорость насоса Н1 (задается преподавателем) | I, II или III                 |    |    |
|               | Температура окружающего воздуха, $t_{ОВ}$ , °C                 |                               |    |    |
|               | Температура подающей воды, $T1$ , °C                           | 40                            | 50 | 60 |
|               | Показания теплосчетчика в начале опыта, $Q_1$ , Дж             |                               |    |    |
|               | Опытное время теплоотдачи радиатора                            | 5 мин (300 с)                 |    |    |
|               | Показания теплосчетчика в конце опыта, $Q_2$ , Дж              |                               |    |    |
|               | Температура обратной воды, $T2$ , °C                           |                               |    |    |
| алюминиевый   | Температура подающей воды, $T1$ , °C                           | 40                            | 50 | 60 |
|               | Показания теплосчетчика в начале опыта, $Q_1$ , Дж             |                               |    |    |
|               | Опытное время теплоотдачи радиатора                            | 5 мин (300 с)                 |    |    |
|               | Показания теплосчетчика в конце опыта, $Q_2$ , Дж              |                               |    |    |
|               | Температура обратной воды, $T2$ , °C                           |                               |    |    |

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Заготавливаются формы протокола для записи наблюдений и результатов обработки экспериментальных данных в соответствии с таблицей 5.8.

После окончания опыта необходимо заполнить таблицу результатов обработки экспериментальных данных, т.е. таблицу 5.9.

Коэффициент теплопередачи определяется для каждого наблюдения по формуле (5.4).

$$K = \frac{Q}{F \cdot \left( \frac{t_1 + t_2}{2} - t_{ОВ} \right)}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (5.4)$$

где  $Q$  – тепловая мощность отопительного прибора, Вт,

$F$  – площадь поверхности нагрева испытуемого прибора,  $\text{м}^2$ ,

$t_1$  – температура теплоносителя на входе в отопительный прибор, °C,

$t_2$  – температура теплоносителя на выходе из радиатора, °C,

$t_{ОВ}$  – температура окружающего воздуха, °C.

Для каждого наблюдения определяется теплоотдача 1  $\text{м}^2$  испытуемого

отопительного прибора по формуле (5.5).

$$q = K \cdot \Delta t, \text{ Вт/м}^2, \quad (5.5)$$

где  $\Delta t_{CP}$  – температурный напор отопительного радиатора,  $\Delta t_{CP} = \frac{t_1 + t_2}{2} - t_{OB}$ , °C;

$K$  – значение коэффициента теплопередачи отопительного радиатора, Вт/(м<sup>2</sup>·K);

Результаты расчетов по каждому наблюдению заносятся в таблицу 5.9.

По результатам расчетов строится график зависимости  $K = f(\Delta t_{CP})$ .

Таблица 5.9 – Результаты обработки экспериментальных данных

| Тип радиатора | Наименование параметров                                                                      | Численные значения параметров |    |    |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----|----|
| стальной      | Экспериментальная скорость насоса Н1 (задается преподавателем)                               |                               |    |    |
|               | Температура подающей воды, T1, °C                                                            | 40                            | 50 | 60 |
|               | Разница показаний теплосчетчика (теплоотдача радиатора), $\Delta Q = Q_2 - Q_1$ , Дж         |                               |    |    |
|               | Тепловая мощность радиатора, $Q = \Delta Q / \tau$ , Вт                                      |                               |    |    |
|               | Температурный перепад теплоносителя на входе и выходе радиатора, $\Delta T = T_1 - T_2$ , °C |                               |    |    |
|               | Температурный напор радиатора, $\Delta t_{CP} = \frac{t_1 + t_2}{2} - t_{OB}$ , °C           |                               |    |    |
|               | Площадь теплообменной поверхности радиатора, F, м <sup>2</sup>                               | 1,2                           |    |    |
|               | Коэффициент теплопередачи, K, Вт/(м <sup>2</sup> ·K), по формуле (3.4)                       |                               |    |    |
|               | Удельный тепловой поток радиатора, q, Вт/м <sup>2</sup> , по формуле (3.5)                   |                               |    |    |
| алюминиевый   | Экспериментальная скорость Н1 (задается преподавателем)                                      |                               |    |    |
|               | Температура подающей воды, T1, °C                                                            | 40                            | 50 | 60 |
|               | Разница показаний теплосчетчика (теплоотдача радиатора), $\Delta Q = Q_2 - Q_1$ , Дж         |                               |    |    |
|               | Тепловая мощность радиатора, $Q = \Delta Q / \tau$ , Вт                                      |                               |    |    |
|               | Температурный перепад теплоносителя на входе и выходе радиатора,                             |                               |    |    |

|  |                                                                                                  |     |  |  |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|--|--|
|  | $\Delta T = T_1 - T_2, ^\circ\text{C}$                                                           |     |  |  |
|  | Температурный напор радиатора,<br>$\Delta t_{CP} = \frac{t_1 + t_2}{2} - t_{OB}, ^\circ\text{C}$ |     |  |  |
|  | Площадь теплообменной поверхности радиатора, $F, \text{м}^2$                                     | 0,5 |  |  |
|  | Коэффициент теплопередачи, $K, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , по формуле (3.4)         |     |  |  |
|  | Удельный тепловой поток радиатора, $q, \text{Вт}/\text{м}^2$ , по формуле (3.5)                  |     |  |  |

## 5.7 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет оформляется в 18-листовой тетради или на листах формата А4 и должен содержать:

- тема работы,
- цель работы,
- краткое описание работы;
- принципиальную схему лабораторной установки;
- протокол записи экспериментальных данных по форме таблицы 5.8;
- результаты обработки экспериментальных данных по форме таблицы 5.9;
- график зависимости  $K = f(\Delta t)$ ;
- выводы по результатам исследований.

Данная лабораторная работа считается выполненной, когда студент, присутствующий на занятии и выполнивший практическую часть работы, представляет преподавателю отчет выполненной лабораторной работы в полном объеме. После выполнения лабораторной работы студент должен её защитить – ответить на два теоретических вопроса и решить одну задачу из перечня вопросов и задач, представленных в пункте 5.8.

## 5.8 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОТЫ

1. Методика проведения эксперимента и обработки полученных данных в лабораторной работе.
2. Виды тепловой нагрузки, виды теплоносителей.

3. Материалы, применяемые для отопительных приборов.
4. Назвать основные виды отопительных приборов.
5. Назначение оребрения в отопительных приборах.
6. Предельные температуры поверхностей отопительных приборов для различных типов зданий.
7. Средний температурный напор отопительного прибора.
8. Что такое умягчение и деаэрация воды? Для чего производятся эти операции?
9. Коэффициент теплопередачи для однослойной плоской стенки, размерность коэффициента теплопередачи.
10. Коэффициент теплопередачи для однослойной цилиндрической стенки, размерность коэффициента теплопередачи.
11. Основное уравнение теплопередачи отопительного прибора.
12. Способы задания удельной теплоемкости.
13. Автомобильный радиатор передает от охлаждаемой воды в окружающую среду  $Q = 70$  кДж/с. Средняя температура охлаждающей жидкости в радиаторе  $t_{\text{ож}} = 98^\circ\text{C}$ , а охлаждающей среды – воздуха  $t_{\text{в}} = 35^\circ\text{C}$ . Теплорассеивающая поверхность радиатора  $F = 8$  м<sup>2</sup>. Определить коэффициент теплопередачи.
14. Определить плотность теплового потока  $q$  через плоскую стенку металлического водонагревателя, если заданы: температура греющих газов  $t_{\text{г}} = 300^\circ\text{C}$ , температура воды в баке  $t_{\text{в}} = 90^\circ\text{C}$ , коэффициенты теплоотдачи соответственно  $\alpha_1 = 50$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) и  $\alpha_2 = 500$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), толщина стенки  $\delta_{\text{с}} = 2$  мм и коэффициент теплопроводности материала  $\lambda_{\text{с}} = 32$  Вт/(м·К).
15. Определить поверхность  $F$  для нагрева воздуха с объемным расходом  $V = 310$  м<sup>3</sup>/ч от температуры  $t_1 = 5^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 25^\circ\text{C}$ , если температура воды на входе в калорифер  $t_{\text{вх}} = 95^\circ\text{C}$ , на выходе  $t_{\text{вых}} = 60^\circ\text{C}$ ; коэффициент теплопередачи принять равным  $K = 2100$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Теплоемкость воздуха  $C_{\text{в}} = 1,2$  кДж/(кг·К),

плотность воздуха  $\rho = 1,15 \text{ кг/м}^3$ .

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

### Испытание и составление теплового баланса водогрейного котла

#### 6.1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью настоящей работы является опытное определение КПД лабораторной установки и установление оптимального значения коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ), при котором КПД достигает максимума.

#### 6.2 ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ

ПК-6 – Способен проводить оценку технологических решений проектов сетей и систем энергообеспечения      Знания, умения и навыки, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы, в рамках формируемых компетенций:

**Знать:** методы испытания и составления теплового баланса водогрейного котла.

**Уметь:** применять изученные методы испытания и составления теплового баланса водогрейного котла.

**Владеть:** способностью выбирать и применять изученные методы испытания и составления теплового баланса водогрейного котла

#### 6.3 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Тепловой баланс лабораторной установки дает представление о распределении введенного в топку тепла, в частности о том, какая его часть используется на нагрев воды и какая безвозвратно теряется с уходящими дымовыми газами, от химической и механической неполноты сгорания топлива и в окружающую среду через стенки установки.

Проанализировав данные теплового баланса, можно разработать необходимые технологические мероприятия, направленные на улучшение показателей работы установки. Например, выявить оптимальное значение коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ), при котором экономичность работы

лабораторной установки будет наивысшей.

Тепловой баланс составляется на 1 кг топлива для установившегося теплового режима котла. Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$Q_H^P = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (6.1)$$

где  $Q_H^P$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;  $Q_1$  – полезное тепло, затраченное на получение горячей воды, кДж/кг;  $Q_2$  – потери тепла с дымовыми газами, кДж/кг;  $Q_3$  – потери тепла от химической неполноты сгорания, кДж/кг;  $Q_4$  – потери тепла от механической неполноты сгорания, кДж/кг;  $Q_5$  – потери тепла в окружающую среду, кДж/кг.

Если левую и правую часть уравнения (4.1) разделить на  $Q_H^P$  и умножить на 100%, то получим уравнение теплового баланса в процентах от низшей теплоты сгорания топлива, то есть:

$$100\% = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5, \quad (6.2)$$

где  $q_1 = \frac{Q_1}{Q_H^P} 100\%$ ;  $q_2 = \frac{Q_2}{Q_H^P} 100\%$  и т. д.

Величина  $q_1$  по смыслу и числовому значению совпадает с коэффициентом полезного действия котлоагрегата, то есть:

$$q_1 = \eta_K = \frac{Q_1}{Q_H^P} 100\%. \quad (6.3)$$

Следовательно, коэффициент полезного действия можно определить из уравнения:

$$\eta_K = 100 - \sum q_{\text{потерь}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5). \quad (6.4)$$

Принимая в этой формуле потерю от механической неполноты сгорания для газообразного топлива, равной нулю ( $q_4=0$ ), а потерю в окружающую среду для водогрейного котла ( $q_5$ ) равной 5%, получим коэффициент полезного действия котла в зависимости только от  $q_2$  и  $q_3$ . Эти два вида потерь, при заданной производительности и параметрах воды, при прочих равных условиях, зависят только от коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ). С повышением  $\alpha$  потери от химической неполноты сгорания ( $q_3$ ) будут

уменьшаться, а потери с уходящими газами ( $q_2$ ) – увеличиваться.

#### 6.4 ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Лабораторная установка состоит из водонагревателя (змеевик) (4), керосиновой горелки (6), дымовой трубы (8), двух емкостей для воды (1), (2) и измерительной аппаратуры (11), (9).

Вода из верхней емкости самотеком поступает через змеевик водонагревателя в нижнюю емкость. Снизу под змеевиком установлена керосиновая горелка. Дымовые газы, проходя через змеевик нагревают протекающую в нем воду, затем удаляются наружу через дымовую трубу под действием силы естественной тяги. Возникновение естественной тяги обусловлено разностью плотностей сред с разной степенью нагретости.

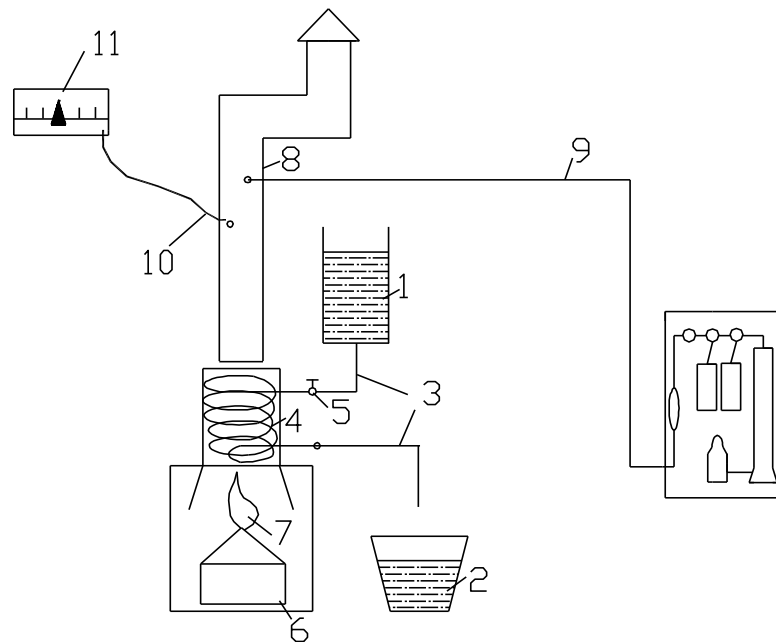


Рисунок 6.1 – Экспериментальная установка

Экспериментальная установка показана на рис. 6.1, оснащенный необходимой для проведения экспериментальных исследований

контрольно-измерительной и регистрирующей аппаратурой.

Установка состоит из сварного чугунного чана, в котором находится керосинка (6), обеспечивающая процесс горения (7) и отвод продуктов сгорания (8).

Замеры температуры рабочих потоков в характерных точках осуществляются с помощью термопар или термометров.

Процентный состав уходящих дымовых газов определяется с помощью химического газоанализатора ГПХ-3М. Отбор проб дымовых газов для анализа осуществляется по соединительному трубопроводу от отвода продуктов сгорания к газоанализатору. Расход нагреваемой воды определяется по количеству воды к верхнему сосуду (1), установленного на подающей магистрали змеевика (4).

#### 6.5 УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Студенты обязаны выполнять общие требования безопасности согласно Инструкции по охране труда в лаборатории 11-108. Инструктаж по технике безопасности проводится преподавателем под подписью студента в специальном журнале по технике безопасности.

#### 6.6 УКАЗАНИЯ ПО ПОРЯДКУ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Начало работы осуществляется с измерением количества топлива (кг) в керосинке.

2. Поджигаем фитиль керосинки.

3. Устанавливается расход нагреваемой воды. Испытания установки проводятся в 2-х стационарных режимах при различных значениях коэффициента избытка воздуха, охватывающих интервал от минимальных до максимальных значений. Регулирование притока воздуха, подаваемого в смесительный канал, осуществляется открытием дверцы установки.

4. В каждом режиме испытания проводятся температурные измерения горячей воды на выходе из установки, С. При этом, постоянство температу-

ры воды на выходе из лабораторной установки поддерживается путем изменения ее расхода.

5. Во время опыта в каждом стационарном режиме производят анализ дымовых газов, количество расход воды и ее температуру до и после опыта, а также температуру уходящих газов и температуру воздуха, поступающего в топку котла, то есть температуру в лаборатории.

Все данные, полученные путем замеров, и результаты анализа дымовых газов заносятся в рабочую таблицу 6.1.

Таблица 6.1– Экспериментальные значения рабочих параметров и расчетные результаты их обработки

| Измеряемые параметры, расчетные показатели | Обозначение   | Единицы измерен.   | № режима |  |  |  |
|--------------------------------------------|---------------|--------------------|----------|--|--|--|
| 1                                          | 2             | 3                  | 4        |  |  |  |
| Расход нагреваемой воды                    | D             | кг/ч               |          |  |  |  |
| Температура питательной воды               | $t_{пв}$      | $^{\circ}\text{C}$ |          |  |  |  |
| Температура горячей воды                   | $t_{гв}$      | $^{\circ}\text{C}$ |          |  |  |  |
| Температура воздуха помещения              | $t_{в}$       | $^{\circ}\text{C}$ |          |  |  |  |
| Температура топлива (керосина)             | $t_{т}$       | $^{\circ}\text{C}$ |          |  |  |  |
| Температура уходящих газов                 | $t_{уг}$      | $^{\circ}\text{C}$ |          |  |  |  |
| Состав продуктов сгорания:                 |               |                    |          |  |  |  |
| Кислород                                   | $\text{O}_2$  | %                  |          |  |  |  |
| Углекислота                                | $\text{CO}_2$ | %                  |          |  |  |  |
| окись углерода                             | CO            | %                  |          |  |  |  |
| Азот                                       | $\text{N}_2$  | %                  |          |  |  |  |
| Коэффициент избытка воздуха                | $\alpha$      | б/м                |          |  |  |  |
| Химический недожог                         | $Q_3, q_3$    | кДж/кг, %          |          |  |  |  |
| Потери с уходящими газами                  | $Q_2, q_2$    | кДж/кг, %          |          |  |  |  |
| КПД                                        | $\eta$        | %                  |          |  |  |  |
| Расход топлива                             | B, b          | кг/ч, кг/кг        |          |  |  |  |

Осуществляя процесс горения с различными коэффициентами избытка воздуха, подсчитывают потери  $q_2$  и  $q_3$ , а затем, по уравнению (6.4), находят коэффициент полезного действия котла ( $\eta$ ) для различных  $\alpha$ . По

полученным значениям и  $\eta_k$  для различных эксплуатационных режимов строят графическую зависимость:  $\eta_k = f(\alpha)$ .

Численное значение коэффициента избытка воздуха определяется для каждого режима на основании полученных результатов газового анализа из формулы:

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{71}{29} \cdot \frac{O_2 - 0,5CO}{N_2}}, \quad (6.5)$$

где CO, O<sub>2</sub> и N<sub>2</sub> – процентное содержание соответствующих газов в продуктах сгорания.

Количество окиси углерода (CO) и азота (N<sub>2</sub>) определяется на основе полученных данных концентрации кислорода (O<sub>2</sub>) и углекислого газа (CO<sub>2</sub>) из формул:

$$CO = (21 - 1,6CO_2 - O_2) \cdot 0,835, \%, \quad (6.6)$$

$$N_2 = 100 - (CO + O_2 + CO_2), \%. \quad (6.7)$$

Потеря тепла от химической неполноты сгорания определяется по формуле:

$$Q_3 = 237(C^P + 1,5S^P) \cdot \frac{CO}{RO_2 + CO}, \text{ кДж/кг}, \quad (6.8)$$

где C<sup>P</sup> и S<sup>P</sup> – рабочее содержание углерода и серы в топливе, в % по весу. Для Ставропольского газа рабочий состав в % по весу следующий: C<sup>P</sup>=73,55; H=24,33; S<sup>P</sup>=0; O<sup>P</sup>=0,12; N<sub>2</sub>=2; RO<sub>2</sub> – трехатомные газы в % по объему, определяемые газовым анализом, причем, при сгорании Ставропольского газа SO<sub>2</sub>=0.

Затем определяют эту потерю в процентах от низшей теплотворной способности топлива по формуле:

$$q_3 = 100 \cdot \frac{Q_3}{Q_H^P}, \%, \quad (6.9)$$

где Q<sub>H</sub><sup>P</sup> – теплотворная способность топлива, кДж/кг; для Ставропольского газа Q<sub>H</sub><sup>P</sup>=49805 кДж/кг.

Потеря тепла с отходящими газами  $q_2$  равна энтальпии газов удаляемых в атмосферу за вычетом количества тепла, вносимого с топливом и с поступающим в топку воздухом, деленной на теплотворную способность топлива, то есть:

$$q_2 = \frac{Y_{yx} - Q_T - Q_B}{Q_H^P} \cdot 100\%, \quad (6.10)$$

где  $Y_{yx}$  – энтальпия уходящих газов, кДж/кг;  $Q_T$  – физическое тепло топлива, кДж/кг;  $Q_B$  – энтальпия поступающего в топку воздуха, кДж/кг.

Порядок подсчета величин  $Y_{yx}$ ,  $Q_T$ ,  $Q_B$  приводится ниже.

Энтальпия уходящих газов подсчитывается по уравнению:

$$Y_{yx} = (V_{RO_2} C_{RO_2} + V_{R_2}^{\min} C_{R_2} + V_{H_2O}^{\min} C_{H_2O} + \Delta V C_{BB}) t_{yx}, \quad (6.11)$$

где  $C_{RO_2}, C_{R_2}, C_{H_2O}, C_{BB}$  – средние объемные теплоемкости газов при постоянном давлении: значения их приводятся в таблице 6.2 в зависимости от температуры, в кДж/нм<sup>3</sup>К;  $t_{yx}$  – температура уходящих газов, °С.

Таблица 6.2– Значение средних объемных теплоемкостей газов и влажного воздуха при постоянном давлении

| Температура<br>°С | $C_{RO_2}$ ,<br>кДж/нм <sup>3</sup> К | $C_{R_2}$ , кДж/нм <sup>3</sup> К | $C_{H_2O}$ ,<br>кДж/нм <sup>3</sup> К | $C_{BB}$ , кДж/нм <sup>3</sup> К |
|-------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| 0                 | 1,593                                 | 1,293                             | 1,494                                 | 1,319                            |
| 100               | 1,713                                 | 1,296                             | 1,506                                 | 1,324                            |
| 200               | 1,796                                 | 1,300                             | 1,522                                 | 1,332                            |
| 300               | 1,871                                 | 1,307                             | 1,542                                 | 1,342                            |
| 400               | 1,929                                 | 1,317                             | 1,566                                 | 1,354                            |
| 500               | 1,997                                 | 1,329                             | 1,589                                 | 1,368                            |

Объем трехатомных газов подсчитывается по уравнению:

$$V_{RO_2} = 0,0186(C^P + 0,375S^P), \text{ нм}^3/\text{кг}, \quad (6.12)$$

где  $C^P$ ,  $S^P$  – рабочее содержание углерода и серы в топливе в % по весу.

Причем для Ставропольского газа  $C^P=73,55$ , а  $S^P=0$ .

Объем двухатомных газов определяется по уравнению:

$$V_{R_2}^{\min} = 0,79V_0 + 0,8 \frac{N^P}{100}, \text{ нм}^3/\text{кг}, \quad (6.13)$$

где  $V_0$  – теоретическое количество воздуха, необходимое для сжигания еди-

ницы массы топлива, определяемое по уравнению:

$$V_0 = 0,089C^P + 0,265H^P + 0,033(S^P - O^P), \text{ нм}^3/\text{кг}, \quad (6.14)$$

где  $C^P$ ,  $H^P$ ,  $N^P$ ,  $O^P$  – рабочий состав топлива.

Объем водяных паров определяется:

$$V_{H_2O}^{\min} = 0,0124(9H^P + W^P) + 0,016V_0, \text{ нм}^3/\text{кг}, \quad (6.15)$$

где  $W^P$  – влажность топлива, для газа  $W^P=0$ .

Объем избыточного воздуха определяется из выражения:

$$\Delta V = (\alpha - 1)V_0, \text{ нм}^3/\text{кг}, \quad (6.16)$$

где  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха.

Таким образом, зная все члены, входящие в уравнение (6.11), подсчитывают величину энтальпии уходящих газов. Температура уходящих газов  $t_{yx}$  при испытании котла замеряется термопарой с последующей записью на вторичном приборе. Значения объемных теплоемкостей компонентов составляющих дымовые газы принимаются из таблицы 6.2 в зависимости от температуры  $t_{yx}$ .

$Q_T$  и  $Q_B$ , входящие в состав уравнения (6.10), определяются по формулам:

$$Q_T = C_T t_T, \text{ кДж/кг}, \quad (6.17)$$

$$Q_B = \alpha V_0 C_B t_B, \text{ кДж/кг}, \quad (6.18)$$

где  $C_T$  – средняя теплоемкость топлива, принимаемая для газа равной 1,675 кДж/кг·К;  $t_T$  – температура топлива, принимаемая равной 10°C;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;  $V_0$  – теоретическое количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг топлива, нм<sup>3</sup>/кг,  $C_B$ ,  $t_B$  – теплоемкость воздуха и его температура.  $C_B$  берется из таблицы 6.2 в зависимости от температуры.

Определив из уравнений (6.9) и (6.10) потери  $q_2$  и  $q_3$  подсчитывается по уравнению (6.4) КПД котла.

Зная КПД котла, подсчитывают часовой расход топлива по уравнению:

$$B = \frac{D(i_{гв} - i_{хв})}{Q_H^P \cdot \eta} 100\%, \quad (6.19)$$

где  $D$  – нагрузка котла, то есть производительность по горячей воде, кг/ч;  
 $i_{гв}$ ,  $i_{хв}$  – энтальпия горячей и холодной воды, кДж/кг.

