



Федеральное агентство по рыболовству  
БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ»  
**Калининградский морской рыбопромышленный колледж**

Утверждаю  
Заместитель начальника колледжа  
по учебно-методической работе  
А.И.Колесниченко

**ОП.07 ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**

Методическое пособие для выполнения самостоятельных работ  
по специальности

**26.02.05 Эксплуатация судовых энергетических установок**

**МО-26 02 05-ОП.07.ПЗ**

РАЗРАБОТЧИК

Учебно-методический центр

ЗАВЕДУЮЩИЙ ОТДЕЛЕНИЕМ

Никишин М.Ю.

ГОД РАЗРАБОТКИ

2024

ГОД ОБНОВЛЕНИЯ

2025

**СОДЕРЖАНИЕ**

Введение .....	3
Перечень практических заданий.....	8
Практическое занятие №1 №2 Расчет основных термодинамических процессов. Политропные процессы .....	9
Практическое занятие № 3 Условия применимости уравнения Бернулли – решение задач .....	11
Практическая работа №4 Сравнение циклов ДВС. Расчет цикла ДВС со смешанным подводом теплоты .....	14
Практическое занятие №5 № 6 Диаграммы водяных паров. Расчет сопла Лаваля .	21
Практическое занятие №7 Расчет теплообменных аппаратов. Расчет холодильника	24
Практическое занятие № 8 Расчет простого и сложного трубопроводов – расчетная работа .....	26
Используемые источники литературы.....	31

## ВВЕДЕНИЕ

Методические указания направлены на обеспечение высокого уровня организации и проведения практических занятий.

Данные методические указания являются инструктивным документом преподавателя при организации практических занятий.

Методические указания по проведению практических занятий составлены в соответствии со следующими нормативными документами:

- Порядок организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам среднего профессионального образования (с доп. и изм.), утвержденный приказом Министерства образования и науки РФ 14.06.2013 г. № 464;

- Федеральные государственные образовательные стандарты среднего профессионального образования по специальности;

- Учебный план по специальности, в котором определены последовательность изучения дисциплин, а также распределение учебного времени и форм контроля по семестрам;

- рабочая программа учебной дисциплины (профессионального модуля).

Рабочей программой учебной дисциплины предусмотрено проведение практических занятий.

Преподаватель перед проведением практических занятий обязан ознакомиться с данными методическими указаниями.

Целью проведения практических занятий является организация управляемой познавательной деятельности обучающихся в условиях, приближенных к реальным практическим условиям.

Задачи преподавателя при организации практических занятий, способствующие достижению дидактической цели:

- закрепление и расширение знаний обучающихся при решении конкретных практических задач;

- формирование у обучающихся потребности в поиске информации, необходимой для эффективного решения профессиональных задач;

- развитие познавательных способностей, самостоятельности мышления, творческой активности обучающихся;

- выработка способности логического осмысления самостоятельно полученных данных;
- обеспечение рационального сочетания коллективной и индивидуальной форм обучения.

Обязанности преподаватели при проведении практического (лабораторного) занятия:

- перед проведением практических (лабораторных) занятий преподаватель обязан ознакомить обучающихся с техникой безопасности и осветить предполагаемые риски;
- преподаватель обязан ознакомить обучающихся с тренажером и его оборудованием до начала практических занятий и оценить знания;
- преподаватель обязан провести достаточный инструктаж и обозначить внешнюю и внутреннюю мотивацию для достижения целей подготовки в соответствии с уровнем компетентности обучающихся на занятии;
- преподаватель обязан обеспечить в ходе занятия эффективное наблюдение за деятельностью обучающихся, сопровождение речевым контактом, а также индивидуальную оценку их компетенций;
- преподаватель обязан изучить требования к результатам освоения дисциплины («уметь», «знать»).

Проведение практических занятий должно способствовать формированию у обучающихся общих и профессиональных компетенций:

*Общие компетенции:*

ОК 01. Выбирать способы решения задач профессиональной деятельности применительно к различным контекстам.

ОК 02. Использовать современные средства поиска, анализа и интерпретации информации, и информационные технологии для выполнения задач профессиональной деятельности.

ОК 03. Планировать и реализовывать собственное профессиональное и личностное развитие, предпринимательскую деятельность в профессиональной сфере, использовать знания по финансовой грамотности в различных жизненных ситуациях.

ОК 04. Эффективно взаимодействовать и работать в коллективе и команде.

ОК 05. Осуществлять устную и письменную коммуникацию на государственном языке Российской Федерации с учетом особенностей социального и культурного контекста.

ОК 06. Проявлять гражданско-патриотическую позицию, демонстрировать осознанное поведение на основе традиционных общечеловеческих ценностей, в том числе с учетом гармонизации межнациональных и межрелигиозных отношений, применять стандарты антикоррупционного поведения.

ОК 07. Содействовать сохранению окружающей среды, ресурсосбережению, применять знания об изменении климата, принципы бережливого производства, эффективно действовать в чрезвычайных ситуациях.