Для температуры до  $100^\circ\text{C}$  значения энтальпии горячей и холодной воды можно принять численно равными произведению удельной теплоемкости воды ( $C_B = 4,190$  кДж/кгК) на ее температуру.

Удельный расход топлива на получение 1 кг горячей воды заданных параметров определяется по формуле:

$$B = \frac{D(i_{гв} - i_{хв})}{Q_H^P \cdot \eta} 100\%, \text{ кг/кг}. \quad (6.20)$$

## 6.7 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по выполнению работы должен содержать следующее:

- краткое описание лабораторной установки;
- принципиальную схему установки с указанием точек замеров рабочих параметров;
- протокол записи показания измерительных приборов и результатов обработки экспериментальных данных;
- график зависимости коэффициента полезного действия котла от коэффициента избытка воздуха.

## 6.8 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОТЫ

1. Общие понятия о котельных установках и элементах парового котла.
2. Виды тепловых потерь, их характеристика и влияние на величину КПД котла.
3. Методика расчета энтальпии уходящих газов и коэффициентов избытка воздуха.
4. Методика расчета теоретически необходимого количества воздуха и объемов продуктов сгорания.



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

### Исследование теплового процесса в теплообменном аппарате

#### 7.1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

7.1.1 Изучение принципов работы основных видов теплообменных аппаратов.

7.1.2 Изучение теплового процесса при прямоточной и противоточной схеме включения теплообменного аппарата типа «труба в трубе».

7.1.3 Опытное определение коэффициента теплопередачи в теплообменном аппарате типа «труба в трубе».

#### 7.2 ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ

ПК-6 – Способен проводить оценку технологических решений проектов сетей и систем энергообеспечения. Знания, умения и навыки, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы, в рамках формируемых компетенций:

**Знать:** методы моделирования теплового процесса в теплообменном аппарате .

**Уметь:** применять изученные методы моделирования теплового процесса в теплообменном аппарате .

**Владеть:** способностью выбирать и применять изученные методы моделирования

теплового процесса в теплообменном аппарате.

#### 7.3 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

##### 7.3.1 Основные понятия

*Теплообменный аппарат* — это устройство, которое предназначено для передачи теплоты от горячего теплоносителя к холодному.

Теплоносителями могут быть газы, пары, жидкости. Теплообменные аппараты используют как нагреватели и как охладители. Они применяются в области теплоэнергетики, в промышленности и коммунальном хозяйстве.

Теплообменные аппараты подразделяются на *поверхностные*, где передача тепла происходит через твёрдую стенку, и *смесительные*, где теплоносители контактируют непосредственно. Поверхностные теплообменники в свою очередь подразделяются на *рекуперативные* и *регенеративные*, в зависимости от одновременного или поочерёдного контакта теплоносителей с разделяющей их стенкой.

В рекуперативном теплообменнике горячий и холодный теплоносители движутся в разных каналах, между которыми происходит теплообмен через образующие эти каналы стенки. В зависимости от направления движения теплоносителей рекуперативные теплообменники могут быть прямоточными при параллельном движении теплоносителей в одном направлении, противоточными при параллельном встречном движении теплоносителей, а также перекрестноточными при взаимно перпендикулярном движении двух обменивающихся тепловой энергией сред.

Конструктивно рекуперативные теплообменники бывают: кожухотрубные, элементные (секционные), двухтрубные типа «труба в трубе», витые, погружные, оросительные, ребристые, спиральные, пластинчатые, пластинчаторебристые и др.

В регенеративных теплообменниках теплоносители (горячий и холодный) контактируют с твердой стенкой поочерёдно. Теплота накапливается в стенке при контакте с горячим теплоносителем и отдаётся при контакте с холодным.

В смесительном (или контактном) теплообменнике одновременно с теплообменными происходят и массообменные процессы путем прямого смешивания теплоносителей. Наиболее распространены пароводяные

теплообменники струйного типа, использующие в своей основе струйный инжектор. Смесительные теплообменники конструктивно устроены проще, нежели поверхностные, более полно используют тепло. Большое применение контактные теплообменники находят в установках утилизации тепла дымовых газов, отработанного пара и т.п.

Пластинчатые теплообменники состоят из набора пластин, в котором теплоносители движутся между пластинами. Он прост в изготовлении (штампованные пластины складываются с прокладками между ними), легко модифицируется (добавляются или убираются пластины). Пластинчатый теплообменник имеет высокую эффективность (большая площадь контакта через пластины).

Пластинчато-ребристый теплообменник состоит из системы разделительных пластин, между которыми находятся ребристые поверхности – насадки, присоединенные к пластинам методом пайки. С боков каналы ограничиваются брусками, поддерживающими пластины и образующие закрытые каналы.

В основу пластинчато-ребристого теплообменника положена жесткая и прочная цельнопаянная теплообменная матрица, построенная по сотовому принципу и работоспособная до давления 100 атм. И выше. Основные достоинства данного типа теплообменников – это компактность и легкость. Последнее обеспечивается за счет применения при изготовлении теплообменной матрицы пакета из тонколистовых деталей из легких алюминиевых сплавов.

Оребренные пластинчатые теплообменники, состоят из тонкостенных оребренных панелей. За счет конструкции, а также многообразия используемых материалов достигаются высокие температуры греющих сред, небольшие сопротивления, высокие показатели

отношения теплопередающей площади к 85 адисе теплообменника, длительный срок службы, низкая стоимость и др.

Спиральный теплообменник представляет собой два спиральных канала, навитых из рулонного материала вокруг центральной разделительной перегородки. Теплоносители движутся по этим каналам. Применяют спиральные теплообменники для нагрева и охлаждения высоковязких жидкостей.

### 7.3.2 Расчет параметров теплообменника типа «труба в трубе»

Определение коэффициента теплопередачи рабочей поверхности теплообмена  $K$  теплообменника по двум схемам включения (прямоток, противоток), находится исходя из основного уравнения теплопередачи:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t_{cp}, \quad (7.1)$$

где  $Q$ – тепловая нагрузка аппарата, Вт;

$K$ – коэффициент теплопередачи рабочей поверхности теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>К);

$F$  –площадь теплообменной поверхности, равная площади наружной поверхности внутренней трубы теплообменника, м<sup>2</sup>;

$\Delta t_{cp}$ – средний температурный перепад между греющей и нагреваемой водой, °С.

Тепловую нагрузку определяют по уравнению теплового баланса аппарата:

$$Q = q_2 \cdot C_{P2} \cdot (t_1 - t_2) = q_1 \cdot C_{P1} \cdot (t_4 - t_3) \quad (7.2)$$

Физические параметры греющей и нагреваемой воды находят по таблице физических свойств воды (табл. 3.1) при средней температуре теплоносителя:

$$t^{cp} = 0,5 \cdot (t_i + t_{i+1}) \quad (7.3)$$

Скорости движения теплоносителей определяют по формулам

$$W_1 = \frac{4 \cdot q_1}{\rho_1 \cdot \pi \cdot d_1^2}, \text{ м/с} \quad (7.4)$$

$$W_2 = \frac{4 \cdot q_2}{\rho_2 \cdot \pi \cdot (d_3^2 - d_2^2)}, \text{ м/с} \quad (7.5)$$

где  $d_1$ — внутренний диаметр внутренней трубы, м;

$d_2$ —наружный диаметр внутренней трубы, м;

$d_3$ —наружный диаметр наружной трубы, м.

Расчёт коэффициента теплопередачи (K) производят по формуле для плоской стенки, поскольку соотношения диаметров греющей поверхности аппарата значительно меньше 1,8 ( $d_2/d_1 < 1,8$ )

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_{тр}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (7.6)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — коэффициенты теплоотдачи соответственно с внутренней и наружной стороны греющей поверхности, Вт/м<sup>2</sup> К.

Коэффициенты  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  определены из уравнения:

$$\alpha_i = \frac{Nu_i \cdot \lambda_i}{d_i}, \quad (7.7)$$

Где  $d$ — определяющий геометрический размер, м;

$\lambda$  —коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м К);

Nu— критерий Нуссельта.

Таблица 7.1– Физические свойства воды на линии насыщения

| t,<br>°C | $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | $C_p$ ,<br>кДж/(кг К) | $\lambda * 10^2$<br>Вт/(м К) | $\nu * 10^6$ ,<br>м <sup>2</sup> /с | Pr    |
|----------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------------------|-------|
| 0        | 999,9                         | 4,212                 | 55,1                         | 1,789                               | 13,67 |
| 10       | 999,7                         | 4,191                 | 57,4                         | 1,306                               | 9,52  |
| 20       | 998,2                         | 4,183                 | 59,9                         | 1,006                               | 7,02  |
| 30       | 993,7                         | 4,174                 | 61,8                         | 0,805                               | 5,42  |
| 40       | 992,2                         | 4,174                 | 63,5                         | 0,659                               | 4,31  |
| 50       | 988,1                         | 4,174                 | 64,8                         | 0,556                               | 3,54  |
| 60       | 983,2                         | 4,179                 | 65,9                         | 0,478                               | 3,98  |
| 70       | 977,8                         | 4,187                 | 66,8                         | 0,415                               | 2,55  |
| 80       | 971,8                         | 4,195                 | 67,4                         | 0,365                               | 2,21  |
| 90       | 965,3                         | 4,208                 | 68,0                         | 0,326                               | 1,95  |
| 100      | 958,4                         | 4,220                 | 68,3                         | 0,295                               | 1,75  |
| 110      | 951,0                         | 4,233                 | 68,5                         | 0,272                               | 1,60  |
| 120      | 943,1                         | 4,250                 | 68,6                         | 0,252                               | 1,47  |
| 130      | 934,8                         | 4,266                 | 68,6                         | 0,233                               | 1,36  |
| 140      | 926,1                         | 4,287                 | 68,5                         | 0,217                               | 1,26  |
| 150      | 917,0                         | 4,313                 | 68,4                         | 0,203                               | 1,17  |
| 160      | 907,4                         | 4,346                 | 68,3                         | 0,191                               | 1,10  |
| 170      | 897,3                         | 4,380                 | 67,9                         | 0,181                               | 1,05  |
| 180      | 886,9                         | 4,417                 | 67,4                         | 0,173                               | 1,00  |
| 190      | 876,0                         | 4,459                 | 67,0                         | 0,165                               | 0,96  |
| 200      | 866,0                         | 4,505                 | 66,3                         | 0,158                               | 0,93  |

При подсчёте коэффициента теплоотдачи с внутренней поверхности греющей трубы использовать формулы:

а) Для турбулентного режима движения ( $Re > 10^4$ )

$$Nu_{\text{ж}} = 0,021 \cdot Re_{\text{ж}}^{0,8} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{с}}} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_e \quad (7.8)$$

б) Для переходного режима движения ( $Re = 2100 - 10^4$ )

$$Nu_{\text{ж}} = K_0 \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{с}}} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_e \quad (7.9)$$

при этом,  $K_0$  взять из таблицы 7.2.

в) Для ламинарного режима движения ( $Re \leq 2100$ )

$$Nu_{\text{ж}} = 0,015 \cdot Re_{\text{ж}}^{0,33} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,43} \cdot Gr_{\text{ж}}^{0,1} \cdot \left( \frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{с}}} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_e \quad (7.10)$$

Таблица 7.2. – Значения поправочного коэффициента  $K_0$  переходного режима

| $Re_{\text{ж}} \cdot 10^{-3}$ | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 3   | 4    | 5    | 6    | 7  | 8    |
|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|----|------|
| $K_0$                         | 1,9 | 2,2 | 3,3 | 3,8 | 4,4 | 5,0 | 10,3 | 15,5 | 19,5 | 27 | 33,3 |

Индексы “ж” и “с” означают, что физические константы жидкости взяты соответственно при средней температуре жидкости и средней температуре стенки. Для упрощения расчетов при выборе значений критерия Прандтля ( $Pr_{\text{с}}$ ) принять температуры наружной поверхности стенки на 2 градуса больше, а внутренней на 3 градуса меньше, чем средняя температура воды, контактирующей с этими поверхностями.

Значения поправочного коэффициента на длину трубы  $\varepsilon_e$  принять из таблицы 7.3.

Таблица 7.3 Значения поправочного коэффициента на длину трубы  $\varepsilon_e$

| l/d             |                    | 1   | 2   | 5    | 10   | 15   | 20   | 30   | 40   | 50  |
|-----------------|--------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|-----|
| $\varepsilon_e$ | Ламинарный режим   | 1,9 | 1,7 | 1,44 | 1,28 | 1,18 | 1,13 | 1,05 | 1,02 | 1,0 |
|                 | Турбулентный режим | 1,5 | 1,4 | 1,23 | 1,14 | 1,10 | 1,08 | 1,04 | 1,02 | 1,0 |

Для определения коэффициента теплоотдачи с наружной поверхности греющей трубы использовать те же формулы по расчёту критерия Нуссельта, вводя дополнительный множитель  $(d_3/d_2)^{0,18}$ .

В качестве определяющего размера (диаметра) в расчётах использовать эквивалентный диаметр, равный:

$$d_{\text{экв}} = d_3 - d_2 \quad (7.11)$$

Используемые в расчётных уравнениях “а”, “б”, “в” критерии Рейнольдса (Re), Грасгофа (Gr) определять по формулам:

$$\text{Re} = \frac{W \cdot d}{\nu} ; \quad (7.12)$$

$$\text{Gr} = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta t \cdot d^3}{\nu^2} , \quad (7.13)$$

где  $\beta = \frac{1}{T} = \frac{1}{t + 273}$  - коэффициент объёмного расширения;

$g = 9,81 \text{ м/сек}^2$  - ускорение свободного падения.

Для каждой схемы включения аппарата средний температурный напор ( $\Delta t_{\text{ср}}$ ) определять как среднелогарифмический

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\mu}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\mu}}}, \quad (7.14)$$

где  $\Delta t_{\delta}$  и  $\Delta t_{\mu}$  – наибольший и наименьший температурные перепады между греющим теплоносителем и нагреваемой водой.

Площадь теплообменной поверхности определяется по формуле:

$$F = \pi \cdot d_2 \cdot L \quad (7.15)$$

#### 7.4 ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ.

Экспериментальная установка состоит из универсального измерительного стенда, на который устанавливается сменный блок теплообменника типа «труба в трубе» (фотография блока приведена на рис. 7.1).

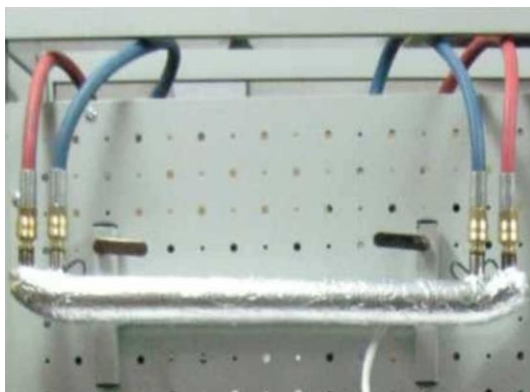


Рис. 7.1 Сменный блок теплообменника типа «труба в трубе».

Принципиальная схема сменного экспериментального блока установки, который является объектом исследования, изображена на рис. 7.2. Этот блок представляет собой теплообменник, состоящий из трубы (1) с внутренним диаметром  $d_1=14$  мм и наружным диаметром  $d_2=16$  мм, которая размещена

внутри наружной трубы (2) с внутренним диаметром  $d_3=22$  мм. Длина теплообменной поверхности внутренней трубы  $L=500$  мм. Греющая вода подается во внутреннюю трубу, а в межтрубное пространство подается нагреваемая вода. Трубы изготовлены из стали с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{\text{тр}}=50$  Вт/(м К).

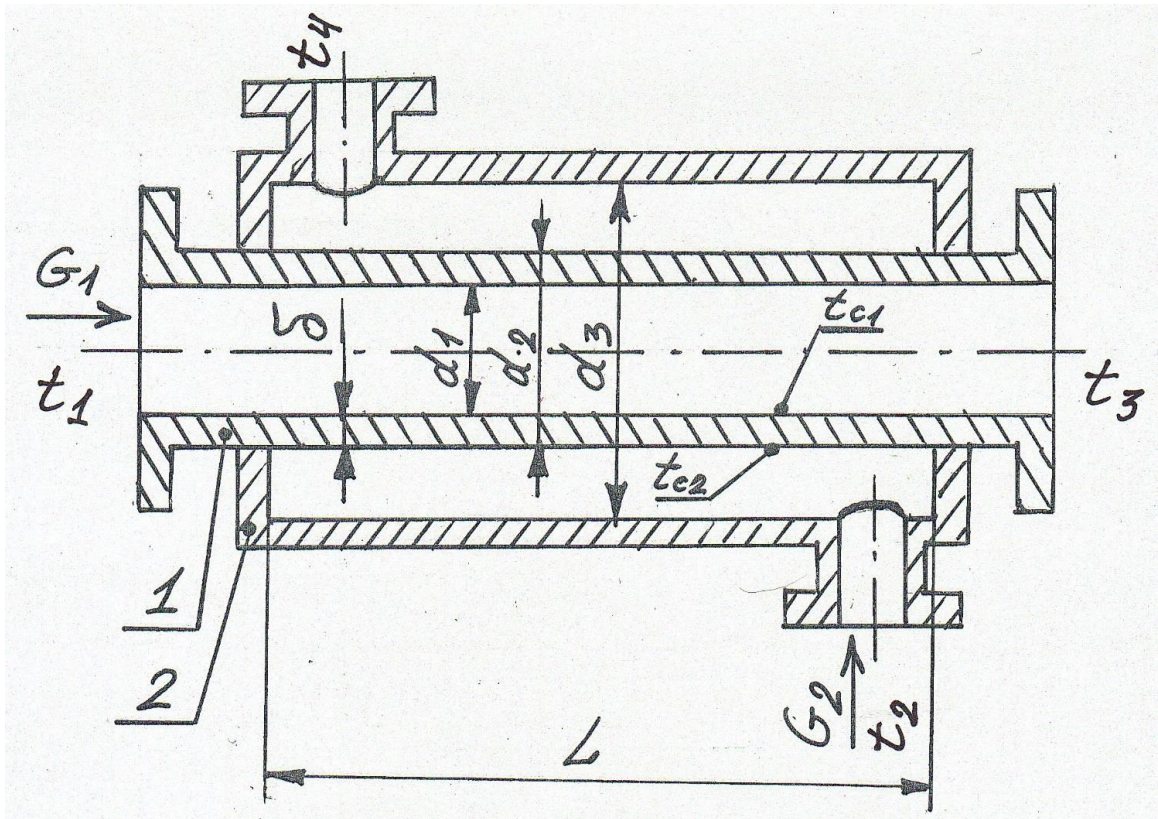


Рис. 3.2. Схема теплообменника «труба в трубе»

- 1- внутренняя труба; 2- наружная труба;  $d_1$ - внутренний диаметр внутренней трубы;  $d_2$ - наружный диаметр внутренней трубы;  $d_3$ - внутренний диаметр наружной трубы;  $t_{c1}$ - температура внутренней поверхности стенки внутренней трубы;  $t_{c2}$ - температура наружной поверхности стенки внутренней трубы;  $L$ -длина теплообменной части внутренней трубы.

## 7.5 УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Студенты обязаны выполнять общие требования безопасности согласно Инструкции по охране труда в лаборатории 11-108. Инструктаж по технике безопасности проводится преподавателем под подпись студента в специальном журнале по технике безопасности.

## 7.6 УКАЗАНИЯ ПО ПОРЯДКУ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Установить блок лабораторной установки «Исследование теплового процесса в теплообменном аппарате типа «труба в трубе»» на перфорированную панель стенда в горизонтальном положении (штуцеры подключения к водяному контуру должны располагаться сверху) и закрепить поворотом крепежных рукояток во встречном направлении на четверть оборота.

2. Подключить трубки контура горячей и холодной воды к установке.

3. Произвести подключение кабеля к стенду в разъем, размещенный на верхней стальной крышке.

**ВНИМАНИЕ!** Соблюдайте соответствие подключаемых попарно разъемов друг другу: одна коммутируемая пара – разъемы типа «папа/мама».

4. Прогреть бак с горячей водой до необходимой температуры. Для этого включить автоматические выключатели QF1 и QF2 на панели стенда.

5. Включить терморегулятор бака горячей воды клавишным выключателем SA5. Установить на регуляторе необходимую для эксперимента температуру (по указанию преподавателя, но не более  $+70^{\circ}\text{C}$ ).

6. Включить терморегулятор бака холодной воды клавишным выключателем SA6. Установить на регуляторах температуры заданные параметры (для холодной воды задается температура воздуха в помещении).

7. Включить насос контура холодной воды «Насос-2» клавишным выключателем SA4, затем – включить насос горячей воды «Насос-1» клавишным выключателем SA2.

8. Включить переключатель схемы движения теплоносителей в режим «прямоток».

9. С помощью вентилей регулировки подачи теплоносителей установить заданные расходы воды (рекомендуется не более 0,1 л/с).

10. Дождаться, когда процесс теплопередачи можно будет считать установившимся (изменение среднего значения температуры за 2 мин не превышает  $0,1^{\circ}\text{C}$ ).

Зафиксировать показания приборов и занести их в таблицу 7.4.

11. Переключить схему движения теплоносителей в режим «противоток». Убедиться, что величины расходов теплоносителей не изменились, при необходимости подкорректировать расходы соответствующими регулировочными вентилями. Расходы теплоносителей в опыте № 1 и № 2 должны быть равны с точностью  $\pm 0,01$  л/с

12. После установления стационарного режима снять показания температур. Результаты записать в таблицу 7.4.

Таблица 7.4. Результаты измерений

| № опыта | Схема включения | $t_1$ | $t_2$ | $t_3$ | $t_4$ | $Q_1$<br>л/с | $Q_2$<br>л/с |
|---------|-----------------|-------|-------|-------|-------|--------------|--------------|
| 1       | прямоток        |       |       |       |       |              |              |
| 2       | противоток      |       |       |       |       |              |              |

### *ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ*

1. Рассчитать значение мощности ( $Q$ ) теплообменника по уравнению (7.2).
2. Рассчитать средний температурный напор ( $\Delta t_{\text{CP}}$ ) по формуле (7.14).
3. Рассчитать площадь теплообменной поверхности ( $F$ ) по формуле (7.15).
4. Определить фактический коэффициент теплопередачи ( $K_{\text{факт}}$ ) из уравнения (7.1).
5. Из уравнений (7.4) и (7.5) определить скорости теплоносителей ( $W_1$  и  $W_2$ ).
6. Определить режимы движения теплоносителей рассчитав значения критериев Рейнольдса из уравнения (7.12).
7. В зависимости от режима движения теплоносителей по формулам (7.8, 7.9, 7.10) определить значения критерия Нуссельта.

8. По уравнению (7.7) определить коэффициент теплоотдачи от греющей воды к внутренней стенке внутренней трубы и коэффициент теплоотдачи от наружной стенки внутренней трубы к нагреваемой воде.
9. По уравнению (7.6.) вычислить теоретический коэффициент теплопередачи ( $K_{\text{теор}}$ ).
10. Расчетные параметры занести в таблицу 7.5.

Таблица 7.5. Результаты расчетов основных параметров

| № опыта | Q | $\Delta t$ | $K_{\text{факт}}$ | $W_1$ | $W_2$ | $Re_1$ | $Re_2$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $K_{\text{теор}}$ |
|---------|---|------------|-------------------|-------|-------|--------|--------|------------|------------|-------------------|
| 1       |   |            |                   |       |       |        |        |            |            |                   |
| 2       |   |            |                   |       |       |        |        |            |            |                   |

## 7.7 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет оформляется в 18-листовой тетради и должен содержать следующие пункты:

- тема работы;
- цель работы;
- краткое описание работы;
- принципиальную схему опытной установки;
- таблицы записи показаний измерительных приборов и результатов обработки опытных данных;
- подробные расчеты с краткими пояснениями;
- схематичные графики изменения температур теплоносителей от площади теплообменной поверхности для прямоточной и противоточной схем включения;
- сравнение фактического коэффициента теплопередачи с теоретическим
- выводы по лабораторной работе.

## 7.6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОТЫ

1. Назначение и область применения теплообменных аппаратов.

Основные виды теплообменников.

2. Принципы работы основных видов теплообменников.

3. Уравнение теплового баланса рекуперативного теплообменника.

4. Методика расчета рекуперативного теплообменника типа «труба в трубе».

5. Уравнение для определения среднего температурного напора рекуперативного теплообменника типа «труба в трубе».

6. Изобразить теплообменник типа «труба в трубе» включенный по  
прямоточной

и противоточной схеме.

7. Методика расчета  $\Delta t_6$  и  $\Delta t_m$  – наибольшего и наименьшего температурных перепадов между греющей и нагреваемой водой.

8. Уравнения критериев подобия Рейнольдса, Нуссельта, Грасгофа и величины входящие в эти уравнения.

9. Основное уравнение теплопередачи рекуперативного теплообменника, величины, входящие в это уравнение.