ОК 09. Пользоваться профессиональной документацией на государственном и иностранном языках.

*Профессиональные компетенции:*

ПК 1.1. Обеспечивать техническую эксплуатацию главных энергетических установок судна, вспомогательных механизмов и связанных с ними систем управления.

ПК 1.2. Осуществлять контроль выполнения национальных и международных требований по эксплуатации судна.

ПК 1.3. Выполнять техническое обслуживание и ремонт судового оборудования.

ПК 1.4. Осуществлять выбор оборудования, элементов и систем оборудования для замены в процессе эксплуатации судов.

ПК 1.5. Осуществлять эксплуатацию судовых технических средств в соответствии с установленными правилами и процедурами, обеспечивающими безопасность операций и отсутствие загрязнения окружающей среды.

ПК 3.1. Планировать работу структурного подразделения.

ПК 3.2. Руководить работой структурного подразделения.

ПК 3.3. Анализировать процесс и результаты деятельности структурного подразделения.

## **Структура проведения практического (лабораторного) занятия**

### **1. Вводная часть:**

- организационный момент;
- мотивация учебной деятельности;

*Документ управляется программными средствами 1С: Колледж  
Проверь актуальность версии по оригиналу, хранящемуся в 1С: Колледж*

- сообщение темы, постановка целей;
- актуализация знаний.

## **2. Основная часть:**

- инструктаж по технике безопасности (при необходимости);
- выдача задания;
- определение алгоритма проведения эксперимента или другой практической деятельности;
- допуск к выполнению работы;
- осуществления эксперимента или другой практической деятельности;
- ознакомление со способами фиксации полученных результатов.

### *Самостоятельное выполнение практического задания обучающимися:*

- определение путей решения поставленной задачи;
- выработка последовательности выполнения необходимых действий;
- проведение эксперимента (выполнение заданий, задач, упражнений);
- составление отчета;
- обобщение и систематизация полученных результатов (таблицы, графики, схемы и т.п.).

## **3. Заключительная часть:**

- подведение итогов занятия: анализ хода выполнения и результатов работы обучающихся;
- выявление возможных ошибок и определение причин их возникновения;
- защита выполненной работы.

*В ходе практического (лабораторного) занятия, преподавателем непрерывно должно осуществляться педагогическое руководство обучающимися:*

- четкая постановка познавательной задачи;
- инструктаж к работе (осмысление обучающимися сущности задания, последовательности его выполнения);
- проверка теоретической и практической готовности обучающихся к занятию;
- выделение возможных затруднений в процессе работы;
- установка на самоконтроль;
- наблюдение за действиями обучающихся, регулирование темпа работы, помощь (при необходимости), коррекция действий, проверка промежуточных результатов.

Формулировка задания должна быть однозначно понятна обучающемуся.

При организации проведения практических занятий необходимо *использовать активные и интерактивные формы:*

*Активные формы:*

*творческие задания* – это задания, которые требуют от обучающихся не простого воспроизводства информации, а творчества, поскольку задания содержат большой или меньший элемент неизвестности и имеют, как правило, несколько подходов;

*работа в малых группах* – способ организации образовательного процесса, позволяющий всем обучающимся участвовать в работе, практиковать навыки сотрудничества, межличностного общения (в частности, умение активно слушать, выработать общее мнение, разрешать возникающие разногласия).

*дискуссия* – действенный метод обсуждения изучаемого вопроса. Дискуссия предполагает коллективное обсуждение какой-либо спорной проблемы, во время которого познается истина.

*Интерактивные формы* предполагают взаимодействие между преподавателем и обучающимся в соответствии с индивидуализированным подходом (тренинги, *кейс-стади*, «дерево решений», «анализ казусов» и др.).

*Тренинги* – это процесс получения навыков и умений в какой-либо области посредством выполнения последовательных заданий, действий или игр, направленных на достижение наработки и развития требуемого навыка;

*Кейс-стади* – техника обучения, использующая описание реальных ситуаций.

В ходе реализации практических работ преподаватель должен использовать наряду с традиционными инновационные технологии и методы обучения (технология развития критического мышления, «мозговой штурм», метод проектов, технология проблемного обучения, технология опережающего обучения, технология программированного обучения и др.).

Уровень освоения учебного материала по результатам практических работ соответствует «2» или «3», в зависимости от содержания работы.

2 уровень *репродуктивный* – регулятивная или процессуальная деятельность, связанная с выполнением заданий на процесс или решение задач;

МО-26 02 05-ОП.07.ПЗ	КМРК БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ»	
	ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА	С.8/31

3 уровень *продуктивный* – аналитическая или творческая деятельность, связанная с выполнением задания повышенного уровня, например, творческая практическая работа над проектом.