10. Режимы течения теплоносителей в теплообменнике, какой величиной  
они

определяются и от каких физических параметров теплоносителей зависят эти режимы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

### Определение коэффициента затекания воды в отопительный прибор и его теплоотдачи

#### 8.1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное определение коэффициента затекания воды в нагревательный прибор и его теплоотдачи при питании прибора сверху – вниз и одностороннем присоединении к стояку.

#### 8.2 ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ

ПК-6 – Способен проводить оценку технологических решений проектов сетей и систем энергообеспечения.

Знания, умения и навыки, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы, в рамках формируемых компетенций:

**Знать:** методы определения коэффициента затекания воды в отопительный прибор и его теплоотдачи.

**Уметь:** применять изученные методы определения коэффициента затекания воды в отопительный прибор и его теплоотдачи.

**Владеть:** способностью выбирать и применять изученные методы определения коэффициента затекания воды в отопительный прибор и его теплоотдачи.

#### 8.3 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Отопительные приборы могут подключаться к стоякам по различным схемам. В зависимости от типа прибора и разводки системы отопления существуют следующие схемы подключения отопительных приборов:

- одностороннее, когда теплопроводы расположены с одной стороны отопительного прибора;
- разностороннее, когда теплопроводы расположены с противоположных сторон.

На рисунке 8.1 показаны различные виды одностороннего подключения к однотрубной вертикальной системы отопления:

- а) приборного узла с осевым замыкающим участком;
- б) приборного узла со смещённым замыкающим участком;
- в) приборных узлов проточно-регулируемых, с осевым и смещённым замыкающими участками;
- г) приборных узлов с проходными регулирующими кранами, осевым и смещёнными замыкающими участками.

На рис. 8.2 приведены и другие схемы подключения приборов.

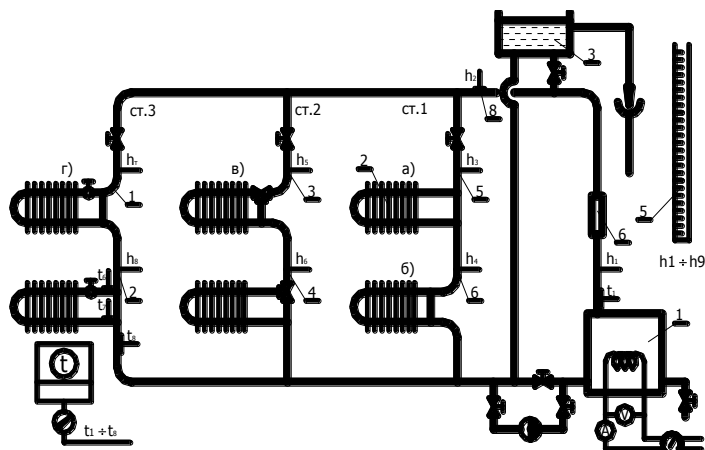


Рисунок 8.1

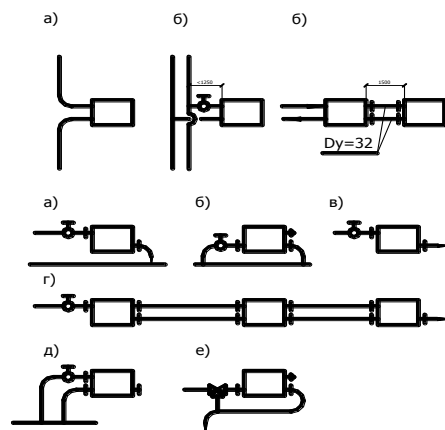


Рисунок 8.2

Приборные узлы с односторонним присоединением труб применяют как в вертикальных, так и в горизонтальных однотрубных системах водяного отопления. В горизонтальных однотрубных ветвях чаще использует проточные узлы и узлы с замыкающими участками и кранами

КРП. В двухтрубных стояках водяного и парового отопления каждый отопительный прибор присоединяют отдельно к подающей и обратной трубам. Для регулирования количества теплоносителя используют при водяном отоплении краны двойной регулировки КРД, а при паровом отоплении – паровые вентили.

На вертикальных однетрубных стояках применяют короткие подводки  $L=500$  мм, выполняемые без уклонов.

При двухтрубных стояках рациональная длина подводов не более 1,25 м. При большем расстоянии от стояка до прибора рекомендуется устанавливать дополнительный стояк. Уклоны предусматривают в сторону движения теплоносителя равными 5 – 10 мм на всю длину подводки.

При одностороннем присоединении труб не рекомендуется чрезмерно укрупнять чугунные радиаторы – более 25 секций (15 в системах с естественной циркуляцией), а также – соединять на «сцепке» более двух радиаторов. Соединение на «сцепке» выполняют в пределах одного помещения или в том случае, когда последующий прибор, предназначен для нерегулируемого отопления второстепенного помещения. «Сцепка» приборов применяют также в ветвях горизонтальной однетрубной системы.

Разностороннее присоединение, труб к прибору применяют в тех случаях, когда горизонтальная обратная магистраль или конденсатопровод проходит непосредственно под прибором, или когда прибор устанавливают ниже магистралей.

Движение воды в приборах однетрубных стояков возможно сверху-вниз и снизу-вверх, причём в последнем случае замыкающие участки смещают, для увеличения коэффициента затекания воды в приборы. Кроме того, они являются одновременно компенсаторами удлинения труб при нагревании.

В приборах двухтрубных стояков чаще предусматривают движение теплоносителя по схеме сверху – вниз.

Присоединение труб к прибору, создающее движение воды в нём по схеме снизу-вверх, характерно для горизонтальной однетрубной системы. Так же используются верхние приборы вертикальных систем отопления.

Арматура, устанавливаемая на подводках, имеет различное назначение:

- при двухтрубных стояках применяют краны, имеющие повышенное гидравлическое сопротивление, способствующее равномерности распределения теплоносителя по отопительным приборам;

- при однетрубных стояках – пониженным сопротивлением протеканию теплоносителя, способствующим затеканию в прибор большего количества воды, что повышает в них среднюю температуру теплоносителя.

На подводках к отопительным приборам устанавливают: при однетрубных системах – регулирующие краны (только для эксплуатационного регулирования), имеющие пониженный коэффициент местного сопротивления (ручные краны проходные КРП и трехходовые КРТ, автоматические радиаторные терморегуляторы для однетрубных систем); при двухтрубных системах – регулирующие краны (для пусконаладочного и эксплуатационного регулирования), имеющие повышенные коэффициент местного сопротивления (ручные краны двойного регулирования, краны КРП с дросселирующим устройством, автоматические радиаторные терморегуляторы для двухтрубных систем). Для автоматического поддержания заданной температуры воздуха внутри помещения используют автоматические радиаторные терморегуляторы. Терморегулятор состоит из регулирующего клапана и термостатического элемента с сильфоном. Температура в помещении поддерживается путем изменения расхода воды через отопительный прибор. Регулирующие клапана радиаторных терморегуляторов выпускаются двух видов: с малым гидравлическим сопротивлением – для однетрубных насосных и любых гравитационных систем отопления; с повышенным гидравлическим сопротивлением и

возможностью дополнительной настройки на требуемое гидравлическое сопротивление (при режимной наладке) – для двухтрубных насосных систем отопления. Применение автоматических радиаторных терморегуляторов позволяет сэкономить в среднем 15% тепла на отопление за счет недопущения перегрева помещений от солнечной радиации, бытовых приборов, людей и т. Д. На стояках и вводах в отдельные квартиры (при квартирных разводках систем отопления) могут устанавливаться вентили, пробковые или шаровые краны. Шаровой кран в открытом состоянии практически не создает дополнительного гидравлического сопротивления.

Гидравлической устойчивостью называется способность системы отопления сохранять постоянство расхода воды на каждом из её участков при нарушении расчётного режима или пропорционально изменять расход на всех участках при изменении общего расхода. Как правило, гидравлическую устойчивость считают синонимом тепловой устойчивости.

Показателем гидравлической устойчивости системы является отношение расхода на любом из участков системы при переменном режиме к расчётному расходу. Отклонения от оптимального режима называют разрегулировкой системы. Различают вертикальную разрегулировку по этажам и горизонтальную в пределах одного этажа. Разрегулировка системы отопления может возникнуть при периодическом отклонении расхода в стояках от расчётного режима вследствие ремонта, дросселирования приборов при индивидуальном регулировании, завоздушивания системы и ряде других причин.

Из числа систем с тупиковым движением теплоносителя, лучшую гидравлическую устойчивость имеют системы с большим количеством стояков, а также при относительно высоком гидравлическом сопротивлении стояков по отношению к гидравлическому сопротивлению магистрали. Кроме этого, разрегулирование системы будет меньшим, если стояки с переменной тепловой нагрузкой присоединять по возможности ближе к главному стояку.

При определении распределения потока в системе отопления при заданных диаметрах труб наиболее удобен метод расчёта по характеристикам сопротивлений.

Характеристика сопротивления сети  $S$ ,  $\text{Па}/(\text{кг}\cdot\text{ч}^{-1})^2$  определяется из выражения:

$$S = A \left( \frac{\lambda}{d} l + \sum \xi \right) \quad (8.1)$$

$$A = \frac{6,26 \cdot 10^{-2}}{\rho \cdot d^4}$$

где  $\rho$  – удельное динамическое давление на участке,  $\text{Па}/(\text{кг}\cdot\text{ч}^{-1})^2$ ;

$d$  – диаметр участка, м;

$\rho$  – плотность теплоносителя (при  $t=20^\circ\text{C}$ ,  $\rho=988 \text{ кг/м}^3$ );

$\lambda$ ,  $\sum \xi$ ,  $l$  – соответственно коэффициент трения, сумма коэффициентов местных сопротивлений и длина участка, м.

Тогда общие потери давления на участке, Па, равны:

$$\Delta P = S \cdot G^2, \quad (8.2)$$

где  $G$  – расход воды на участке, кг/ч.

Величина  $1/\sqrt{S}$  называется проводимостью сети,  $\text{кг}/(\text{ч}\cdot\text{Па}^{0,5})$  и обозначается  $\sigma$ ,

т. е.

$$\sigma = 1/\sqrt{S}. \quad (8.3)$$

При последовательно соединённых участках суммарная характеристика сопротивления равна:

$$S_{\text{общ}} = S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n. \quad (8.4)$$

При параллельно соединённых участках суммарная проводимость определяется:

$$\delta_{\text{общ}} = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \dots + \delta_n. \quad (8.5)$$

При этом расходы в параллельных участках сети пропорциональны их проводимостям, т. Е.

$$\frac{G_i}{G_{общ.}} = \frac{\sigma_i}{\sigma_{общ.}} \quad (8.6)$$

Теплопроизводительность отопительного прибора определяется по формулам:

$$Q = G \cdot c \cdot (t_2 - t_{см}); \quad (8.7)$$

$$Q = x \cdot c \cdot (t_2 - t_x), \quad (8.8)$$

где  $G$  – расход воды, протекающей через стояк, кг/с;

$x$  – неизвестный расход воды, протекающей через отопительный прибор, кг/с;

$c$  – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг\*К);

$t_x$  – температура воды, уходящей из отопительного прибора, °С;

$t_{см}$  – температура смеси (слияние потоков из замыкающего участка отопительного прибора), °С.

Из приведенных формул получаем выражения для определения коэффициента затекания воды (доли количества воды, протекающей через отопительный прибор, от общего расхода воды на стояке):

$$x = G \frac{t_2 - t_{см}}{t_2 - t_x}; \quad (8.9)$$

$$\alpha = \frac{x}{G} = \frac{t_2 - t_{см}}{t_2 - t_x} . \quad (8.10)$$

#### 8.4 ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Экспериментальная установка (рис. 8.1) имеет три стояка (ст.1, ст.2, ст.3) с различным присоединением отопительных приборов:

– стояк (ст.1) имеет приборы, подключенные с прямым и смещенным замыкающими участками;

– отопительные приборы стояка (ст.2) подключены через краны типа КРТ;

– отопительные приборы стояка (ст.3) подключены через краны типа КРП.

Система однострунная, вертикальная с верхней разводкой, тупиковая с односторонним подключением отопительных приборов, и включает в себя следующие элементы: 1– котел электрический; 2 – отопительный прибор; 3 – бак расширительный; 4 – насос циркуляционный; 5 – пьезометрическая трубка; 6 – ротаметр.

Электрический котел имеет регулятор для изменения нагрузки и амперметр и вольтметр для ее замера. Температура воды измеряется при помощи термодатчиков, подключенных к вторичному прибору через переключатель.

Система может работать как с естественной циркуляцией, так и с принудительной.

## 8.5 УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Студенты обязаны выполнять общие требования безопасности согласно Инструкции по охране труда в лаборатории 11-108. Инструктаж по технике безопасности проводится преподавателем под подписью студента в специальном журнале по технике безопасности.

## 8.6 УКАЗАНИЯ ПО ПОРЯДКУ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Получить от преподавателя указания по температурному режиму и исследуемому отопительному прибору.

2. Вычертить схему установки для определения коэффициента затекания воды в отопительный прибор и его теплоотдачи.

3. Включить нагреватель котла 1 и циркуляционный насос 4.

4. Добиться стабильности работы установки на заданном температурном режиме. Для этого проверить постоянство температур на входе и выходе из прибора.

5. Снять показания ротаметра 6 и по тарифовочному графику определить количество воды, которое проходит через контур.

Одновременно снять показания термометров. Каждое наблюдение проводить не менее трех раз с интервалом 7 – 10 минут.

6. По формулам (1.10) и (1.7) определить коэффициент затекания воды в нагревательный прибор и его теплоотдачу.

Данные наблюдений и результаты расчетов занести в таблицу 8.1.

Таблица 8.1 – Протокол записи наблюдений и результатов обработки опытных данных

| №<br>опыт<br>а | Температура<br>воды,<br>поступающе<br>й<br>в прибор<br>$t_2, ^\circ\text{C}$ | Температура<br>воды,<br>уходящей из<br>прибора<br>$t_x, ^\circ\text{C}$ | Темпе-<br>ратура<br>смеси<br>$t_{\text{см}}, ^\circ\text{C}$ | Расход<br>воды<br>$G, \text{кг/с}$ | Кэф-<br>фициент<br>затека-<br>ния<br>$\alpha$ | Теплоот-<br>дача<br>прибора<br>$Q, \text{Вт}$ |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                |                                                                              |                                                                         |                                                              |                                    |                                               |                                               |

## 8.7 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по выполненной работе должен содержать следующее:

- краткое описание основных положений по определению коэффициента затекания;
- описание экспериментального стенда;
- порядок проведения эксперимента и результаты обработки опытных данных;
- выводы.

## 8.8 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОТЫ

1. Виды прокладки систем отопления.
2. Типы присоединения отопительных приборов.
3. Метод гидравлического расчета систем отопления по характеристикам

сопротивления.

4.Методика определения коэффициента затекания.

5.Устройство стенда и правила его регулирования.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

### Определение динамики давления в системе водяного отопления

#### 9.1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

9.1.1 Экспериментальное измерение давлений на участках системы отопления;

9.1.2 Построение пьезометрического графика систем отопления и оценка устойчивости циркуляции в стояках.

#### 9.2 ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ

ПК-6 – Способен проводить оценку технологических решений проектов сетей и систем энергообеспечения.

Знания, умения и навыки, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы, в рамках формируемых компетенций:

**Знать:** методы определения динамики давления в системе водяного отопления.

**Уметь:** применять изученные методы определения динамики давления в системе водяного отопления.

**Владеть:** способностью выбирать и применять изученные методы определения динамики давления в системе водяного отопления.

#### 9.3 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Гидравлическое давление в каждой точке циркуляционных колец системы отопления в течение отопительного сезона непрерывно изменяется. Исходное давление соответствует гидростатическому давлению в каждой точке системы в состоянии покоя. Наибольшие изменения давления в системе происходят при циркуляции максимального количества воды, температура которой достигает максимального значения при расчетной температуре наружного воздуха.

Изменение гидравлического давления рассматривают с целью выявления в системе отопления мест, с чрезмерно низким или высоким давлением, вызывающим нарушение циркуляции.

Значение гидравлического давления капельной несжимаемой жидкости при установившемся движении потока по уравнению Бернулли составит:

$$P = \frac{\rho w^2}{2} + \rho g h + p, \quad (9.1)$$

где  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$h$  – расстояние по вертикали от оси потока до плоскости сравнения, м;

$w$  – средняя скорость движения потока, м/с;

$p$  – давление потока, Па.

Кинетической энергией потока обычно пренебрегают в отопительных системах (  $\rho \frac{w^2}{2} \approx 0$  ) .

Естественное циркуляционное (гравитационное) давление в системе водяного отопления равно:

$$\Delta P_e = g \sum h_i (\rho_{i+1} - \rho_i), \quad (9.2)$$

где  $h_i$  – расстояние по вертикали от центра нагревания до центра охлаждения, м.

В системах с естественной циркуляцией потери давления равны:

$$\Delta P = \Delta P_e \quad (9.3)$$

Общие потери давления при движении воды в насосной системе отопления определяются выражением:

$$\Delta P_i = \Delta P_n + \Delta P_e; \quad (9.4)$$

$$\Delta P_i = \Delta P_{наг} + \Delta P_{всас}; \quad (9.5)$$

где  $\Delta P_i$  – напор, развиваемый циркуляционным насосом;

$\Delta P_{наг}$  – сопротивление системы отопления на участке от насоса до «нулевой» точки;

$\Delta P_{всас}$  – сопротивление системы отопления на участке от «нулевой» точки до насоса.

Как известно, гидравлические потери системы при движении воды определяются формулой Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta P_c = \sum (Rl + Z), \quad (9.6)$$

где  $R$  – удельные потери на трение,

$$R = \frac{\lambda}{d_g} \cdot \frac{w^2 \rho}{2} \quad (9.7)$$

$\lambda$  – коэффициент трения. В зависимости от гидродинамики потока коэффициент определяется по различным формулам:

- при ламинарном движении ( $Re < 2300$ )  $\lambda = f(Re)$  и может быть определен по формуле Пуазейля:

$$\lambda = \frac{64}{Re}; \quad (9.8)$$

В отоплении чаще принимают зону  $300 < Re < 7000$ , а в формулу Пуазейля вводят поправку на шероховатость труб. Тогда:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \left[ 1 + 4 \left( \frac{d_g}{K_s} \right)^{0,8} \right]; \quad (9.9)$$

- при турбулентном движении воды в трубах (во всей области, гидравлически гладких и шероховатых труб) используют формулу (или диаграмму)

Колбрука или формулу Альтшуля:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \lg \left( \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{\hat{E}_y}{3,7 d_a} \right); \quad (9.10)$$

где  $K_s$  – эквивалентная шероховатость внутренней поверхности труб (в системах водяного отопления принимают  $K_s = 0,2$  мм);

$d_g$  – внутренний диаметр трубопровода, м;

$l$  – длина участка трубопровода, м;

$Z$  – потери давления на местные сопротивления,  $Z = \xi(w^2 \rho / 2)$ ;

$\xi$  – коэффициент местного сопротивления (КМС).

Построенные на контуре системы отопления эпюры давлений или пьезометрический график позволяют наглядно узнать его изменения. Для надежной циркуляции, давление в подающей магистрали должно быть выше, чем в обратной.

Системы отопления выполняют преимущественно из стальных водогазопроводных труб по ГОСТ 3262-75 (обыкновенных, усиленных и легких) и стальных электросварных труб по ГОСТ 10704-76. Усиленные трубы применяют в уникальных долговременных сооружениях со скрытой прокладкой труб; легкие трубы предназначены под сварку или накатку резьбы для их соединения в системах с открытой прокладкой труб. Стальные трубопроводы удобны для выполнения вертикальных систем отопления с открытой прокладкой трубопроводов, позволяют использование теплоносителя с высокими температурами, обладают небольшим коэффициентом теплового удлинения  $0,012 \text{ мм}/(\text{К} \cdot \text{м})$ , но требуют дополнительной антикоррозийной обработки наружной поверхности. Применение в качестве теплоносителя в стальных трубопроводах не деаэрированной и не умягченной воды приводит к коррозии и образованию накипи на внутренней поверхности трубопроводов, что значительно снижает срок службы. При квартирной разводке, из-за сложности скрытой прокладки стальных трубопроводов, их прокладывают открыто, это портит эстетический вид помещения.

Медные трубопроводы отличаются самым низким коэффициентом шероховатости ( $K_{\text{меди}} = 0,0000015 \text{ м}$ ) по сравнению со сталью ( $K_{\text{стали}} = 0,0002 \text{ м}$ ), а у пластиковые труб  $K_{\text{пластик}} = 0,000007 \text{ м}$ . Такой низкий коэффициент шероховатости позволяет работать на трубопроводах маленьких диаметров ( $D_{\text{у}} = 8 \text{ мм}$  и  $D_{\text{у}} = 10 \text{ мм}$ ) для стояков и подводок к приборам. При

использовании медных труб в качестве отопительных приборов следует использовать стальные панельные, чугунные секционные радиаторы, а при использовании алюминиевых приборов – устанавливать в месте подсоединения трубопровода с нагревательным прибором стальную оцинкованную пробку. Выполнение этих условий позволит избежать электромагнитной коррозии, которая возникает при прямом присоединении меди с алюминием.

Полимерные и металлополимерные трубопроводы не требуют специальной подготовки воды и антикоррозийной защиты поверхностей. Так как расчетный срок службы этих труб более 40 лет, то они могут замоноличиваться в стены, в подготовку пола без кожуха. Открытая прокладка допускается в местах, где исключается механическое и термическое повреждение трубопроводов и прямое воздействие ультрафиолетового излучения. К достоинствам полимерных и металлополимерных труб по сравнению со стальными относятся: легкость, долговечность, удобство транспортировки и монтажа; не подверженность коррозии и накипелобразованию; меньший коэффициент шероховатости.

Недостатки: больший коэффициент теплового удлинения  $0,14 \div 0,2 \text{ мм}/(\text{К}^{\circ}\text{м})$ ; кислородопроницаемость полимерных труб; хрупкость, подверженность механическим повреждениям и деформации, в системах отопления для таких труб снижается рабочая температура теплоносителя до  $90^{\circ}\text{C}$  (на более высоких параметрах резко уменьшается срок эксплуатации труб).

#### 9.4 ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Лабораторная установка представляет собой специальный стенд, состоящий из теплогенератора - электрического отопительного котла и четырех замкнутых контуров. В лабораторной работе измерение требуемых параметров проводится при работе замкнутого контура через стальной радиатор.

#### 9.5 УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Студенты обязаны выполнять общие требования безопасности согласно Инструкции по охране труда в лаборатории 11-108. Инструктаж по технике безопасности проводится преподавателем под подпись студента в специальном журнале по технике безопасности.

## 9.6 УКАЗАНИЯ ПО ПОРЯДКУ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Исследования проводятся по указанию преподавателя, как при естественной циркуляции, так и при насосной.

При работе систем отопления с естественной циркуляцией, расширительный бак подключается к верхней точке системы.

При работе систем отопления с насосной циркуляцией, расширительный бак подключен к всасывающему патрубку насоса.

2. Снять показания пьезометра при отсутствии циркуляции. Определить «нулевую» точку.

3. Включить нагреватель котла и установить заданный преподавателем режим.

4. Добиться стабильности работы установки на заданном режиме.

5. Снять показания пьезометра при наличии циркуляции в заданном режиме, измерения провести не менее трех раз с интервалом 7 – 10 минут. Измерения проводить относительно «нулевой» точки.

6. Данные наблюдений занести в таблицу 9.1.

Вычислить давления на участках системы по формуле (9.1) и по ним построить эпюру давлений (пьезометрический график) на участках системы отопления.

Таблица 9.1 – Протокол записи наблюдений и результатов обработки данных.

| № опыта | Расход | Температура воды, °С | Пьезометрические высоты, см |
|---------|--------|----------------------|-----------------------------|
|---------|--------|----------------------|-----------------------------|

|  | воды<br>$G$ , кг/с | в<br>подающей<br>магистрале<br>$t_1$ | в обратной<br>магистрале<br>$t_2$ | $h_1$ | $h_2$ | $h_3$ | $h_4$ | $h_5$ | $h_6$ | $h_7$ | $h_8$ | $h_9$ |
|--|--------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  |                    |                                      |                                   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|  |                    |                                      |                                   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|  |                    |                                      |                                   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |

Продолжение таблицы 9.1

| Средняя плотность воды,<br>$\text{кг/м}^3$ |          | Давление, Па |       |       |       |       |       |       |       |       |  |
|--------------------------------------------|----------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| $\rho_o$                                   | $\rho_e$ | $P_1$        | $P_2$ | $P_3$ | $P_4$ | $P_5$ | $P_6$ | $P_7$ | $P_8$ | $P_9$ |  |
|                                            |          |              |       |       |       |       |       |       |       |       |  |
|                                            |          |              |       |       |       |       |       |       |       |       |  |
|                                            |          |              |       |       |       |       |       |       |       |       |  |

## 9.7 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по выполненной работе должен содержать следующее:

- краткое описание основных положений по определению давления в системе;
- порядок проведения эксперимента и результаты обработки опытных данных;
- эпюра давлений (пьезометрический график) на участках системы отопления;
- выводы.

## 9.8 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОТЫ

1. Характеристика уравнения Бернулли.

2. Режимы течения теплоносителя в водяных системах отопления.
3. Характеристика потерь напора в системе.
4. Условия подключения расширительного бака при естественной и искусственной циркуляции.
5. Перераспределение давления в системе при работе.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### ПРИЛОЖЕНИЕ 1

**Эмпирические интерполяционные зависимости для расчета  
теплофизических характеристик сухого воздуха  
при  $t = -50 - 1200^{\circ}\text{C}$  и  $p = 760$  мм.рт.ст.**

1.1 Теплопроводность  $\lambda$ , Вт/(м·К):

$$\lambda = 0,02465 + 0,7336 \cdot t \cdot 10^{-4} - 1,636 \cdot t^2 \cdot 10^{-8}.$$

1.2 Коэффициент кинематической вязкости  $\nu$ , м<sup>2</sup>/с:

$$\nu = (13,06 + 0,1 \cdot t + 6,342 \cdot t^2 \cdot 10^{-5}) \cdot 10^{-6}.$$

1.3 Коэффициент температуропроводности воздуха  $a$ , м<sup>2</sup>/с:

$$a = [18,55 + 0,1503 \cdot t + 7,892 \cdot t^2 \cdot 10^{-5}] \cdot 10^{-6}.$$

1.4 Критерий Прандтля  $Pr$ :

$$Pr = \frac{0,7117 - 1,938 \cdot t \cdot 10^{-3} + 6,072 \cdot t^2 \cdot 10^{-6}}{1 - 2,432 \cdot t \cdot 10^{-3} + 8,169 \cdot t^2 \cdot 10^{-6}}.$$

## Физические характеристики сухого воздуха

Физические свойства сухого воздуха  
 $(P_B = 760 \text{ мм рт. ст.} \approx 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па})$

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho, \text{кг/м}^3$ | $c_p, \text{кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$ | $\lambda \cdot 10^3, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$ | $\alpha \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$ | $\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$ | $\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$ | Pr    |
|---------------------|-----------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|-------|
| —50                 | 1,584                 | 1,013                                       | 2,04                                                     | 12,7                                     | 14,6                                       | 9,23                                  | 0,728 |
| —40                 | 1,515                 | 1,013                                       | 2,12                                                     | 13,8                                     | 15,2                                       | 10,04                                 | 0,728 |
| —30                 | 1,453                 | 1,013                                       | 2,20                                                     | 14,9                                     | 15,7                                       | 10,80                                 | 0,723 |
| —20                 | 1,395                 | 1,009                                       | 2,28                                                     | 16,2                                     | 16,2                                       | 11,61                                 | 0,716 |
| —10                 | 1,342                 | 1,009                                       | 2,36                                                     | 17,4                                     | 16,7                                       | 12,43                                 | 0,712 |
| 0                   | 1,293                 | 1,005                                       | 2,44                                                     | 18,8                                     | 17,2                                       | 13,28                                 | 0,707 |
| 10                  | 1,247                 | 1,005                                       | 2,51                                                     | 20,0                                     | 17,6                                       | 14,16                                 | 0,705 |
| 20                  | 1,205                 | 1,005                                       | 2,59                                                     | 21,4                                     | 18,1                                       | 15,06                                 | 0,703 |
| 30                  | 1,165                 | 1,005                                       | 2,67                                                     | 22,9                                     | 18,6                                       | 16,00                                 | 0,701 |
| 40                  | 1,128                 | 1,005                                       | 2,76                                                     | 24,3                                     | 19,1                                       | 16,96                                 | 0,699 |
| 50                  | 1,093                 | 1,005                                       | 2,83                                                     | 25,7                                     | 19,6                                       | 17,95                                 | 0,698 |
| 60                  | 1,060                 | 1,005                                       | 2,90                                                     | 27,2                                     | 20,1                                       | 18,97                                 | 0,696 |
| 70                  | 1,029                 | 1,009                                       | 2,96                                                     | 28,6                                     | 20,6                                       | 20,02                                 | 0,694 |
| 80                  | 1,000                 | 1,009                                       | 3,05                                                     | 30,2                                     | 21,1                                       | 21,09                                 | 0,692 |
| 90                  | 0,972                 | 1,009                                       | 3,13                                                     | 31,9                                     | 21,5                                       | 22,10                                 | 0,690 |
| 100                 | 0,946                 | 1,009                                       | 3,21                                                     | 33,6                                     | 21,9                                       | 23,13                                 | 0,688 |
| 120                 | 0,898                 | 1,009                                       | 3,34                                                     | 36,8                                     | 22,8                                       | 25,45                                 | 0,686 |
| 140                 | 0,854                 | 1,013                                       | 3,49                                                     | 40,3                                     | 23,7                                       | 27,80                                 | 0,684 |
| 160                 | 0,815                 | 1,017                                       | 3,64                                                     | 43,9                                     | 24,5                                       | 30,09                                 | 0,682 |
| 180                 | 0,779                 | 1,022                                       | 3,78                                                     | 47,5                                     | 25,3                                       | 32,49                                 | 0,681 |
| 200                 | 0,746                 | 1,026                                       | 3,93                                                     | 51,4                                     | 26,0                                       | 34,85                                 | 0,680 |
| 250                 | 0,674                 | 1,038                                       | 4,27                                                     | 61,0                                     | 27,4                                       | 40,61                                 | 0,677 |
| 300                 | 0,615                 | 1,047                                       | 4,60                                                     | 71,6                                     | 29,7                                       | 48,33                                 | 0,674 |
| 350                 | 0,566                 | 1,059                                       | 4,91                                                     | 81,9                                     | 31,4                                       | 55,46                                 | 0,676 |
| 400                 | 0,524                 | 1,068                                       | 5,21                                                     | 93,1                                     | 33,0                                       | 63,09                                 | 0,678 |
| 500                 | 0,456                 | 1,093                                       | 5,74                                                     | 115,3                                    | 36,2                                       | 79,38                                 | 0,687 |
| 600                 | 0,404                 | 1,114                                       | 6,22                                                     | 138,3                                    | 39,1                                       | 96,89                                 | 0,699 |
| 700                 | 0,362                 | 1,135                                       | 6,71                                                     | 163,4                                    | 41,8                                       | 115,4                                 | 0,706 |
| 800                 | 0,329                 | 1,156                                       | 7,18                                                     | 188,8                                    | 44,3                                       | 134,8                                 | 0,713 |
| 900                 | 0,301                 | 1,172                                       | 7,63                                                     | 216,2                                    | 46,7                                       | 155,1                                 | 0,717 |
| 1000                | 0,277                 | 1,185                                       | 8,07                                                     | 245,9                                    | 49,0                                       | 177,1                                 | 0,719 |
| 1100                | 0,257                 | 1,197                                       | 8,50                                                     | 276,2                                    | 51,2                                       | 199,3                                 | 0,722 |

### Физические воды на линии насыщения

| Температура<br>$t_s, ^\circ\text{C}$ | Теплоемкость<br>$C_p, \text{КДж/кг } ^\circ\text{C}$ | Теплопроводность<br>$\lambda, \text{Вт/м } ^\circ\text{C}$ | Вязкость<br>$\mu, \text{м}^2/\text{с}$ | Кинематическая<br>вязкость<br>$\nu, \text{КДж/кг}$ | К-т температурного<br>расширения<br>$\beta, 1/\text{K}$ | Критерий<br>Прандтля<br>$Pr$ |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------|
| 0                                    | 4,212                                                | 0,560                                                      | 13,2                                   | 1,789                                              | -0,63                                                   | 13,5                         |
| 10                                   | 4,191                                                | 0,580                                                      | 13,8                                   | 1,306                                              | 0,70                                                    | 9,45                         |
| 20                                   | 4,183                                                | 0,597                                                      | 14,3                                   | 1,006                                              | 1,82                                                    | 7,03                         |
| 30                                   | 4,174                                                | 0,612                                                      | 14,7                                   | 0,805                                              | 3,21                                                    | 5,45                         |
| 40                                   | 4,174                                                | 0,627                                                      | 15,1                                   | 0,659                                              | 3,87                                                    | 4,36                         |
| 50                                   | 4,174                                                | 0,640                                                      | 15,5                                   | 0,556                                              | 4,49                                                    | 3,59                         |
| 60                                   | 4,179                                                | 0,650                                                      | 15,8                                   | 0,478                                              | 5,11                                                    | 3,03                         |
| 70                                   | 4,187                                                | 0,662                                                      | 16,1                                   | 0,415                                              | 5,70                                                    | 2,58                         |
| 80                                   | 4,195                                                | 0,669                                                      | 16,3                                   | 0,365                                              | 6,32                                                    | 2,23                         |
| 90                                   | 4,208                                                | 0,676                                                      | 16,5                                   | 0,326                                              | 6,95                                                    | 1,97                         |
| 100                                  | 4,220                                                | 0,684                                                      | 16,8                                   | 0,295                                              | 7,52                                                    | 1,75                         |
| 110                                  | 4,233                                                | 0,685                                                      | 17,0                                   | 0,272                                              | 8,08                                                    | 1,60                         |
| 120                                  | 4,250                                                | 0,686                                                      | 17,1                                   | 0,252                                              | 8,64                                                    | 1,47                         |
| 130                                  | 4,266                                                | 0,686                                                      | 17,2                                   | 0,233                                              | 9,19                                                    | 1,35                         |
| 140                                  | 4,287                                                | 0,685                                                      | 17,2                                   | 0,217                                              | 9,72                                                    | 1,26                         |
| 150                                  | 4,313                                                | 0,684                                                      | 17,3                                   | 0,203                                              | 10,3                                                    | 1,17                         |
| 160                                  | 4,346                                                | 0,681                                                      | 17,3                                   | 0,191                                              | 10,7                                                    | 1,10                         |
| 170                                  | 4,380                                                | 0,676                                                      | 17,2                                   | 0,181                                              | 11,3                                                    | 1,05                         |
| 180                                  | 4,417                                                | 0,672                                                      | 17,2                                   | 0,173                                              | 11,9                                                    | 1,03                         |
| 190                                  | 4,459                                                | 0,664                                                      | 17,2                                   | 0,165                                              | 12,6                                                    | 0,965                        |

#### 1. Перечень основной литературы:

1. Макеев, М. Ф. Архитектурно-строительная теплотехника : учебное пособие / М. Ф. Макеев, Е. Д. Мельников, М. В. Агеенко. — Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2021. — 79 с.
2. Титова, Л. М. Теоретические основы энергосберегающих технологий : учебное пособие для вузов / Л. М. Титова, А. Х. Нугманов, И. Ю. Алексанян. — 2-е изд., испр. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 216 с..
3. Шибеко, А. С. Строительная теплофизика и теплотехнические измерения : учебное пособие / А. С. Шибеко, М. А. Рутковский. — Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. — 288 с.

## **2 Перечень дополнительной литературы:**

1. Осипова, Н. Н. Тепловая физика. Теплотехника : учебное пособие по проведению лабораторного практикума / Н. Н. Осипова, С. Г. Культияев, И. М. Бычкова. — Саратов : Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, ЭБС АСВ, 2020. — 120 с
2. Вакулин, А. А. Теплофизика и теоретическая теплотехника : учебное пособие / А. А. Вакулин. — Тюмень : ТюмГУ, 2019. — 196 с.

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**к практическим занятиям**

**по дисциплине «Методы термодинамической оценки эффективности  
принятых решений»**

**по направлению 08.04.01 «Строительство»**

**направленность (профиль) «Теплогазоснабжение населенных мест и  
предприятий»**

## Содержание

### Практическое занятие № 1

СОСТАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВОГО (МАТЕРИАЛЬНОГО) БАЛАНСОВ  
ТЕПЛООБМЕННИКОВ СМЕСИТЕЛЬНОГО И ПОВЕРХНОСТНОГО ТИПА

### Практическое занятие № 2

РАСЧЕТ КПД ЦИКЛА ТЕПЛОВОЙ МАШИНЫ И СРАВНЕНИЕ ЕГО С  
КПД ЦИКЛА КАРНО

### Практическое занятие № 3

РАСЧЕТ ВНУТРЕННЕГО ОТНОСИТЕЛЬНОГО КПД ТЕПЛОВОЙ  
МАШИНЫ

### Практическое занятие № 4

РАСЧЕТ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО КПД ТЕПЛОВОЙ МАШИНЫ

### Практическое занятие № 5

ПОСТРОЕНИЕ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОЙ ДИАГРАММЫ ПАРОСИЛОВОЙ  
УСТАНОВКИ

### Практическое занятие № 6

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ БИНАРНОГО ЦИКЛА

## Введение

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Методы термодинамической оценки эффективности принятых решений» содержат краткие теоретические сведения о расчетах систем, рекомендуемую литературу и задачи для закрепления теоретических знаний практическими примерами. Предназначены для магистрантов, обучающихся 08.04.01 – «Строительство», магистерской программе «Теплоснабжение населенных мест и предприятий»

**Практическое занятие № 1****СОСТАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВОГО (МАТЕРИАЛЬНОГО) БАЛАНСОВ  
ТЕПЛООБМЕННИКОВ СМЕСИТЕЛЬНОГО И ПОВЕРХНОСТНОГО  
ТИПА****1.1 Теоретическая часть****1.1.1 Виды теплообменных аппаратов**

Теплообменные аппараты (ТА) – это устройства для передачи тепла от одного теплоносителя к другому. По принципу работы они делятся на рекуперативные, регенеративные и смешительные.

В основном применяются рекуперативные теплообменные аппараты, в которых передача тепла происходит через разделительную стенку. Конструктивно они выполняются в виде аппаратов с трубчатой (или реже с пластинчатой) поверхностью нагрева.

В регенеративном теплообменном аппарате передача тепла осуществляется через промежуточное аккумулирующее устройство (пластины, набивка и т. д.), которое попеременно смывается обоими теплоносителями. Возможны так же конструкции, в которых вращающееся аккумулирующее устройство попеременно вносится в поток первого и второго теплоносителей (например, вращающийся воздушнонагреватель в теплогенераторах и т. д.).

В смешительных теплообменных аппаратах передача тепла осуществляется при непосредственном контакте (смешении) теплоносителей.

В зависимости от взаимного направления движения теплоносителей различают теплообменные аппараты прямоточные, противоточные, с перекрестным током и со смешанным током.

Характеристиками теплообменного аппарата являются следующие величины:

$Q$  – тепловая производительность аппарата, количество тепла, передаваемое в единицу времени, Вт;

$F$  – поверхность теплообмена. Поверхность твердой стенки или поверхность раздела теплоносителей, через которую передается тепло,  $m^2$ ;

$\Delta t_{\text{ср}}$  – средняя разность температур теплоносителей, К;

$K_{\text{ср}}$  – средний коэффициент теплопередачи по всей поверхности нагрева теплообменного аппарата, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

### 1.1.2 Методика расчета теплообменных аппаратов

Расчет теплообменных аппаратов производится по двум основным уравнениям:

#### 1. Уравнению теплопередачи

$$Q = K_{\text{ср}} F \cdot \Delta t_{\text{ср}}; \quad (1.1)$$

#### 2. Уравнению теплового баланса

$$Q = m_1 (h'_1 - h''_1) = m_2 (h''_2 - h'_2) \text{ или } Q = m_1 C_{p1} (t'_1 - t''_1) = m_2 C_{p2} (t''_2 - t'_2), \quad (1.2)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – массовый расход первого и второго теплоносителя, кг/с;

$t'$  и  $h'$  – температура и энтальпия теплоносителя на входе в аппарат, К и Дж/кг;

$t''$  и  $h''$  – температура и энтальпия теплоносителя на выходе из аппарата, К и Дж/кг;

$t_1$  и  $h_1$  – температура и энтальпия первого теплоносителя;

$t_2$  и  $h_2$  – температура и энтальпия второго теплоносителя;

$C_{p1}$  и  $C_{p2}$  – средняя теплоемкость при постоянном давлении первого и второго теплоносителя, Дж/(кг·К).

Величина  $W = mC_p$ , Вт/К, называется водяным эквивалентом теплоносителя.

Заменяя в уравнении баланса, имеем:

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{t''_2 - t'_2}{t'_1 - t''_1}. \quad (1.3)$$

Решая совместно уравнения (1.2) и (1.3), можно найти три неизвестных параметра теплообменного аппарата, при заданных или принятых остальных.

### 1.1.3 Определение величин, входящих в расчетные уравнения

Средняя разность температур теплоносителей определяется из формулы среднелогарифмической разности:

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{max}} - \Delta t_{\text{min}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{max}}}{\Delta t_{\text{min}}}}, \quad (1.4)$$

где  $\Delta t_{\text{max}}$ ,  $\Delta t_{\text{min}}$  – максимальная и минимальная разность теплоносителей на концах теплообменника, которые определяются в зависимости от конкретной схемы работы теплообменника (рисунок 1.1).

Если  $\Delta t_{\text{max}} < 1,7\Delta t_{\text{min}}$ , то  $\Delta t_{\text{cp}}$  можно определять по формуле среднеарифметической разности:

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{max}} + \Delta t_{\text{min}}}{2}. \quad (1.5)$$

Анализ уравнения (1.4) и схем включения ТА показывают, что схема включения по противотоку имеет следующие преимущества:

– при прочих равных условиях (расход теплоносителей, температуры и т. д.)  $\Delta t_{\text{cp}}$  при включении ТА по противотоку на 30 – 40 % выше, чем при включении ТА по прямотоку, что значительно повышает экономическую и технологическую эффективность ТА без дополнительных затрат;

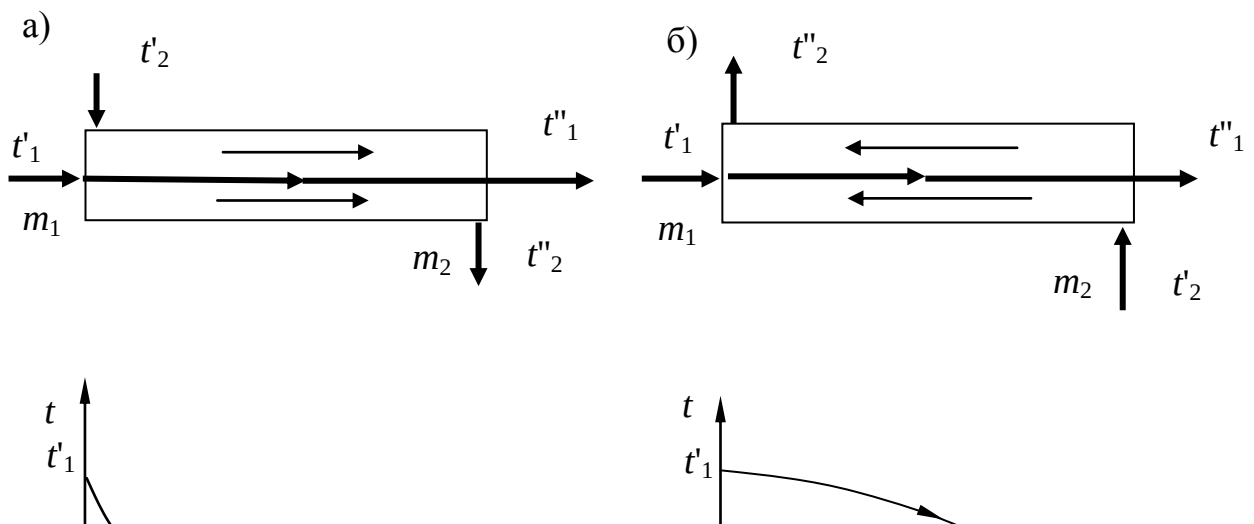


Рисунок 1.1 – Схемы включения и график изменения температур теплоносителей вдоль поверхности теплообменного аппарата:

- а) – схема включения ТА по прямотоку;
- б) – схема включения ТА по противотоку.

– при включении ТА по противотоку можно значительно повысить температуру подогрева второго теплоносителя (вплоть до  $t_2'' > t_1''$ ) и понизить температуру первого теплоносителя (вплоть до  $t_1'' < t_2''$ ), что позволяет более полно использовать тепловой потенциал обоих теплоносителей и повысить технологическую эффективность ТА.

Поверхность теплообмена и коэффициент теплопередачи в случае трубчатого теплообменника с достаточной степенью точности могут быть определены по формулам теплопередачи для плоской поверхности, т. к. толщина стенки труб мала в сравнении с диаметром, а коэффициент теплопроводности для металлических труб достаточно большой. При этом условии:

$$K_{\text{ср}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1\text{ср}}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{2\text{ср}}}}, \quad (1.6)$$

где  $\alpha_{1\text{ср}}$  и  $\alpha_{2\text{ср}}$  – средние коэффициенты теплоотдачи для первого и второго теплоносителя, рассчитываемые для средних температур каждого из теплоносителей в теплообменнике, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\delta_{\text{ст}}$  и  $\lambda_{\text{ст}}$  – толщина стенки и коэффициент теплопроводности материала труб, соответственно, м и Вт/(м·К);

$\delta_3$  и  $\lambda_3$  – толщина и коэффициент теплопроводности загрязнений на поверхности труб теплообмена (учитываются при их наличии), м и Вт/(м·К).

При расчете теплообменников по расчетным уравнениям и могут быть определены только три неизвестные величины, остальные должны быть заданы или определены иным путем.

Расчет теплообменных аппаратов бывает двух типов:

1. Конструкторский – когда определяются основные размеры аппарата при заданных параметрах и тепловой производительности.
2. Поверочный – когда определяют тепловую производительность и параметры по известным размерам теплообменного аппарата.

#### 1.1.4 Расчет теплообменных аппаратов смешительного типа

Расчет камеры орошения (КО) ЦК принято выполнять по методу НИИ Сантехники, предложенному Е.Е. Карписом на основе результатов экспериментальных исследований типовых КО ЦК.

При этом используются следующие характерные температуры (рисунок 1.2) и коэффициенты эффективности работы КО;

- $t_{c1}$  и  $t_{c2}$  – температура воздуха по сухому термометру до и после КО;
- $t_{m1}$  и  $t_{m2}$  – тоже по мокрому термометру;

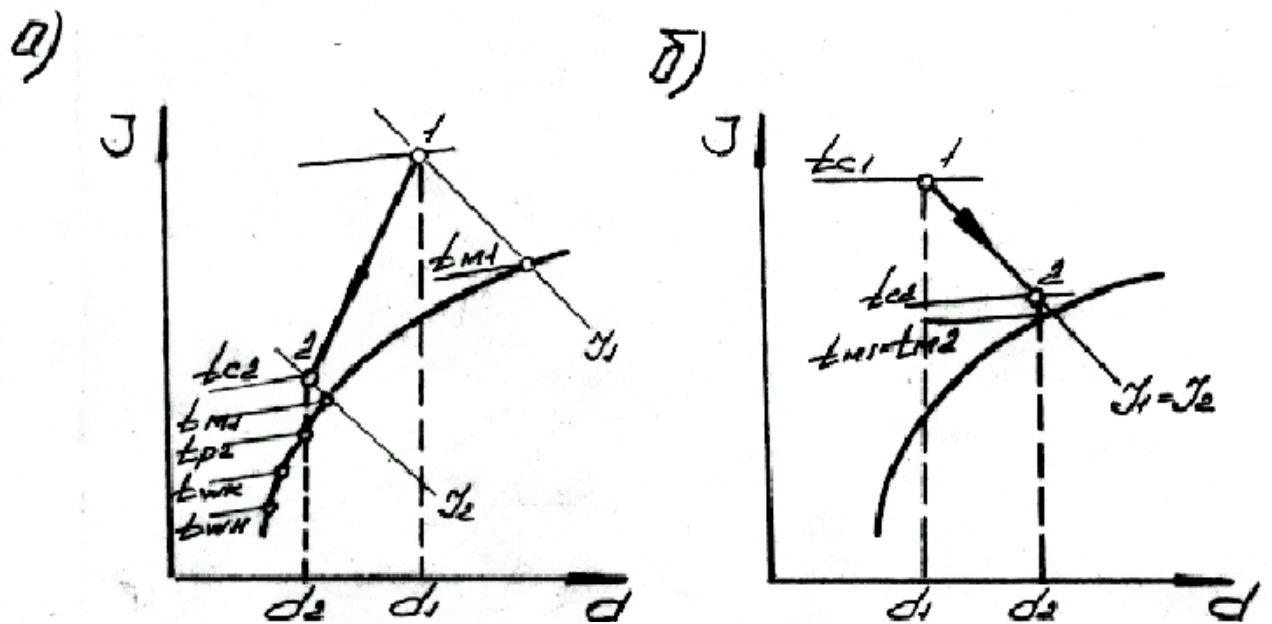


Рисунок 1.2 - Характеристика основных процессов в камере орошения

- а) политропный процесс охлаждения и осушения воздуха в КО;  
 б) адиабатный процесс охлаждения и увлажнения воздуха в КО.

–  $I_1$  и  $I_2$  – теплосодержание воздуха до и после КО, кДж/кг;

–  $t_{wн}$  и  $t_{wk}$  – начальная и конечная температуры воды на входе и выходе из КО;

– универсальный коэффициент эффективности полного теплообмена в КО (пригодный для всех видов процессов)

$$E' = 1 - \frac{t_{c2} - t_{m2}}{t_{c1} - t_{m1}}, \quad (1.7)$$

– коэффициент эффективности полного теплообмена в КО для политропного процесса обработки воздуха

$$E_{II} = 1 - \frac{t_{m2} - t_{wk}}{t_{m1} - t_{wн}}, \quad (1.8)$$

– коэффициент эффективности полного теплообмена в КО для адиабатного процесса обработки воздуха

$$E_A = 1 - \frac{t_{c2} - t_{m2}}{t_{c1} - t_{m1}}, \quad (1.9)$$

полученный из условия, что при адиабатном увлажнении воды в КО  $t_{m1} + t_{m2} + t_{wh} + t_{wk}$  и  $I_1 = I_2$

Из этого следует, что для адиабатного процесса увлажнения  $E_A = E'$ .

Кроме приведенных выше коэффициентов эффективности, для расчета КО используется уравнение теплового баланса КО

$$I_1 - I_2 = 4,187 \cdot B \cdot (t_{wk} - t_{wh}), \quad (1.10)$$

где  $B = \frac{W_{ко}}{L_{ко}}$  – коэффициент орошения, кг/кг;

$W_{ко}$  – расход воды в КО через форсунки, кг/с;

$L_{ко}$  – расход воздуха через КО, кг/с.

Расход воды через форсунки в КО определяется из уравнения

$$W_{ко} = g_{\phi} \cdot n_{\phi} \cdot F_{кв} \cdot Z_p, \quad (1.11)$$

где  $g_{\phi}$  – расход воды через одну форсунку, кг/с;

$n_{\phi}$  – плотность расположения форсунок в одном ряду поперечного сечения КО, шт./м<sup>2</sup>;

$F_{ко}$  – поперечное сечение КО, м<sup>2</sup>;

$Z_p$  – число поперечных рядов форсунок.

Расход воды через одну центробежную тангенциальную форсунку стандартной конструкции определяется из эмпирического уравнения

$$g_{\phi} = 0,00107 \cdot P_{\phi}^{0,48} \cdot d_o^{1,38}, \quad (1.12)$$

где  $P_{\phi}$  – избыточное давление воды перед форсункой, кг/см<sup>2</sup>;

$d_o$  – диаметр выходного отверстия форсунки, мм.

Значение коэффициента эффективности можно вычислить по эмпирическим уравнениям, полученным в НИИ Сантехники по данным экспериментальных исследований типовых КО ЦК, в зависимости от технических характеристик КО

При  $1,5 \leq U\rho \leq 3,0$  кг/(м<sup>2</sup>с), и  $n_\phi = 13 \div 39$  шт./м<sup>2</sup>

$$E_n \cdot (E', E_A) = A_1 \cdot K_n \cdot (U\rho)^{m_1} \cdot B^{l_1}, \quad (1.13)$$

При  $U\rho > 3,0$  кг/(м<sup>2</sup>с) и  $n_\phi = 18 \div 24$  шт./м<sup>2</sup>

$$E_n \cdot (E', E_A) = A_2 \cdot B^{l_2}, \quad (1.14)$$

В приведенных уравнениях:

–  $A_1, m_1, l_1$  и  $A_2, l_2$  – эмпирические коэффициенты, определяемые в зависимости от технических характеристик КО, составленной по экспериментальным данным НИИ Сантехники;

–  $K_n$  – поправочный коэффициент на плотность расположения форсунок в поперечном сечении КО, определяемый для однорядной КО ( $Z_p = 1$ ) из уравнения

$$K_n = 2,3 \cdot n_\phi^{-0,324}, \quad (1.15)$$

и для двухрядной КО ( $Z_p = 2$ ) из уравнения

$$K_n = 1,48 \cdot n_\phi^{-0,156}, \quad (1.16)$$

$U\rho$  – весовая скорость воздуха в поперечном сечении КО, кг/(м<sup>2</sup>с).

## 1.2 Задачи для самостоятельного решения

**Задача 1.1.** Определить температурный напор рекуперативного теплообменного аппарата при прямоточной и противоточной схемах движения теплоносителей (при движении греющей воды во внутренней трубе, а нагреваемой – по кольцевому каналу между трубами), если расход греющей воды  $G_1=1,5$  кг/с, расход нагреваемой воды  $G_2=4,5$  кг/с, начальные температуры теплоносителей  $t_{ж1}=130$  °С,  $t_{ж2}=5$  °С, и конечная  $t_{ж2}=35$  °С.

## 1.3 Вопросы к практическому занятию

1. Записать основные уравнения теплового и материального балансов теплообменных аппаратов.

2. Охарактеризовать коэффициенты эффективности полного теплообмена в КО.



**Практическое занятие № 2**  
**РАСЧЕТ КПД ЦИКЛА ТЕПЛОВОЙ МАШИНЫ**  
**И СРАВНЕНИЕ ЕГО С КПД ЦИКЛА КАРНО**

**2.1 Теоретическая часть**

**Цикл паросиловой установки**

**2.1.1 Идеальный цикл паросиловой установки**

Особенностью циклов паросиловых установок (ПСУ) (в отличие от ДВС и ТГУ), является то, что продукты сгорания топлива в них играют роль промежуточного теплоносителя, а рабочим телом служит пар (главным образом водяной пар).

Использование пара в качестве рабочего тела имеет ряд особенностей. Так, например, становится технически возможным применение цикла Карно для пара, так как изотермический подвод или отвод тепла в области влажного пара происходит одновременно, при постоянных значениях давления.

Однако, цикл Карно, осуществляемый в области влажного пара, (рисунок 2.1) будет иметь следующие недостатки:

- в процессах (1–2) и (3–4) производится адиабатическое расширение и адиабатическое сжатие влажного пара, при осуществлении которых в реальных поршневых (или турбинных) машинах возникают большие потери и имеет место износ рабочих органов. Последнее объясняется наличием в рабочем теле больших количеств несжимаемой жидкости, которая имеет высокую плотность и движется со значительной скоростью;
- температурные пределы применения этого цикла ограничены областью влажного пара, так как процесс сжатия (3–4) может быть осуществлен только до линии насыщения, т. е. всегда  $T_1 < T_k$ .

Изложенные причины приводят к существенному снижению КПД идеального цикла ПСУ, вследствие наличия больших потерь и ограничивают возможность повышения КПД этого цикла за счет расширения температурного интервала от  $T_1$  до  $T_2$ .

**2.1.2 Реальный цикл паросиловой установки – цикл Ренкина**

Ввиду низкой практической эффективности идеального цикла ПСУ в промышленной теплоэнергетике широко используется реальный цикл ПСУ, предложенный Ренкиным.

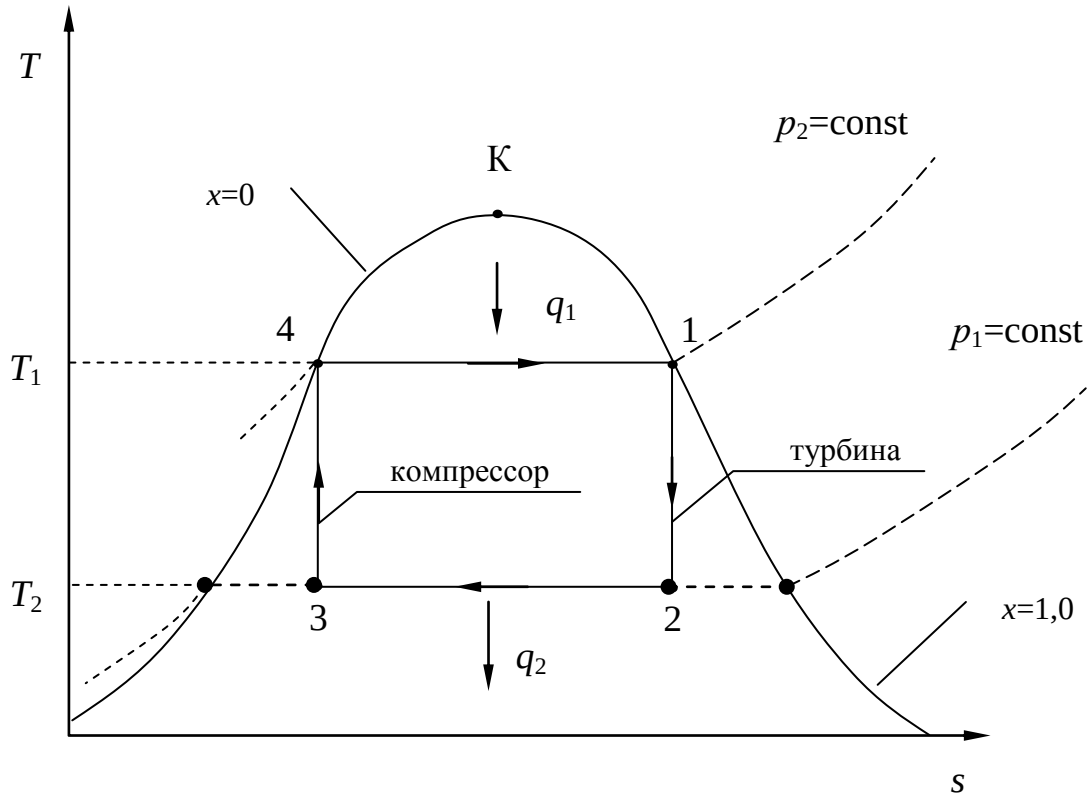


Рисунок 2.1 – Цикл Карно в области влажного пара в диаграмме  $T-s$

Для устранения недостатков идеального цикла в цикле Ренкина используются следующие технологические приемы:

- перегрев пара при постоянном давлении  $p_1$  с целью увеличения средней температуры подвода тепла и осуществления процесса адиабатного расширения, в основном, в области перегретого (сухого) пара, что предотвращает потери, связанные с расширением двухфазной смеси;

- полная конденсация пара в процессе отвода тепла с целью замены процесса сжатия двухфазной смеси сжатием жидкости в насосе от давления  $p_2$  до давления  $p_1$ , что требует значительно меньшего расхода работы и осуществляется с гораздо меньшими потерями.

На рисунке 2.2 приведена принципиальная схема ПСУ, работающей по циклу Ренкина, и дан вид цикла в диаграмме  $T-s$ .

Вода поступает в парогенератор (ПГ), где при постоянном давлении сначала нагревается до температуры кипения (процесс 4–5), а затем испаряется, превращаясь в сухой насыщенный пар (процесс 5–6).

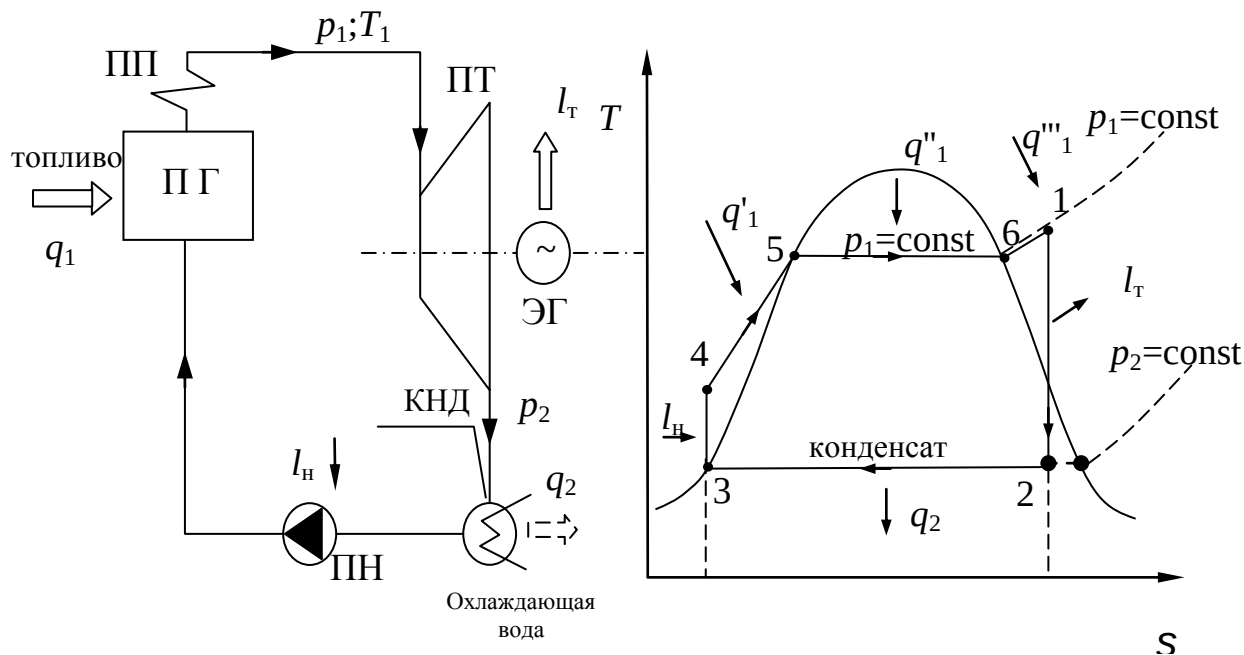


Рисунок 2.2 – Схема и цикл паросиловой установки Ренкина

Насыщенный водяной пар перегревается в пароперегревателе (ПП) (процесс (6–1)). С давлением  $p_1$  и температурой  $T_1$  он поступает в паровую турбину (ПТ), где в процессе адиабатического расширения от давления  $p_1$  до давления  $p_2$  (процесс 1–2) совершает полезную работу, которая преобразуется в электрическую энергию в электрогенераторе (ЭГ).

Отработанный пар с давлением  $p_2$  поступает в конденсатор, где охлаждается и конденсируется при  $p_2 = \text{const}$  (процесс 2–3). Давление конденсата  $p_2$  поднимается до давления котловой воды  $p_1$  питательным насосом (ПН) (процесс 3–4), после чего она подается в парогенератор (ПГ).

Для нагревания и испарения воды и перегрева пара в парогенератор подводится тепло  $q_1$ , которое получается за счет сжигания органического

топлива или в результате тепловыделения от ядерных реакций расщепления тяжелых трансурановых элементов в атомном реакторе.

Конденсатор охлаждается водой, которая отводит в окружающую среду тепло  $q_2$ . В турбине совершается полезная работа ( $l_T$ ), которая на рабочем валу электрогенератора (ЭГ) превращается в электрическую энергию. Для привода питательного насоса затрачивается энергия  $l_H$ , подводимая извне.

Термический КПД цикла Ренкина определяют из выражения:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{l_T - l_H}{q_1}. \quad (2.1)$$

Так как процессы подвода и отвода тепла происходят при  $p=\text{const}$ , а работа расширения в турбине и сжатия в насосе определяются по разности энтальпий, то:

$$\eta_t = \frac{(h_1 - h_4) - (h_2 - h_3)}{h_1 - h_4} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_4)}. \quad (2.2)$$

Если пренебречь работой  $l_H$  и принять  $h_4 \approx h_3$ , то приближенно КПД цикла Ренкина будет равен:

$$\eta_t \cong \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_4)}. \quad (2.3)$$

### 2.1.3 Пути повышения экономичности циклов ПСУ

**1. Увеличение начального давления и температуры пара** перед турбиной приводит к увеличению средней температуры подвода тепла и увеличивает полезный теплоперепад  $(h_1 - h_2)$  в турбине. Все это увеличивает КПД цикла.

Пределы увеличения этих параметров ( $p_1$  и  $t_1$ ) в настоящее время ограничены величиной давления 240 бар и температуры 560–570 °С по условиям жаропрочности металла труб парогенератора и пароперегревателя.

**2. Уменьшение конечного давления пара после турбины** увеличивает теплоперепад ( $h_1 - h_2$ ) и КПД цикла в целом. Предельное значение давления  $p_2 = 0,03\text{--}0,04$  кПа, что связано с условиями охлаждения и отвода тепла в окружающую среду, с температурой и расходом охлаждающей воды.

**3. Применение вторичного перегрева пара.** Применение высоких начальных параметров пара, особенно увеличение давления, сдвигает конечную точку (2) процесса расширения пара в турбине, в область высокой влажности пара (величина  $x_2$  при этом уменьшается).

Повышение влажности пара при расширении вредно действует на последние ступени турбины (эрозионный износ, снижение КПД турбины и т. д.) и ограничивается величиной 13–14 % ( $x_2=0,86\text{--}87$ ).

Применение вторичного перегрева пара позволяет уменьшить влажность в конце процесса расширения (рисунок 2.3).

При этом перегретый пар из парогенератора, поступивший на турбину с параметрами  $p_1$  и  $T_1$ , расширяется адиабатически до промежуточного давления,  $p_2'$ , процесс (1-2'), после чего направляется в промежуточный (или вторичный) пароперегреватель, где повторно перегревается до температуры  $T_3$ , процесс (2'-3) при давлении  $p_2$  и возвращается в турбину. Конечная температура перегрева пара в обоих пароперегревателях устанавливается по условию жаропрочности металла труб пароперегревателей и равна  $T_{\text{пп}}=T_1+T_s=T_{\text{max}}$ . В турбине этот пар расширяется до конечного давления  $p_4$  и идет в конденсатор.

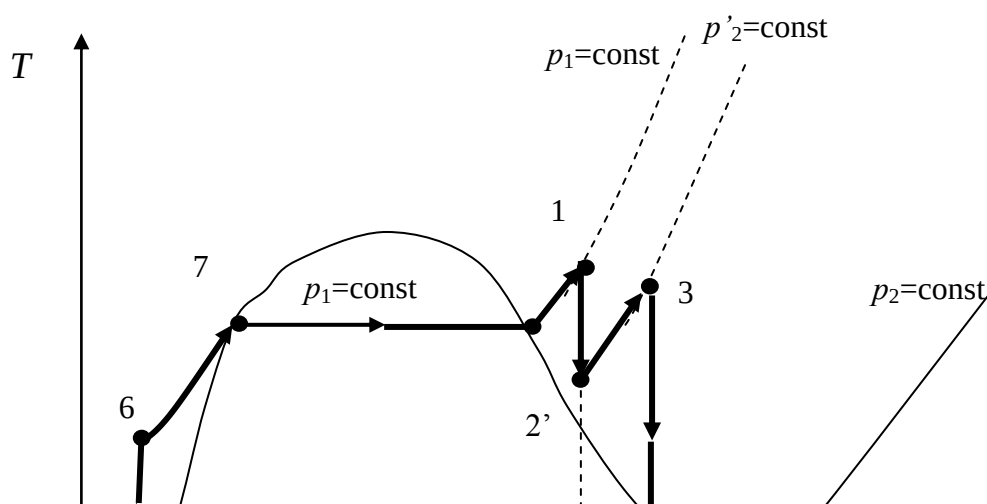


Рисунок 2.3 – Цикл ПСУ с промежуточным перегревом пара в диаграмме  $T-s$

Конечная влажность после расширения здесь уменьшается ( $x_4 > x_2$ ). При этом если средняя температура подвода тепла при вторичном перегреве пара ( $T_{1 \text{ ср в. п.}}$ ) будет выше, чем в основной части цикла, то общий КПД цикла Ренкина увеличится, что даст дополнительно и экономический эффект.

**4. Использование комбинированной выработки тепловой и электрической энергии.** КПД цикла Ренкина невысок и при самых лучших условиях равен 0,4–0,45 для теоретического цикла, а с учетом потерь в реальных установках равен 0,3–0,35. Основная потеря в цикле – это  $q_2$ , т. к. давление отработанного пара турбин  $p_2 = 0,03–0,04$  бар и температура его  $t_2$  (25–30 °С) очень малы, что делает невозможным полезное использование тепла этого пара после турбины.

Если увеличить давление  $p_2$  до 1,5–10 бар (цикл 1-2'-3'-4'-5-6-1), то КПД ПСУ снизится, но тепло отработанного пара  $q'_2$  может быть полезно использовано для производственных и бытовых нужд (рисунок 2.4).

Эффективность цикла при этом оценивается по комплексному итогу использования тепла подводимого в парогенераторе и определяется коэффициентом теплоиспользования:

$$\eta_{ит} = \frac{l'_T + q'_2}{q_1} . \quad (2.4)$$

Для реальных установок  $\eta_{ит} = 0,8-0,85$ . Комбинированная выработка на одной ПСУ электрической энергии и тепловой энергии для бытовых и производственных нужд называется теплофикацией, а ПСУ, в которых осуществляется такая комбинированная выработка тепловой и электрической энергии называются теплоэлектроцентралями (ТЭЦ).

**5. Использование регенерации тепла в ПСУ.** Регенерацией тепла в ПСУ называется использование тепла частично отработанного пара турбины для подогрева питательной воды после ПН перед ПГ. Это позволяет снизить расход тепла на подогрев питательной воды в ПГ (уменьшить  $q_1$ ), за счет использования тепла частично отработанного пара ПТ. Регенерацию тепла в ПСУ называют также «внутренней теплофикацией».

На рисунке 2.5 показан цикл ПСУ с условной идеальной регенерацией тепла.

После адиабатного расширения пара в ПТ (1-2') процесс расширения идет по политропе 2'-2'' с отводом тепла  $q_p$ , которое направляется на подогрев питательной воды после ПН перед ПГ. Хотя при расширении пара с отводом тепла работа ПТ уменьшается по сравнению с адиабатным расширением, общее значение КПД ПСУ в цикле с регенерацией тепла будет выше, что видно из уравнения:

$$\eta_p = 1 - \frac{q_2 - q_p}{q_1 - q_p}. \quad (2.5)$$

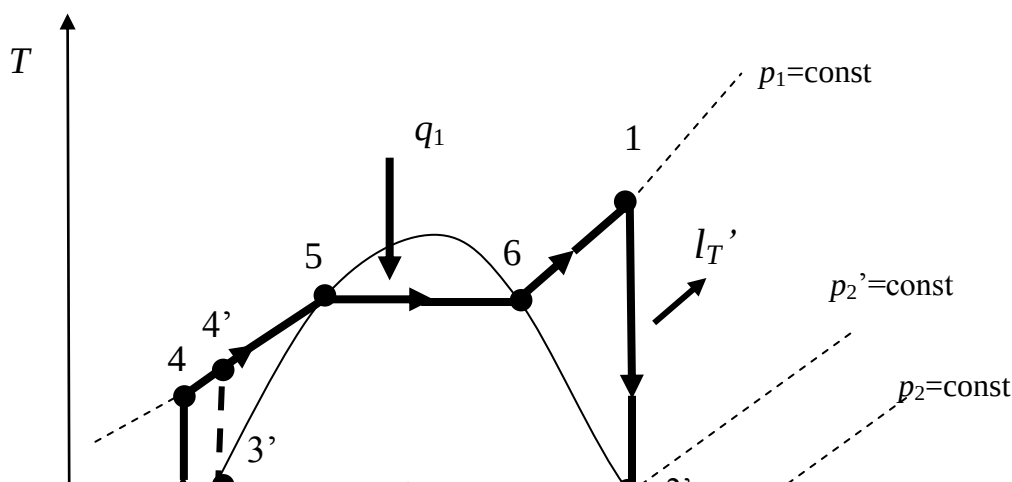
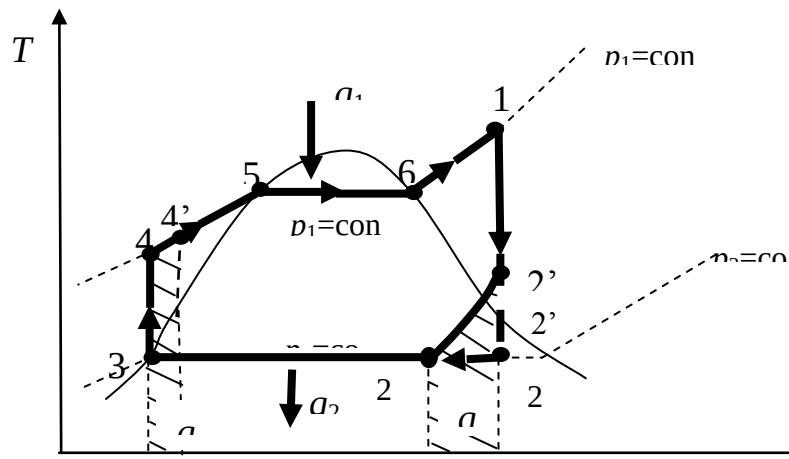


Рисунок 2.4 – Цикл ПСУ с теплофикацией в диаграмме  $T-s$ 

На практике непрерывный отвод тепла при расширении пара в турбине осуществить невозможно и подогрев питательной воды осуществляется за счет отбора части пара из потока между ступенями расширения в турбине в нескольких, последовательно включенных, подогревателях. При этом, чем выше температура подогрева питательной воды в очередном подогревателе, тем выше принимается давление, отбираемого из ПТ пара. Это несколько снижает эффективность регенерации, но все же применение развитой регенерации тепла по описанной схеме может повысить КПД ПСУ на 10–12 %.

Рисунок 2.5 – Цикл ПСУ с идеальной регенерацией тепла в диаграмме  $T-s$ 

### Циклы холодильных машин

Работа холодильных машин (ХМ) основана на применении обратного цикла. Цель работы ХМ состоит в получении «искусственного холода», т. е. получение и поддержание температуры ниже температуры окружающей

среды для заданной массы вещества. ХМ используются в различных отраслях промышленности (пищевая, химическая, нефтепереработка, кондиционирование воздуха и т. д.) и в быту (бытовые холодильники, кондиционеры и т. д.).

Рабочее тело, применяемое в обратных циклах ХМ, называется холодильным агентом; количество тепла отводимое от охлаждаемой массы вещества называется холодопроизводительностью; охлаждаемый объем, огражденный теплоизолирующими поверхностями называется холодильной камерой (ХК). Совокупность ХМ и ХК, соединенных соответствующими трубопроводами, называют холодильником.

В зависимости от вещества, используемого как холодильный агент, все ХМ делятся на 2 группы:

- газовые ХМ, в которых холодильный агент – газ;
- парокomppressorные ХМ, в которых холодильный агент – пар вещества, кипящего при низких температурах.

#### 2.1.4 Цикл газовой холодильной машины

Применение цикла Карно затрудняется сложностью осуществления **изотермического** подвода и отвода тепла.

В реальных аппаратах теплообмен происходит при **постоянном давлении** движущихся сред, разделенных поверхностью теплообмена. Поэтому, цикл газовой холодильной машины (ГХМ) состоит из двух адиабат и двух изобар. В качестве холодильного агента в этих машинах используют газ (воздух, углекислота, инертные газы и др.).

Схема и цикл ГХМ в диаграмме  $T-s$  приведены на рисунке 2.6.

Последовательность процессов в цикле ГХМ.

2-1 – адиабатное сжатие в компрессоре (КМ) от давления  $p_1$  до  $p_2$ , затрачивается работа  $l_k$ ;

2-3 – изобарное охлаждение сжатого газа в теплообменнике окружающей среды (ТО ОКС) при  $p_2 = \text{const}$  с отводом тепла  $q_1$  в окружающую среду;

3-4 – адиабатное расширение газа в детандере (ДТ) от  $p_2$  до  $p_1$  с совершением полезной работы  $l_d$ ;

4-1 – изобарный подогрев газа в теплообменнике при  $p_1 = \text{const}$  (ТО ХК) с отводом тепла  $q_2$  из холодильной камеры (ХК).

Затраченная работа равна  $l = l_k - l_d = q_1 - q_2$ , где  $q_2$  – удельная холодопроизводительность.

Холодильный коэффициент ГХМ равен:

$$\varepsilon_r = \frac{q_2}{l} = \frac{q_2}{q_1 - q_2}. \quad (2.6)$$

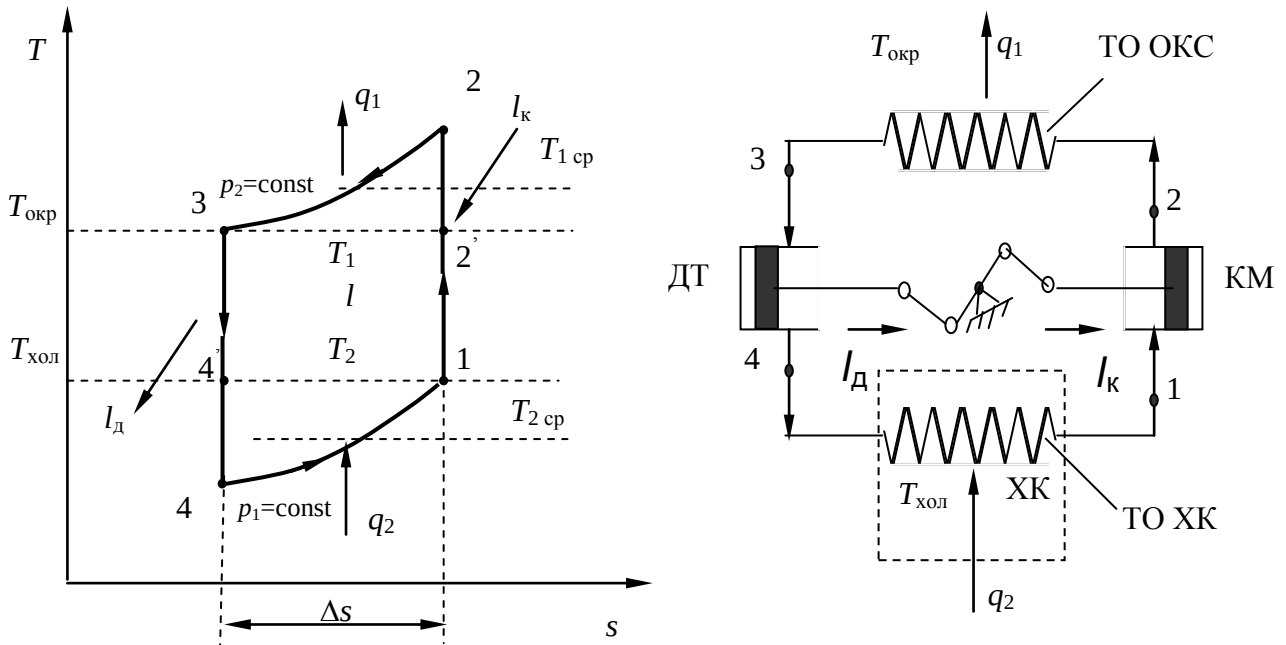


Рисунок 2.6– Схема и цикл газовой холодильной машины в диаграмме  $T$ - $s$

Если принять  $q_1 = T_{1cp} \cdot \Delta s$  и  $q_2 = T_{2cp} \cdot \Delta s$ , то:

$$\varepsilon_r = \frac{T_{2cp}}{T_{1cp} - T_{2cp}}. \quad (2.7)$$

Так как всегда  $T_{1cp} > T_{окр} = T_1$  и  $T_{2cp} < T_{хол} = T_2$ , то:

$$(2.8)$$

$$\varepsilon_r = \frac{T_{2cp}}{T_{1cp} - T_{2cp}} < \varepsilon_k = \frac{T_2}{T_1 - T_2},$$

где  $\varepsilon_k$  – холодильный коэффициент обратного цикла Карно 1-2'-3-4'-1, осуществленного при том же минимальном перепаде температур  $T_{окр}$  и  $T_{хол}$ , что и цикл ГХМ;

$T_{1cp}$ ,  $T_{2cp}$  – условная среднеинтегральная температура отвода и подвода тепла в цикле ГХМ.

ГХМ, использующие воздух в качестве рабочего тела, были первыми промышленными холодильными установками. В настоящее время в промышленности они вытеснены парокомпрессорными холодильными машинами и применяются только для целей глубокого охлаждения.

Преимуществом ГХМ является простота устройства, очень низкая стоимость холодильного агента, безопасность работы и др.

Недостатки ГХМ состоят в низкой экономичности, вследствие чего в области умеренно низких температур (до минус 40 °С) они были вытеснены парокомпрессорными холодильными машинами.

### 2.1.5 Идеальный цикл парокомпрессорной холодильной машины

Если в качестве холодильного агента использовать пары веществ, кипящих при низких температурах, то возможно осуществление обратного цикла с теплообменом при постоянной температуре и при постоянном давлении одновременно, так как при **испарении жидкости** (подвод тепла) и при **конденсации паров** (отвод тепла) температура и давление холодильного агента остаются **постоянными**.

Обратный цикл, осуществленный в области **влажного пара**, будет полностью аналогичным циклу Карно и называется идеальным циклом парокомпрессорной холодильной машины (ПКХМ) (рисунок 2.7).

Схема машины аналогична схеме газовой холодильной машины. Рабочим телом в ней являются пары низкокипящих веществ (аммиак, фреон и др.)

Для парокомпрессорной холодильной машины приняты следующие условные обозначения:

$p_k$ ,  $q_k$  и  $T_k$  – давление, тепло и температура конденсации паров холодильного агента в процессе отвода тепла;

$p_0$ ,  $q_0$  и  $T_0$  – давление, тепло и температура испарения жидкого холодильного агента в процессе подвода тепла. Величина  $q_0$  является так же удельной холодопроизводительностью ПКХМ.

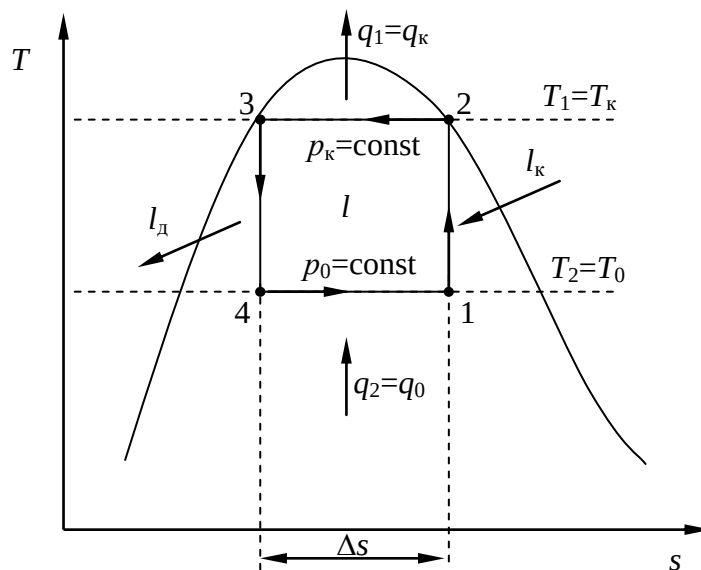


Рисунок 2.7 – Цикл ПКХМ, работающей по циклу Карно

Так как в процессах 4-1 и 2-3 давление постоянно, то  $q_{2-3}=h_2-h_3=q_1=q_k$ , а  $q_{4-1}=h_1-h_4=q_2=q_0$ .

Кроме того, для компрессора и детандера справедливо равенство  $l_k=h_2-h_1$  и  $l_d=h_3-h_4$ , а работа, затраченная в цикле  $l=l_k-l_d$ .

Холодильный коэффициент идеального цикла ПКХМ равен холодильному коэффициенту цикла Карно, откуда:

$$\varepsilon_{\text{п}} = \varepsilon_{\text{к}} = \frac{q_0}{l} = \frac{q_0}{q_k - q_0} = \frac{T_0 \cdot \Delta s}{T_k \cdot \Delta s - T_0 \cdot \Delta s}$$

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{T_0}{T_k - T_0} \quad (2.9)$$

### 2.1.6 Реальный цикл парокомпрессорной холодильной машины

Осуществление идеального цикла ПКХМ в области влажного пара на практике встречает большие технические трудности. Процессы сжатия и расширения влажного пара (двухфазная смесь) в поршневых и турбинных машинах приводят к большим потерям энергии и сильному износу оборудования, вследствие наличия в газе несжимаемой жидкости, имеющей высокую плотность.

Так как указанные потери превышают преимущества от применения идеального цикла, в реальный цикл ПКХМ внесены следующие изменения:

- процесс сжатия выносится в область перегретого пара, так называемый «сухой ход» компрессора;
- для защиты компрессора от проскока случайных капель жидкости перед всасыванием в компрессор пар холодильного агента немного перегревается (на  $10 \div 20$  °С) в специальном пароперегревателе;
- снижение давления жидкости после конденсатора осуществляется в процессе дросселирования при  $h=\text{пост.}$  Дросселирование осуществляется пропусканием жидкости через узкое сечение регулируемого (дроссельного) вентиля, где давление падает от  $p_k$  до  $p_o$ . Т. к. жидкость перегрета  $t_k > t_0$ , то после дросселирования происходит вскипание жидкости, вследствие чего холодопроизводительность ПКХМ уменьшается;
- для уменьшения потерь холодопроизводительности от дросселирования, после конденсатора осуществляется дополнительное охлаждение жидкого хладагента от  $t_k$  до  $t_{по}$  в специальном теплообменнике – переохладителе.

Перечисленные изменения снижают эффективность реального цикла ПКХМ, но делают его работу надежной и стабильной.

На рисунке 2.8 показан цикл реальной ПКХМ в диаграмме  $T-s$ .

На диаграмме (рисунок 2.8) показаны следующие процессы:

1-2 – адиабатное сжатие перегретого пара в компрессоре (затрачивается работа  $l_k$ );

2-3 и 3-4 – изобарный отвод тепла в конденсаторе с охлаждением перегретого пара от  $T_{\text{п}}$  до  $T_{\text{к}}$  и конденсацией насыщенного пара (отвод тепла  $q_{\text{к}}$ );

4-5 – изобарное переохлаждение жидкости от  $T_{\text{к}}$  до  $T_{\text{по}}$  (отвод тепла  $q_{\text{по}}$ );

5-6 – процесс дросселирования жидкости с уменьшением давления от  $p_{\text{к}}$  до  $p_0$  ( $h_5 = h_6 = \text{const.}$ );

6-1' – изобарное испарение жидкости за счет тепла, отбираемого от охлаждаемого объема (удельная холодопроизводительность –  $q_0$ );

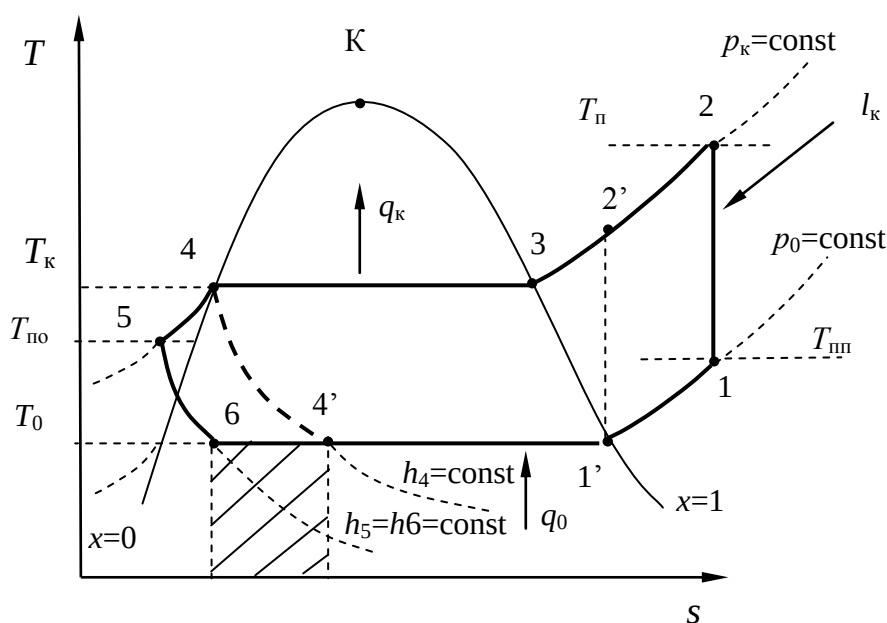


Рисунок 2.8 – Цикл реальной ПКХМ в диаграмме  $T$ - $s$

1'-1 – изобарный перегрев пара перед компрессором от  $T_0$  до  $T_{\text{пп}}$  (подвод тепла  $q_{\text{пп}}$ );

1'-2' – адиабатное сжатие в компрессоре без предварительного пароперегрева;

4-4' – дросселирование без переохлаждения;

6-4' – дополнительное увеличение удельной холодопроизводительности ПКХМ за счет переохлаждения жидкости (заштрихованная площадь).

Из анализа диаграммы (рисунок 2.8) следует, что т. к.  $T_{\text{по}} > T_{\text{пп}}$ , то тепло переохлаждения жидкости ( $q_{\text{по}}$ ) может быть использовано для перегрева пара перед компрессором ( $q_{\text{пп}}$ ).

## 2.2 Задачи для самостоятельного решения

**Задача 2.1.** Определить температуру воздуха, поступающего в холодильную камеру воздушной установки, теоретическую работу, затрачиваемую в цикле, удельную холодопроизводительность воздуха, если известно, что давление воздуха в холодильной камере  $P_1=0,1$  МПа и температура  $t_1= -10$  °С. Воздух адиабатно сжимается в компрессоре до  $P_2 =0,6$  МПа и направляется в охладитель, где его температура снижается до  $t_3=12$  °С. После чего воздух поступает в расширительный цилиндр и воздух расширяется по адиабате до первоначального давления. Изобразить цикл воздушной холодильной машины в  $P$ - $V$  и  $T$ - $S$  диаграммах.

**Задача № 2.2.** Используя условия предыдущей задачи № 2.1 определить холодильный коэффициент установки, а также холодильный коэффициент установки, работающей по обратному циклу Карно, совершаемому в том же интервале температур.

#### **Вопросы к практическому занятию**

1. Указать отклонения от цикла Карно в цикле Ренкина.
2. Указать отклонения от цикла Карно в реальной парокомпрессорной холодильной машине.
3. Основные недостатки газовой холодильной машины.
4. Методы повышения КПД паросиловой установки.

**Практическое занятие № 3****РАСЧЕТ ВНУТРЕННЕГО ОТНОСИТЕЛЬНОГО КПД  
ТЕПЛОВОЙ МАШИНЫ****3.1 Теоретическая часть**

Реальный адиабатный процесс расширения или сжатия протекает с возрастанием энтропии, в связи с чем, термический КПД при необратимом процессе будет меньше, чем при обратимом, и их отношение называют внутренним относительным КПД.

Внутренний относительный (индикаторный) КПД тепловой машины (компрессора или турбины), учитывает необратимые внутренние потери в действительном процессе сжатия или расширения, т.е. потери энергии от неидеальности газа и необратимости процессов, а так же потерей работы, связанной с протечками через неплотности, и теплообменном (подводом или отводом тепла) при сжатии или расширении. Так для компрессора внутренний относительный КПД может быть определен по формуле

$$\eta_i = \frac{T_o}{T_k} + 0,0025 \cdot t_o, \quad (3.1)$$

где  $T_o$  и  $T_k$  - температуры испарения и конденсации хладагента по шкале Кельвина, (K);

$t_o$  - температура испарения хладагента по шкале Цельсия, ( $^{\circ}\text{C}$ ).

**3.4 Задачи для самостоятельного решения**

**Задача 3.1.** Используя  $i$ -S диаграмму для воды и водяного пара определить все параметры на входе в паровую турбину, располагаемое теплопадение в паровой турбине, если известны: давление пара на входе в паровую турбину  $P_1=10$  МПа, давление в конденсаторе  $P_2=4$  кПа, температура на входе в паровую турбину  $t_1 = 500$   $^{\circ}\text{C}$  и коэффициент необратимости  $\phi=0,9$  в паровой турбине. Определить как изменится располагаемое теплопадение в турбине, если для ее регулировки использовать процесс дросселирования до давления  $P'_1=0,5$  МПа.

**3.5 Вопросы к практическому занятию**

1. Охарактеризовать потери в действительном процессе сжатия (расширения) в тепловой машине.

## Практическое занятие № 4

### РАСЧЕТ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО КПД ТЕПЛОВОЙ МАШИНЫ

#### 4.1 Теоретическая часть

Если в каком-либо процессе изменения состояния конечные параметры будут отличны от параметров среды, то действительная работа, полученная в этом процессе, определится как разность эксергий начала и конца процесса, то есть:

$$e_{\text{действ}} = e_{\text{вх}} - e_{\text{вых}}. \quad (4.1)$$

Эксергия теплоты определяется из условия, что максимальная полезная работа получается при осуществлении обратимого цикла Карно в интервале температур от начальной температуры тела  $T$  до температуры окружающей среды  $T_0$ . Тогда:

$$de_q = dq \eta_t^k = dq \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right), \quad (4.2)$$

или для всего процесса:

$$e_q = \int_1^2 \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) \cdot dq = q - T_0 \cdot \int \frac{dq}{T} = \left( 1 - \frac{T_0}{T_{cp}} \right) \cdot q_{1-2} = q - T_0 \cdot (S_1 - S_0), \quad (4.3)$$

где  $T_{cp}$  – среднеинтегральная температура горячего источника.

В некоторых теплоиспользующих установках производится смешивание потоков с разными потенциалами. Эти процессы связаны с потерями эксергии:

$$e_{см} = c \cdot T_0 \cdot \left[ \left( 1 - K + K \cdot \frac{T_1}{T_2} \right) - K \cdot \ln \left( \frac{T_1}{T_2} \right) \right], \quad (4.4)$$

где  $c$  – удельная теплоёмкость рабочего тела;

$T_1, T_2$  – температуры смешивающихся рабочих тел;

$K$  – коэффициент смешения.

При  $T_1 > T_2$  коэффициент смешения  $K$  определяется по формуле:

$$K = \frac{G_1}{G_1 + G_2}, \quad (4.5)$$

где  $G_1, G_2$  – расходы смешивающихся потоков.

Полезную работу, полученную за счёт теплоты  $Q_1$  горячего источника при неравновесных процессах можно представить в виде:

$$L = Q_1 - Q_2 = Q_1 - T_0 \cdot \Delta S_0, \quad (4.6)$$

где  $Q_2$  – теплота, отдаваемая в цикле окружающей среде;

$\Delta S_0$  – изменение энтропии окружающей среды.

Если бы в рассматриваемой системе протекали только равновесные процессы, то энтропия системы осталась неизменной, то есть  $\Delta S_0 = \Delta S_{\text{зоп}}$  и работа теплоты была максимальной:

$$L_{\text{max}} = Q_1 - T_0 \cdot \Delta S_{\text{зоп}}, \quad (4.7)$$

Потеря работоспособности изолированной системы, обусловленная рассеиванием энергии вследствие неравномерности процессов, определяется уравнением Гюи-Стодолы:

$$\Delta L = L_{\text{max}} - L = T_0 \cdot (\Delta S_0 - \Delta S_{\text{зоп}}) = T_0 \cdot \Delta S_{\text{сис}}, \quad (4.8)$$

Для системы из нескольких элементов:

$$\sum \Delta L_i = T_0 \cdot \sum \Delta S_i. \quad (4.9)$$

Если в тепловой аппарат, производящий полезную работу  $\ell_{\text{max}}$ , входит поток рабочего тела с параметрами  $T_1, p_1$  и подводится теплота  $q_1$  от источника с температурой  $T_{\text{ист}}$ , а из аппарата выходит поток рабочего тела с параметрами  $T_2, p_2$ , то потеря работоспособности составит:

$$\Delta \ell = [(e_{\text{ex}} + e_q) - e_{\text{вых}}] - \ell_{\text{max}}. \quad (4.10)$$

Для количественной оценки степени термодинамического совершенства теплового двигателя используется эксергетический КПД:

$$\eta_e = \frac{\ell_{\text{max}}}{(e_{\text{ex}} + e_q - e_{\text{вых}})} = 1 - \frac{\Delta \ell}{[(e_{\text{ex}} + e_q) - e_{\text{вых}}]}, \quad (4.11)$$

Для тепловых агрегатов, не производящих полезной работы:

$$\eta_e = \frac{e_{\text{вых}}}{(e_{\text{ex}} + e_q)}, \quad (4.12)$$

Для обратимых процессов  $\eta_e = 1$ .

Величина  $1 - T_0/T = \tau_e$  называется эксергетической температурной функцией.

В процессах теплообмена, протекающих при постоянном давлении, изменение эксергии потока рабочего тела равно изменению эксергии связанно-

го с этим процессом теплового потока, то есть  $\Delta e = (\Delta e_q)_p$ . Это упрощает расчёты  $e_q$  при переменной температуре.

#### 4.6 Задачи для самостоятельного решения

**Задача 4.1.** Определить потерю эксергии в пароводяном смесительном теплообменном аппарате. Расход и температура пара соответственно:  $G_1 = 0,01$  кг/с;  $t_1 = 130$  °С; расход и температура воды соответственно:  $G_2 = 0,2$  кг/с;  $t_2 = 15$  °С; температура окружающей среды  $t_0 = 30$  °С.

**Задача 4.2.** Сравнить потерю эксергии природного газа Ставропольского месторождения при использовании продуктов сгорания в газовой турбине и паровой турбине. Температура продуктов сгорания при входе на лопатки газовой турбины  $t_1 = 1200$  °С, температура перегретого пара при входе на лопатки паровой турбины  $t_2 = 570$  °С. Адиабатная температура горения топлива  $t_a = 2100$  °С.

#### 4.7 Вопросы к практическому занятию

1. Охарактеризовать эксергии потока рабочего тела и теплоты.

## Практическое занятие № 5

### ПОСТРОЕНИЕ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОЙ ДИАГРАММЫ ПАРОСИЛОВОЙ УСТАНОВКИ

#### 5.1 Теоретическая часть

Эксергию топлива можно определять по приближённой формуле:

$$e_m = Q_g^p. \quad (5.1)$$

Эксергия окислителя определяется по формуле  $e = (i_1 - i_0) - T_0 \cdot (s_1 - s_0)$ .

Эксергия продуктов сгорания определяется по формуле (в камере сгорания газовой турбины):

$$\begin{aligned} e_{n.c.} = & C_{p \text{ н.с.}} \cdot (T_{теор} - T_0) - T_0 \cdot [C_{p \text{ н.с.}} \cdot \ln(T_{теор}/T_0) - R_{n.c.} \cdot \ln(p_{n.c.}/p_0) - \\ & - \sum R_i \cdot \ln(1/r_i)] = H_{теор} - T_0 \cdot [C_{p \text{ н.с.}} \cdot \ln(T_{теор}/T_0) - R_{n.c.} \cdot \ln(p_{n.c.}/p_0) - \\ & - \sum R_i \cdot \ln(1/r_i)], \end{aligned} \quad (5.2)$$

где  $H_{теор}$  – теоретическая энтальпия продуктов сгорания;

$T_{теор}$  – теоретическая температура горения;

$C_{p \text{ н.с.}}$  – средняя изобарная теплоёмкость продуктов сгорания;

$R_{n.c.}$  – средняя газовая постоянная продуктов сгорания;

$R_i$  – газовая постоянная  $i$ -го продукта сгорания;

$r_i$  – объёмные доли компонентов продуктов сгорания.

Эксергетический КПД процесса горения:

$$\eta_e^{\Pi} = \frac{e_{n.c.}}{e_1} = \frac{(e_1 - \Delta e_{\Pi})}{e_1}. \quad (5.3)$$

При сжигании топлива в парогенераторах происходит передача теплового потока от продуктов сгорания к нагреваемому телу. Эффективность этого процесса связана не только с уменьшением эксергии продуктов сгорания, но и с возрастанием эксергии нагреваемого тела, и эксергетический КПД будет равен:

$$\eta_e^{\Pi_{пароген}} = \frac{(e''_{н.т.} - e'_{н.т.})}{(e'_{н.с.} - e''_{н.с.})} = \frac{e_{q \text{ н.т.}}}{e_{q \text{ н.с.}}} = \frac{(e_{qn.c.} - \Delta e_{\Pi})}{e_{q \text{ н.с.}}}. \quad (5.4)$$

Эксергия теплового потока продуктов сгорания:

$$e_{q \text{ н.с.}} = H_{\text{теор}} \cdot \left( 1 - \frac{T_0}{T_{\text{теор}}} \right), \quad (5.5)$$

где  $H_{\text{теор}} = Q_n^p \cdot \eta_t + Q_g + Q_m$  – теоретическая энтальпия;

$\eta_t$  – КПД топки;

$Q_g, Q_m$  – физическое тепло воздуха и топлива, вносимых в топку;

$T_{\text{теор}} = \left( \frac{H_{\text{теор}}}{\sum v_i \cdot C_{pi}} \right) + 273$  – теоретическая температура горения.

## 5.2 Задачи для самостоятельного решения

**Задача 5.1.** Определить эксергию при сжигании природного газа Ставропольского месторождения.

## 5.3 Вопросы к практическому занятию

1. Охарактеризовать на диаграмме Грассмана-Шаргута потоки и потери эксергии для паросиловой установки

## РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ БИНАРНОГО ЦИКЛА

## 6.1 Теоретическая часть

На рисунке 6.1 показана схема бинарного цикла, сущность которого заключается в использовании отработанного низкопотенциального тепла ГТУ в качестве греющего теплоносителя в цикле паросиловой установки, что позволяет повысить КПД до 70 – 78 %. Это можно объяснить с точки зрения снижения потерь эксергии при передаче теплоты от топлива к рабочему телу.

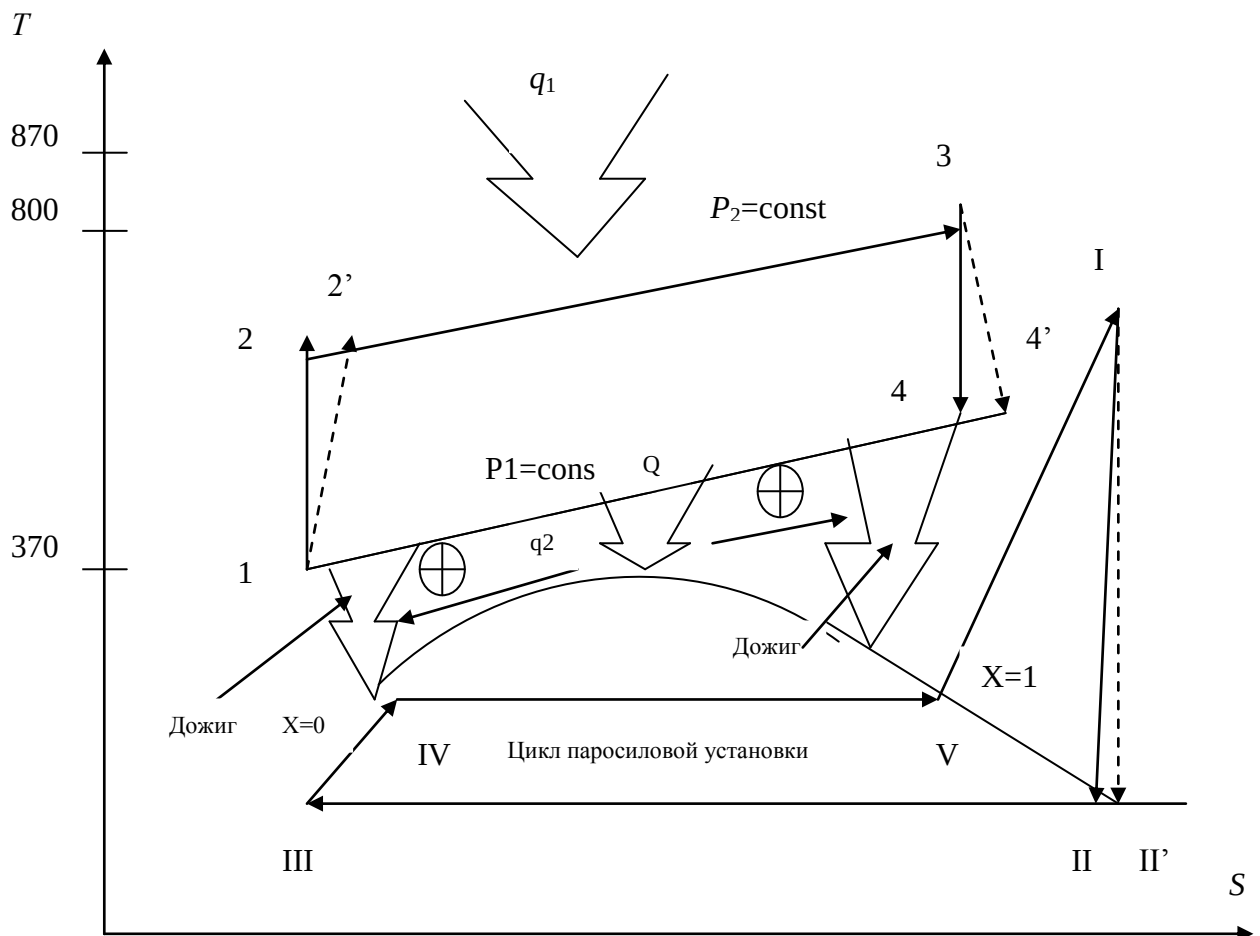


Рисунок 6.1 – Схема бинарного цикла на базе газотурбинной установки

## Когенерационные установки на базе двигателей внутреннего сгорания.

Этот класс оборудования разделяется на дизельные установки и газопоршневые агрегаты. Первые работают на солярке и наиболее часто находят применение в удаленных районах, где нет централизованного энергоснабжения. При их работе утилизируется теплота выхлопных газов, температура ко-

торых достигает  $450 \div 500$  °С, а в модулях с глубокой утилизацией – также и тепло систем охлаждения и смазки двигателя. Полученная тепловая энергия от этих машин идет на нужды отопления и горячего водоснабжения (ГВС). Газо-поршневые агрегаты работают на топливной смеси газа и небольшого количества дизельного топлива (как правило, не более 10 %) и находят более широкую область применения, так как обладают широким спектром единичных мощностей, начиная с 200 кВт.

И те, и другие энергосистемы способны развивать полезную мощность до  $6 \div 7$  МВт, где электрический КПД достигает 40 %. При этом, мощность системы утилизации тепла отработавших дымовых газов составляет  $100 \div 150$  % от мощности дизельной установки, а общий энергетический КПД КГУ достигает  $85 \div 90$ %.

Если оценивать варианты реализации проектов с позиций капиталовложений, то наиболее привлекательными являются дизельные энергоблоки, не требующие затрат на прокладку подводящего газопровода. Для негазифицированных районов это оптимальный вариант. Если же исходить из окупаемости установки, то дизельные установки значительно уступают газопоршневым агрегатам: во-первых, из-за дороговизны солярки; во-вторых, из-за большего расхода масла и высоких эксплуатационных затрат.

В результате, вырабатываемое электричество и тепло оказывается дороже в несколько раз, чем у газовых моделей. Последние же обладают еще двумя немаловажными преимуществами: у них больше ресурс работы до первого капремонта и допускается большая свобода при выборе топлива и перехода с одного вида топлива на другой. Так, в качестве горючего в газопоршневом агрегате могут применяться природный газ, биогаз, пропан, бутан, пиролизные газы, газы мусорных свалок, коксовый газ, попутный газ, рудничный газ, газ сточных вод, дизельное топливо, топочные мазуты и сырая нефть.

#### **6.4 Задачи для самостоятельного решения**

**Задача 6.1.** Начальные параметры воздуха, поступающего в компрессор ГТУ со сжиганием топлива при  $p=const$ , равны  $p_1=1$  бар,  $t_1=20$  °С. Степень повышения давления в компрессоре ГТУ равна  $\beta=6$ . Температура газов перед соплами турбины равна  $t_3=700$  °С. Рабочее тело обладает свойствами воздуха. Компрессор засасывает  $2 \cdot 10^3$  кг/ч воздуха. Определить термический КПД ГТУ.

### 6.5 Вопросы к практическому занятию

1. Охарактеризовать принцип повышения КПД в бинарных циклах.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

### 1. Перечень основной литературы:

3. Макеев, М. Ф. Архитектурно-строительная теплотехника : учебное пособие / М. Ф. Макеев, Е. Д. Мельников, М. В. Агеенко. — Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2021. — 79 с.
4. Титова, Л. М. Теоретические основы энергосберегающих технологий : учебное пособие для вузов / Л. М. Титова, А. Х. Нугманов, И. Ю. Алексанян. — 2-е изд., испр. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 216 с..
3. Шибеко, А. С. Строительная теплофизика и теплотехнические измерения : учебное пособие / А. С. Шибеко, М. А. Рутковский. — Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. — 288 с.

### 2 Перечень дополнительной литературы:

1. Осипова, Н. Н. Тепловая физика. Теплотехника : учебное пособие по проведению лабораторного практикума / Н. Н. Осипова, С. Г. Культяев, И. М. Бычкова. — Саратов : Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, ЭБС АСВ, 2020. — 120 с
2. 3. Вакулин, А. А. Теплофизика и теоретическая теплотехника : учебное пособие / А. А. Вакулин. — Тюмень : ТюмГУ, 2019. — 196 с.

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования**  
**«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**к выполнению контрольной работы**  
**по дисциплине «Методы термодинамической оценки эффективности**  
**принятых решений»**  
**по направлению 08.04.01 «Строительство»**  
**направленность (профиль) «Теплогазоснабжение населенных мест и**  
**предприятий»**

## Содержание

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ
2. ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАНИЯ И ЕГО ОБЪЕМ
3. УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ
4. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ
5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТ НАД КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТОЙ
6. ПОРЯДОК ЗАЩИТЫ И ОТВЕТСТВЕННОСТЬ СТУДЕНТА ЗА ВЫПОЛНЕНИЕ ЗАДАНИЯ
7. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

## Введение

В методических указаниях к контрольной работе по дисциплине **«Методы термодинамической оценки эффективности принятых решений»** для студентов специальности 08.04.01 **Строительство**, профиль - Теплогазоснабжение населенных мест и предприятий приведены исходные данные и даны рекомендации по расчёту газового цикла двигателя внутреннего сгорания (ДВС), его энергетическому балансу, определению мощности и коэффициента полезного действия, а также анализ цикла Ренкина паросиловой установки. Методические указания выполнены в соответствии с рабочей программой по дисциплине «Методы термодинамической оценки эффективности принятых решений» для студентов специальности 08.04.01 Строительство - Теплогазоснабжение населенных мест и предприятий и определяют единый подход к подготовке студентами контрольных работ, обязательные требования к их содержанию и оформлению. Настоящие методические указания не исключают, а ориентируют на разработку частных методик к выполнению контрольных работ. Методические указания к выполнению контрольной работы нацеливают на стимулирование самостоятельной работы студентов с тем, чтобы повысить ее роль не только в формировании знаний, но и в накоплении навыков научного исследования. По своей структуре методические указания включают в себя положения, имеющие обязательный и рекомендательный характер.

## ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Одним из основных методов изучения дисциплины «**Методы термодинамической оценки эффективности принятых решений**» является выполнение контрольной работы.

Цель выполнения контрольной работы:

- систематизация и закрепление изучаемого материала;
- увязка теоретических основ дисциплины с решением практических задач;
- формирование умения сделать оценку теоретических положений и использовать их в инженерной деятельности;
- овладение совокупностью методов повышения эффективности оборудования;
- приобретение умений практического принятия инженерных решений.

Подбор и изучение необходимого материала, самостоятельное выполнение контрольной работы позволит студенту в большей степени подготовиться к принятию инженерных решений, возникающих в процессе функционирования предприятия в современных условиях.

### 1. ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАНИЯ И ЕГО ОБЪЕМ

#### 2.1 Задание к контрольной работе

2.1.1 Для заданного идеального цикла двигателя внутреннего сгорания (ДВС), отнесённого к 1 кг рабочего тела, в качестве которого используется газовая смесь, заданная объёмными долями, определить:

- газовую постоянную смеси и её кажущуюся молекулярную массу;
- недостающие физические параметры состояния в узловых точках цикла;
- изобарную (  $C_p^{CM}$  ) и изохорную (  $C_v^{CM}$  ) теплоёмкости газовой смеси без учёта зависимости теплоёмкости от температуры;
- изменение энтропии в процессах цикла.

На основании полученных результатов расчёта построить цикл в масштабе в системе координат  $P$ - $V$  и  $T$ - $S$  на миллиметровой бумаге формата А-4 или А-3 (для процессов, изображение которых в принятых системах коорди-

нат отличается от прямой линии, должны быть определены дополнительно промежуточные значения параметров  $P$ ,  $V$ ,  $T$ , и изменения энтропии в 2-3-х точках).

Дать анализ термодинамического цикла тепловой машины, для чего по каждому из 4-х процессов цикла определить:

- изменение внутренней энергии и энтальпии;
- количество теплоты и работы.

На основании полученных результатов определить количество подведённой ( $q_1$ ) и отведённой ( $q_2$ ) теплоты в цикле; полезную работу цикла ( $l_{ц}$ ) и теоретическую мощность двигателя ( $N_T$ ); термический КПД цикла ( $\eta_{ц}$ ) и КПД теоретического цикла Карно ( $\eta_k$ ) двигателя, «работающего» в располагаемом интервале температур ( $T_{гор} - T_{хол}$ ).

2.1.2. Используя  $i$ - $S$  диаграмму для воды и водяного пара определить все параметры на входе в паровую турбину, располагаемое теплопадение в паровой турбине, если известны: давление пара на входе в паровую турбину  $P_1$ , давление в конденсаторе  $P_2$ , температура на входе в паровую турбину  $t_1$  и коэффициент необратимости  $\phi$  в паровой турбине. Определить как изменится располагаемое теплопадение в турбине, если для ее регулировки использовать процесс дросселирования до давления  $P'_1$ .

## 2.2 Выбор исходных данных и общие рекомендации по выполнению

Исходные данные для расчёта и энергетического анализа идеального цикла ДВС принять из таблиц 1 и 2 по последней и предпоследней цифрам шифра студента. При этом графическое изображение цикла выбрать по рисунку 1 в соответствии с указаниями таблицы 1.

Аналогично, из таблицы 3, принять исходные данные для расчёта цикла Ренкина.

Таблица 1- Значения физических параметров в узловых точках идеального цикла ДВС

| Последняя цифра | № цик- | Давление, бар | Температура, К | Удельный объём, м <sup>3</sup> /кг |
|-----------------|--------|---------------|----------------|------------------------------------|
|-----------------|--------|---------------|----------------|------------------------------------|

| шифра | ла | $P_1$ | $P_2$ | $P_3$ | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ | $V_1$ | $V_2$ | $V_3$ |
|-------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1     | 1  | 2,0   | 20    | 12    | -     | -     | -     | 0,36  | -     | -     |
| 2     | 2  | 1,5   | -     | 13    | 375   | -     | 575   | -     | -     | -     |
| 3     | 3  | 0,9   | 4,0   | -     | 325   | -     | 800   | -     | -     | -     |
| 4     | 4  | 1,5   | -     | 3,0   | 300   | -     | -     | -     | 0,1   | -     |
| 5     | 5  | -     | 20    | -     | -     | 475   | 800   | 0,15  | -     | -     |
| 6     | 6  | 3,0   | 8,0   | -     | 300   | -     | 475   | -     | -     | -     |
| 7     | 7  | 6,0   | 40    | -     | 325   | -     | 600   | -     | -     | -     |
| 8     | 8  | 4,0   | 30    | -     | 350   | -     | 500   | -     | -     | -     |
| 9     | 9  | 3,0   | 8,0   | -     | 300   | -     | 475   | -     | -     | -     |
| 0     | 10 | 0,8   | -     | -     | 300   | -     | 600   | -     | -     | -     |

Таблица 2 - Характеристика газовой смеси

| Предпо-<br>следняя<br>цифра<br>шифра | Объёмный состав газовой смеси |           |           | Расход рабочего<br>тела $G$ , кг/с |
|--------------------------------------|-------------------------------|-----------|-----------|------------------------------------|
|                                      | $r_{CO_2}$                    | $r_{N_2}$ | $r_{O_2}$ |                                    |
| 1                                    | 0,60                          | 0,35      | 0,05      | 0,5                                |
| 2                                    | 0,62                          | 0,33      | 0,05      | 0,9                                |
| 3                                    | 0,85                          | 0,13      | 0,02      | 1,4                                |
| 4                                    | 0,60                          | 0,30      | 0,10      | 2,0                                |
| 5                                    | 0,78                          | 0,12      | 0,10      | 1,2                                |
| 6                                    | 0,60                          | 0,33      | 0,07      | 1,0                                |
| 7                                    | 0,65                          | 0,28      | 0,07      | 0,8                                |
| 8                                    | 0,76                          | 0,19      | 0,05      | 0,6                                |
| 9                                    | 0,67                          | 0,25      | 0,08      | 1,6                                |
| 0                                    | 0,75                          | 0,21      | 0,04      | 0,4                                |

## Графическая иллюстрация идеального цикла ДВС

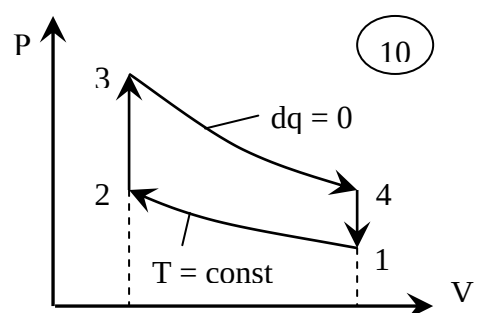
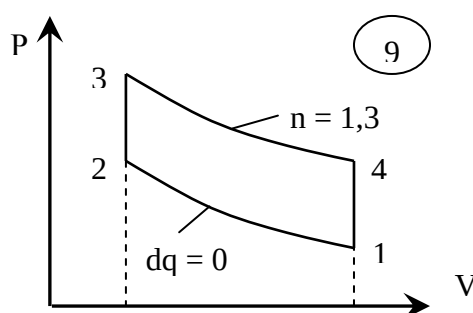
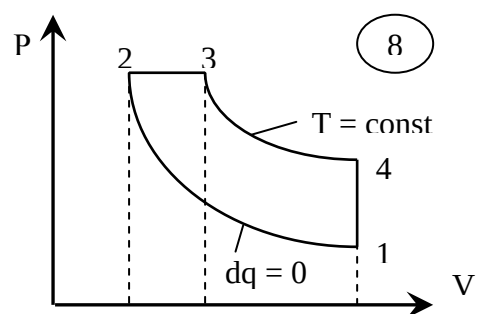
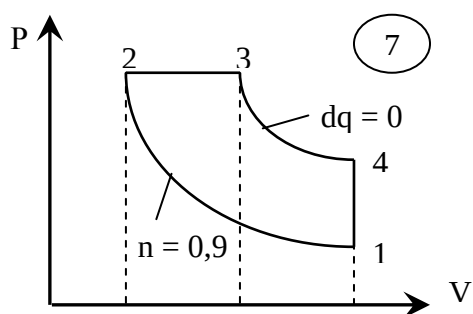
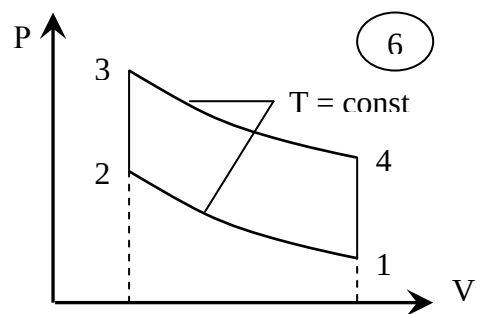
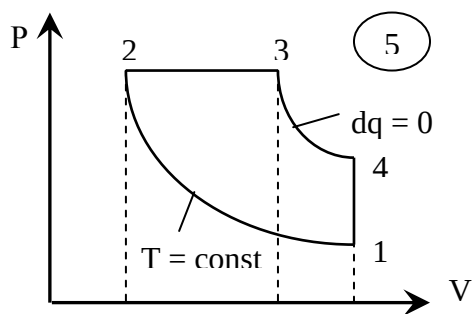
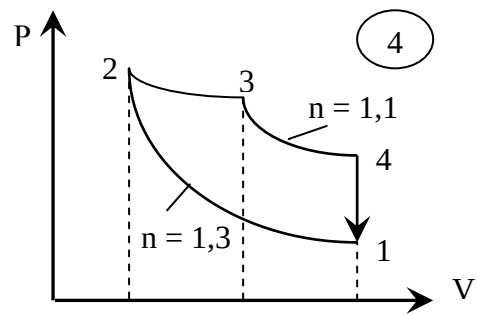
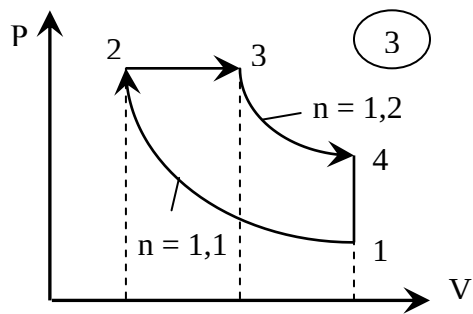
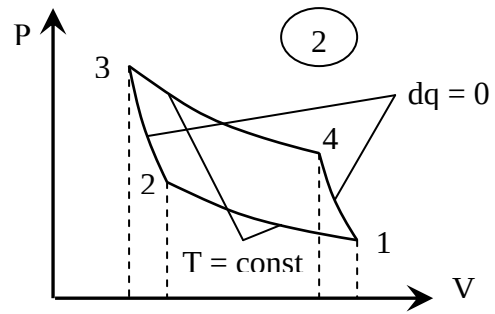
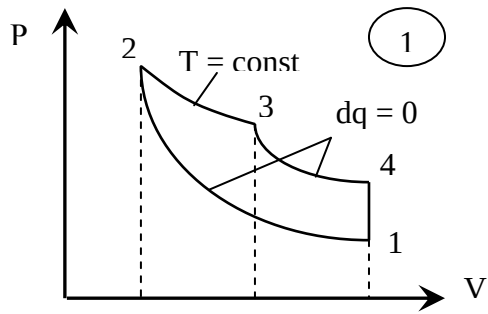


Таблица 3 – Исходные данные для расчета цикла Ренкина

| №   | Предпоследняя цифра шифра |            |              | №   | Последняя цифра шифра |        |
|-----|---------------------------|------------|--------------|-----|-----------------------|--------|
| п/п | $P_1$ , МПа               | $t_1$ , °C | $P'_1$ , МПа | п/п | $P_2$ , кПа           | $\phi$ |
| 1   | 10,0                      | 500        | 0,50         | 1   | 4,0                   | 0,90   |
| 2   | 12,0                      | 450        | 1,20         | 2   | 5,0                   | 0,88   |
| 3   | 9,0                       | 380        | 0,80         | 3   | 3,5                   | 0,92   |
| 4   | 7,0                       | 350        | 0,60         | 4   | 4,5                   | 0,78   |
| 5   | 11,0                      | 400        | 1,08         | 5   | 5,5                   | 0,8    |
| 6   | 8,0                       | 420        | 0,90         | 6   | 4,8                   | 0,95   |
| 7   | 13,0                      | 410        | 1,10         | 7   | 3,8                   | 0,85   |
| 8   | 7,5                       | 510        | 0,80         | 8   | 4,2                   | 0,91   |
| 9   | 8,5                       | 540        | 0,90         | 9   | 3,8                   | 0,75   |
| 0   | 11,5                      | 570        | 1,00         | 0   | 5,0                   | 0,94   |

### 2.3 Объем контрольной работы

Контрольная работа состоит из расчетно-пояснительной записки и графической части.

#### 2.3.1 Содержание расчетно-пояснительной записки

1. Определяются: газовая постоянная смеси и ее кажущаяся молекулярная масса; недостающие параметры состояния в узловых точках процесса; теплоемкость газовой смеси (изобарная и изохорная).

2. По каждому процессу дается анализ термодинамического цикла, т.е. определяется изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в процессах цикла, количество теплоты и работы.

3. Определяется: количество подведенной и отведенной теплоты в цикле; полезная работа цикла; теоретическая мощность двигателя; термический КПД цикла и КПД двигателя, работающего по циклу Карно, в заданном интервале температур.

4. Используя  $i$ - $S$  диаграмму для воды и водяного пара определяются все параметры на входе в паровую турбину, располагаемое теплопадение в паровой турбине. Определяется как изменится располагаемое теплопадение в

турбине, если для ее регулировки использовать процесс дросселирования до давления  $P'_1$ .

### 2.3.2 Содержание графической части

1. Построить в масштабе цикл двигателя в  $P$ - $V$  и  $T$ - $S$  диаграммах, а также цикл двигателя, работающего по циклу Карно в заданном интервале температур.
2. Построить в  $i$ - $S$  диаграмме для воды и водяного пара теоретический и действительный циклы расширения пара в турбине, а также процесс расширения при регулировании дросселированием.

## 3. УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

3.1. В анализ заданного идеального цикла входит определение всех видов термодинамических процессов, образующих цикл. Процессы, вид которых не отражён на диаграммах (рисунок 1), принимать на основании визуального анализа изобарными или изохорными.

Определение кажущейся молекулярной массы газовой смеси, газовой постоянной, а также изобарной и изохорной теплоёмкостей смеси осуществляется в соответствии с рекомендациями, изложенными в специальной литературе.

Расчёт недостающих физических параметров ( $P$ ,  $V$ ,  $T$ ) в узловых точках цикла (1-4) следует начинать с той точки, в которой известны два параметра: недостающий параметр находится из уравнения состояния газовой смеси. Определение недостающего параметра в узловой точке цикла при одном известном параметре осуществляется через уравнение соотношения параметров в рассматриваемом термодинамическом процессе.

Для нахождения точек промежуточных состояний в процессах, изображение которых в  $P$ - $V$  и  $T$ - $S$  координатах отличается от прямых линий, необходимо рабочий интервал процесса по одному из параметров разбить самостоятельно на 2-3 приблизительно равных отрезка. Таким образом, появляются дискретные значения в промежуточных точках по одной из коор-

динат. Соответствующие принятым точкам значений других физических координат находят через уравнение соотношения параметров в рассматриваемом процессе. Расчёт изменения энтропии для принятых промежуточных точек производится по соответствующим формулам в том или ином процессе. Полученные результаты представляют по форме таблицы 4.

Таблица 4

| Наименование параметров           | Номера точек |   |   |   |               |          |           |              |
|-----------------------------------|--------------|---|---|---|---------------|----------|-----------|--------------|
|                                   | узловых      |   |   |   | промежуточных |          |           |              |
|                                   | 1            | 2 | 3 | 4 | $K^I$         | $K^{II}$ | $(K+1)^I$ | $(K+1)^{II}$ |
| $P$ , МПа                         |              |   |   |   |               |          |           |              |
| $v$ , м <sup>3</sup> /кг          |              |   |   |   |               |          |           |              |
| $T$ , К                           |              |   |   |   |               |          |           |              |
| $\Delta S_{k-(k+1)}$ , кДж/(кг К) |              |   |   |   |               |          |           |              |

На основании полученных результатов проводится энергетический анализ термодинамического цикла теплового двигателя. С этой целью по соответствующим формулам, определяются в каждом процессе изменение внутренней энергии и энтальпии, а также количество теплоты, участвующей в процессе, и величина затраченной или произведённой работы. Расчётные значения искомых величин представляют по форме таблицы 5.

Таблица 5

| Обозначение процесса | Изменение энергетических параметров |                     |                     | Количество теплоты и работы |              |
|----------------------|-------------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|--------------|
|                      | $\Delta u$ , кДж/кг                 | $\Delta i$ , кДж/кг | $\Delta S$ , кДж/кг | $q$ , кДж/кг                | $l$ , кДж/кг |
| 1-2                  |                                     |                     |                     |                             |              |
| 2-3                  |                                     |                     |                     |                             |              |
| 3-4                  |                                     |                     |                     |                             |              |
| 4-1                  |                                     |                     |                     |                             |              |
| $\Sigma$ за цикл     | $\Sigma \Delta u$                   | $\Sigma \Delta i$   | $\Sigma \Delta S$   | $\Sigma q$                  | $\Sigma l$   |

Суммирование по процессам за цикл изменений энергетических параметров, а также количеств теплоты и работы производится с учётом знака. При этом суммарное изменение энергетических параметров в цикле должно

быть равно нулю, что следует из самого определения параметра, как физической величины.

Сумма количеств теплоты за цикл со знаком плюс является подведённым теплом ( $q_1$ ), аналогичная сумма со знаком минус – отведённым теплом ( $q_2$ ). В соответствии со вторым законом термодинамики должно выполняться равенство:

$$\Sigma q = q_1 - q_2 = \Sigma l = l_{\text{ц}}. \quad (3.1)$$

Термический КПД цикла определяют по формуле

$$\eta_m = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \cdot 100\%. \quad (3.2)$$

Теоретическую мощность ДВС определяют с учётом заданного секундного расхода рабочего тела

$$N_m = G \cdot l_{\text{ц}}. \quad (3.3)$$

КПД теоретического цикла Карно применительно к располагаемому перепаду температур ( $T_{\text{гор}} - T_{\text{хол}} = T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$ ) определяют по формуле

$$\eta_k = 1 - \frac{T_{\text{хол}}}{T_{\text{гор}}}. \quad (3.4)$$

При построении диаграммы цикла в координатах  $T$ - $S$  энтропию заданных газов в точке (1) принять равной нулю: рост энтропии в принятой системе координат означает отклонение термодинамического процесса вправо, а уменьшение энтропии – отклонение влево.

3.2 Предварительно необходимо ознакомиться с  $i$ - $S$  диаграммой для воды и водяного пара.

На диаграмме необходимо найти точку 1 с начальными параметрами давления и температуры  $P_1$  и  $t_1$ . Проектируя ее на ось абсцисс, находим энтальпию и внутреннюю энергию в точке 1. Из точки 1 пар расширяется адиабатно, т.е.  $\Delta S_{2-1}=0$ , до давления в конденсаторе (теоретическое расширение)  $P_2$ . Находим точку 2, лежащую на пересечении адиабаты, опущенной из точки 1 до пересечения с изобарой  $P_2$ . Аналогично, как и для точки 1, находим

энтальпию в точке 2 -  $i_2$ . Для нахождения точки 2', характеризующей состояние пара в реальном процессе, необходимо определить  $\Delta h_{\text{пот}}$  - потери располагаемого адиабатного теплопадения

$$\Delta h_{\text{пот}} = \varphi \cdot h_0, \quad (3.5)$$

где  $h_0 = i_1 - i_2$  – располагаемое адиабатное теплопадение;

$\varphi \approx 0,01$  – коэффициент потери энергии.

Затем находим

$$h_{\text{пол}} = h_0 - \Delta h_{\text{пот}}, \quad (3.6)$$

где  $h_{\text{пол}}$  – действительное теплопадение.

$h_{\text{пол}}$  определяется от точки 1 до положения точки 2', которая находится на пересечении изобары  $P_2$  с  $i_2'$  ( $i_2' = i_1 - \Delta h_{\text{пот}}$  - энтальпия пара в точке 2'). Для процесса дросселирования, как известно, протекающем при  $i = \text{const}$ , находим положение точки 3 на пересечении  $i_1 = i_3$  с изобарой  $P_1'$ . Далее процесс построения повторяется как и для предыдущего случая, при этом построение процесса заканчивается при давлении пара в конденсаторе  $P_2$ .

#### 4. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ

4.1 В ходе выполнения контрольной работы необходимо выполнять следующие условия:

- задание оформляется в виде отдельного листа с подписью студента и преподавателя, выдавшего задание, с указанием шифра задания;
- расчеты сопровождать кратким пояснительным текстом, в котором указывать, какая величина определяется и по какой формуле, какие величины подставляются в формулы и откуда они взяты;
- вычисления производить в системе СИ;
- контрольную работу оформлять на машинописных листах формата А-4;

#### 4.2 Примерный календарный план выполнения контрольной работы

Выдача задания 1 неделя.

Выполнение КР 3 – 8 неделя.

## 5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТ НАД КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТОЙ

Для написания контрольной работы необходимо познакомиться и подобрать специальную научную литературу по выбранной теме. Подбор литературы производится студентом самостоятельно по заданному темой направлению. При этом следует пользоваться предметным алфавитным каталогом в читальном зале библиотеки университета и других библиотеках. Отбирать следует литературу, которая освещает как общетеоретическую сторону проблемы, так и действующую практику. При этом студент может составить список, включая в него литературу, изданную за последние пять лет, отечественные стандарты и инструктивный материал.

Особое внимание следует обратить на научные публикации в специальных журналах за последние два года. Перечень всех статей за год содержится в последнем номере журналов.

Сначала следует изучить основную литературу (учебники, пособия), а затем перейти к работам исследовательского характера. Особенно следует обратить внимание на дискуссионные статьи в журналах и позиции тех или иных авторов, продумать их аргументацию, что позволит сделать правильное сопоставление различных точек зрения и сформировать свое отношение к ним.

## 6 ПОРЯДОК ЗАЩИТЫ И ОТВЕТСТВЕННОСТЬ СТУДЕНТА ЗА ВЫПОЛНЕНИЕ ЗАДАНИЯ

Выполненная работа проверяется руководителем, который дает допуск к защите или возвращает ее на доработку. При положительном заключении работа допускается к защите, при наличии замечаний возвращается на доработку. При подготовке к защите контрольной работы студент обязан повторить теоретический материал дисциплины и подготовить доклад по материалу работы. В докладе следует изложить сущность работы, методы решения задач, наиболее важные результаты и выводы по работе. После доклада студенту могут быть заданы вопросы, как по содержанию работы, так и по курсу в целом.

Оценка уровня выполнения контрольной работы, а также степени усвоения теоретического материала производится преподавателем – руководителем контрольной работы. Результаты защиты работы – зачтено или не зачтено.

## 7. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макеев, М. Ф. Архитектурно-строительная теплотехника : учебное пособие / М. Ф. Макеев, Е. Д. Мельников, М. В. Агеенко. — Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2021. — 79 с.
2. Титова, Л. М. Теоретические основы энергосберегающих технологий : учебное пособие для вузов / Л. М. Титова, А. Х. Нугманов, И. Ю. Алексанян. — 2-е изд., испр. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 216 с..
3. Шибeko, А. С. Строительная теплофизика и теплотехнические измерения : учебное пособие / А. С. Шибeko, М. А. Рутковский. — Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. — 288 с.
4. Осипова, Н. Н. Тепловая физика. Теплотехника : учебное пособие по проведению лабораторного практикума / Н. Н. Осипова, С. Г. Культяев, И. М. Бычкова. — Саратов : Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, ЭБС АСВ, 2020. — 120 с
5. Вакулин, А. А. Теплофизика и теоретическая теплотехника : учебное пособие / А. А. Вакулин. — Тюмень : ТюмГУ, 2019. — 196 с.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к самостоятельной работе студентов

по дисциплине «Методы термодинамической оценки эффективности приня-  
тых решений»

по направлению 08.04.01 «Строительство»

направленность (профиль) «Теплогазоснабжение населенных мест и пред-  
приятий»

В современный период востребованы высокий уровень знаний, академическая и социальная мобильность, профессионализм специалистов, готовность к самообразованию и самосовершенствованию. В связи с этим должны измениться подходы к планированию, организации учебно-воспитательной работы, в том числе и самостоятельной работы аспирантов. Прежде всего, это касается изменения характера и содержания учебного процесса, переноса акцента на самостоятельный вид деятельности, который является не просто самоцелью, а средством достижения глубоких и прочных знаний, инструментом формирования у аспирантов активности и самостоятельности.

Целью методических рекомендаций является повышение эффективности учебного процесса, в том числе благодаря самостоятельной работе, в которой студент становится активным субъектом обучения, что означает:

- способность занимать в обучении активную позицию;
- готовность мобилизовать интеллектуальные и волевые усилия для достижения учебных целей;
- умение проектировать, планировать и прогнозировать учебную деятельность;
- привычку инициировать свою познавательную деятельность на основе внутренней положительной мотивации;
- осознание своих потенциальных учебных возможностей и психологическую готовность составить программу действий по саморазвитию.

Виды самостоятельной работы студентов

Репродуктивная самостоятельная работа

Самостоятельное прочтение, просмотр, конспектирование учебной литературы, прослушивание лекций, магнитофонных записей, заучивание, пересказ, запоминание, Интернет-ресурсы, повторение учебного материала и др.

Познавательно-поисковая самостоятельная работа

Подготовка сообщений, докладов, выступлений на семинарских и практических занятиях, подбор литературы по дисциплинарным проблемам, написание рефератов, контрольных, курсовых работ и др.

## Творческая самостоятельная работа

Написание рефератов, научных статей, участие в научно-исследовательской работе, подготовка дипломной работы (проекта). Выполнение специальных заданий и др., участие в научной конференции.

## Организация и контроль самостоятельной работы

Для успешного выполнения самостоятельной работы студентов необходимо планирование и контроль со стороны преподавателей. Аудиторная самостоятельная работа выполняется студентами на лекциях, семинарских занятиях, и, следовательно, преподаватель должен заранее выстроить систему самостоятельной работы, учитывая все ее формы, цели, отбирая учебную и научную информацию и средства (методических) коммуникаций, продумывая роль студента в этом процессе и свое участие в нем.

Вопросы для самостоятельной работы студентов, указанные в рабочей программе дисциплины, предлагаются преподавателями в начале изучения дисциплины. Студенты имеют право выбирать дополнительно интересующие их темы для самостоятельной работы.

Не умаляя значения аудиторной самостоятельной работы, в данных методических рекомендациях акцентируется внимание на проблемах, связанных с внеаудиторной самостоятельной работой и ее организацией. Внеаудиторная самостоятельная работа студентов (далее самостоятельная работа) – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская деятельность студентов, осуществляемая во внеаудиторное время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия. Она включает в себя:

- подготовку к аудиторным занятиям (лекциям, практическим, семинарским, лабораторным работам и др.) и выполнение соответствующих заданий;
- самостоятельную работу над отдельными темами учебных дисциплин в соответствии с учебно-тематическими планами;
- написание рефератов, докладов, эссе;

- подготовку ко всем видам практики и выполнение предусмотренных ими заданий;
- выполнение письменных контрольных и курсовых работ;
- подготовку ко всем видам контрольных испытаний, в том числе к комплексным экзаменам и зачетам;
- подготовку к итоговой государственной аттестации, в том числе выполнение выпускной квалификационной (дипломной) работы (проекта);
- работу в студенческих научных обществах, кружках, семинарах и др.;
- участие в работе факультативов, спецсеминаров и т.п.;
- участие в научной и научно-методической работе кафедры;
- участие в научных и научно-практических конференциях, семинарах, конгрессах и т.п.;
- другие виды деятельности, организуемой и осуществляемой вузом, или кафедрой.

Выполнение любого вида самостоятельной работы предполагает прохождение студентами следующих этапов:

- определение цели самостоятельной работы;
- конкретизация познавательной (проблемной или практической) задачи;
- самооценка готовности к самостоятельной работе по решению поставленной или выбранной задачи;
- выбор адекватного способа действий, ведущего к решению задачи (выбор путей и средств для ее решения);
- планирование (самостоятельно или с помощью преподавателя) самостоятельной работы по решению задачи;
- реализация программы выполнения самостоятельной работы.

Методические советы и рекомендации к заданиям

Все типы заданий, выполняемых студентами, в том числе в процессе самостоятельной работы, так или иначе содержат установку на приобретение и закрепление определенного Федеральным государственным образователь-

ным стандартом высшего профессионального образования объема знаний и уровня компетенций, а также на формирование в рамках этих знаний некоторых навыков мыслительных операций - умения оценивать, анализировать, сравнивать, комментировать и т.д. Некоторые задания требуют пояснения:

1. Прокомментировать высказывание - объяснить, какая идея заключена в отрывке, о какой позиции ее автора она свидетельствует.
2. Сравнить – выявить сходство и различие позиций по определенным признакам.
3. Обосновать один из нескольких предложенных вариантов ответа – привести аргументы в пользу правильности выбранного варианта ответа и указать, в чем ошибочность других вариантов.
4. Аргументировать (обосновать, доказать, объяснить) ответ – значит: а) оправдать (опровергнуть) некоторую точку зрения; б) обосновать свою точку зрения, опираясь на теоретические или практические обобщения, данные и т.д.
5. Провести анализ – разложить изучаемые явления на составные части, сопоставить их с целью выявления в них существенного, необходимого и определяющего.
6. Тезисно изложить идею, концепцию, теорию – используя материал учебных пособий и другой литературы, кратко, но не в ущерб содержанию сформулировать основные положения учения.
7. Дать характеристику, охарактеризовать явления – значит назвать существенные, необходимые признаки какого-либо явления (положения какой-либо теории) и выявить особенности.
8. Изобразить схематически – значит раскрыть содержание ответа в виде таблицы, рисунка, диаграммы и других графических форм.

#### Работа с литературой

Важной составляющей самостоятельной внеаудиторной подготовки является работа с литературой ко всем видам занятий: семинарским, практическим,

при подготовке к зачетам, экзаменам, тестированию, участию в научных конференциях.

Умение работать с литературой означает научиться осмысленно пользоваться источниками. Прежде чем приступить к освоению научной литературы, рекомендуется чтение учебников и учебных пособий.

Существует несколько методов работы с литературой.

Один из них – самый известный – метод повторения: прочитанный текст можно заучить наизусть. Простое повторение воздействует на память механически и поверхностно. Полученные таким путем сведения легко забываются.

Наиболее эффективный метод – метод кодирования: прочитанный текст нужно подвергнуть большей, чем простое заучивание, обработке. Чтобы основательно обработать информацию и закодировать ее для хранения, важно произвести целый ряд мыслительных операций: прокомментировать новые данные; оценить их значение; поставить вопросы; сопоставить полученные сведения с ранее известными.

Для улучшения обработки информации очень важно устанавливать осмысленные связи, структурировать новые сведения.

Изучение научной, учебной и иной литературы требует ведения рабочих записей.

Форма записей может быть весьма разнообразной: простой или развернутый план, тезисы, цитаты, конспект.

План – первооснова, каркас какой-либо письменной работы, определяющие последовательность изложения материала.

План является наиболее краткой и потому самой доступной и распространенной формой записей содержания исходного источника информации. По существу, это перечень основных вопросов, рассматриваемых в источнике. План может быть простым и развернутым. Их отличие состоит в степени детализации содержания и, соответственно, в объеме.

Преимущество плана состоит в следующем.

Во-первых, план позволяет наилучшим образом уяснить логику мысли автора, упрощает понимание главных моментов произведения.

Во-вторых, план позволяет быстро и глубоко проникнуть в сущность построения произведения и, следовательно, гораздо легче ориентироваться в его содержании.

В-третьих, план позволяет – при последующем возвращении к нему – быстрее обычного вспомнить прочитанное.

В-четвертых, с помощью плана гораздо удобнее отыскивать в источнике нужные места, факты, цитаты и т. д.

Выписки – небольшие фрагменты текста (неполные и полные предложения, отдельные абзацы, а также дословные и близкие к дословным записи об излагаемых в нем фактах), содержащие в себе квинтэссенцию содержания прочитанного.

Выписки представляют собой более сложную форму записей содержания исходного источника информации. По сути, выписки – не что иное, как цитаты, заимствованные из текста. Выписки позволяют в концентрированной форме и с максимальной точностью воспроизвести в произвольном (чаще последовательном) порядке наиболее важные мысли автора, статистические и датологические сведения. В отдельных случаях — когда это оправданно с точки зрения продолжения работы над текстом – вполне допустимо заменять цитирование изложением, близким к дословному. Тезисы – сжатое изложение содержания изученного материала в утвердительной (реже опровергающей) форме. Отличие тезисов от обычных выписок состоит в следующем. Во-первых, тезисам присуща значительно более высокая степень концентрации материала. Во-вторых, в тезисах отмечается преобладание выводов над общими рассуждениями. В-третьих, чаще всего тезисы записываются близко к оригинальному тексту, т. е. без использования прямого цитирования. Исходя из сказанного, нетрудно выявить основное преимущество тезисов: они незаменимы для подготовки глубокой и всесторонней аргументации письменной работы любой сложности, а также для подготовки выступлений на защите,

докладов и пр. Аннотация – краткое изложение основного содержания исходного источника информации, дающее о нем обобщенное представление. К написанию аннотаций прибегают в тех случаях, когда подлинная ценность и пригодность исходного источника информации исполнителю письменной работы окончательно неясна, но в то же время о нем необходимо оставить краткую запись с обобщающей характеристикой. Для указанной цели и используется аннотация. Характерной особенностью аннотации наряду с краткостью и обобщенностью ее содержания является и то, что пишется аннотация всегда после того, как (хотя бы в предварительном порядке) завершено ознакомление с содержанием исходного источника информации. Кроме того, пишется аннотация почти исключительно своими словами и лишь в крайне редких случаях содержит в себе небольшие выдержки оригинального текста. Резюме – краткая оценка изученного содержания исходного источника информации, полученная, прежде всего, на основе содержащихся в нем выводов. Резюме весьма сходно по своей сути с аннотацией. Однако, в отличие от последней, текст резюме концентрирует в себе данные не из основного содержания исходного источника информации, а из его заключительной части, прежде всего выводов. Но, как и в случае с аннотацией, резюме излагается своими словами – выдержки из оригинального текста в нем практически не встречаются. Конспект – сложная запись содержания исходного текста, включающая в себя заимствования (цитаты) наиболее примечательных мест в сочетании с планом источника, а также сжатый анализ записанного материала и выводы по нему. Для работы над конспектом следует: определить структуру конспектируемого материала, чему в значительной мере способствует письменное ведение плана по ходу изучения оригинального текста; в соответствии со структурой конспекта произвести отбор и последующую запись наиболее существенного содержания оригинального текста — в форме цитат или в изложении, близком к оригиналу; выполнить анализ записей и на его основе – дополнение записей собственными замечаниями, соображениями, "фактурой", заимствованной из других источников и т. п. (располагать

все это следует на полях тетради для записей или на отдельных листах-вкладках); завершить формулирование и запись выводов по каждой из частей оригинального текста, а также общих выводов.

Систематизация изученных источников позволяет повысить эффективность их анализа и обобщения. Итогом этой работы должна стать логически выстроенная система сведений по существу исследуемого вопроса.

Необходимо из всего материала выделить существующие точки зрения на проблему, проанализировать их, сравнить, дать им оценку.

Кстати, этой процедуре должны подвергаться и материалы из Интернета во избежание механического скачивания готовых текстов. В записях и конспектах студенту очень важно указывать названия источников, авторов, год издания. Это организует его, а главное, пригодится в последующем обучении. Безусловно, студент должен взять за правило активно работать с литературой в библиотеке не только СКФУ, но и в других, библиотеках, используя, в том числе, их компьютерные возможности (электронная библиотека в сети Интернет).

Методические рекомендации по подготовке к семинарским занятиям, зачетам, экзаменам.

Приступая к изучению новой учебной дисциплины, студенты должны ознакомиться с учебной программой, учебной, научной и методической литературой, имеющейся в библиотеке СКФУ, получить в библиотеке рекомендованные учебники и учебно-методические пособия, завести новую тетрадь для конспектирования лекций и работы с первоисточниками.

Помимо учебной, научной литературы студентами должны активно использоваться хрестоматии – сборники текстов, иллюстрирующих содержание учебника, а также словари, справочники. В хрестоматиях собраны материалы, которые позволяют расширить кругозор. При подготовке к семинарским занятиям, зачетам, экзаменам следует в полной мере использовать академический курс учебника, рекомендованного преподавателем. Они дают более углубленное представление о проблемах, получивших систематическое из-

ложение в учебнике. Работа с хрестоматией позволит студенту самостоятельно изучить документы, фрагменты источников, другие произведения, разъясняющие сущность изучаемого вопроса.

Основными функциями экзамена, зачета являются: обучающая, оценочная и воспитательная. Экзамены и зачеты позволяют выработать ответственность, трудолюбие, принципиальность. При подготовке к экзамену студент повторяет, как правило, ранее изученный материал. В этот период сыграют большую роль правильно подготовленные заранее записи и конспекты.