### Перечень практических заданий

№ п/п	Темы практических занятий	Кол-во часов
1.	Решение задач по расчетам теплоемкостей газов.	2
2.	Анализ термодинамических процессов. Политропные процессы.	2
3	Решение задач по расчету основных параметров многоступенчатого компрессора	2
4.	Сравнение циклов ДВС. Анализ работы цикла ДВС со смешанным подводом теплоты.	2
5.	Исследования по проверки топлива на наличие воды, мех. примесей .	2
6.	Диаграммы водяных паров. Расчет сопла Лаваля.	2
7	Расчет теплообменных аппаратов. Расчет холодильника.	2
8.	Расчет простого и сложного трубопроводов.	2
<b>Итого</b>		<b>16</b>

## 1 ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ И ТЕПЛОТЕХНИКИ

### Практическое занятие №1 №2 Расчет основных термодинамических процессов. Политропные процессы

#### *Цель работы:*

Закрепление темы «Первое начало термодинамики. Основные термодинамические процессы» - решением задач, анализ термодинамических процессов.

ОК 01-07,09, ПК 1.1-1-5, ПК 3.1-3.3.

#### *Порядок выполнения работы:*

1. Заполнение таблицы (основные термодинамические процессы).
2. Сравнение термодинамических процессов в рабочей диаграмме.
3. Анализ адиабатных процессов.
4. Анализ политропных процессов.
5. Решение задач.

#### *Методические указания.*

Необходимо усвоить научные определения энергии: теплота, внутренняя энергия, работа. Рассматривать P-V систему координат как рабочую.

Первый закон термодинамики – это частный случай закона сохранения энергии, открытого М.В. Ломоносовым. Аналитическое выражение первого закона термодинамики  $Q_{12}=U_2 - U_1 + L_{12}$ . Ввести понятие: энтальпия. Кроме простых параметров, состояние газа характеризуется сложными параметрами, к которым относятся внутренняя энергия газа и энтальпия. Связь между 1 и 2 законами термодинамики.

При исследовании основных термодинамических процессов следует руководствоваться следующей схемой:

1. Уравнение процесса.
2. Зависимость между параметрами.
3. Изображение процесса в P-V диаграмме.
4. Изменение внутренней энергии.
5. Работа изменения объема и работа изменения давления.

6. Формула для определения количества тепла, подводимого или отводимого от рабочего тела в процессе.

7. Анализ уравнения первого начала термодинамики.

*Рекомендуется следующий порядок решения задач:*

1. Краткая запись задачи, перевод в систему СИ. Это позволяет проанализировать условие задачи, понять физическую сущность, продумать ход решения (правильная краткая запись задачи уже 50% решения задачи).

2. Выбор расчетных уравнений сопровождается рассуждениями. Задачу целесообразно решать по этапам, т.к. получаемые при этом промежуточные ответы дают представление о значении и размерностях входящих в условие задачи величин.

3. После того как задача решена, необходимо критически анализировать результат решения, т.е. оценить его правдоподобность, а также выяснить, как изменился бы количественный результат, если бы изменились данные задачи.

*Контрольные вопросы.*

1. Провести исследование каждого термодинамического процесса.
2. Почему работа изменения объема в изохорном процессе равна нулю?
3. Почему при изотермическом расширении газа к нему необходимо подводить тепло, а при изотермическом сжатии – отводить?
4. Почему при адиабатном расширении температура газа понижается, а при адиабатном сжатии повышается?
5. Что такое энтальпия газа?
6. В чем выражается связь между первым и вторым законами термодинамики?

*Использованные источники:* [1]; [2]; [3].

## ОСНОВНЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ – ЗАДАЧИ

1. В пусковом баллоне двигателя находится смесь при давлении 24 бара и температуре 500 К. Найти давление в баллоне при остывании смеси до 15°C и количество выделившейся при этом теплоты. Смесь принять как двухатомный газ с постоянной теплоемкостью  $c_v = 770$  Дж/кг К.

2.  $0,7\text{ м}^3$  воздуха при давлении  $0,5\text{ МПа}$  и температуре  $25^\circ\text{C}$  подогреваются при постоянном давлении до  $175^\circ\text{C}$ . Найти работу, изменение внутренней энергии и внешнюю теплоту (теплоемкость постоянная).

3. Сжатый воздух при давлении  $5\text{ МПа}$  и температуре  $400^\circ\text{C}$  адиабатно расширяется до давления  $1,5\text{ МПа}$ . Во сколько раз должен увеличиться его объем и какова будет конечная температура. Показатель адиабаты  $1,41$ .

4. Газ сжимается политропно от давления  $1\text{ МПа}$  и объема  $6\text{ м}^3$  до давления  $4\text{ МПа}$  и объема  $2\text{ м}^3$ . Найти показатель политропы и внешнюю работу.

5. В компрессоре сжимается  $2\text{ кг}$  воздуха при постоянной температуре  $200^\circ\text{C}$  от давления  $0,2\text{ МПа}$  до  $1\text{ МПа}$ . Найти необходимое количество теплоты, которое нужно отвести от воздуха, для сохранения температуры постоянной.

6. Сколько теплоты нужно сообщить при постоянном объеме  $1\text{ кг}$  газовой смеси, сжатой в цилиндре двигателя от давления  $1,2\text{ МПа}$  и температуры  $390^\circ\text{C}$ , чтобы давление после этого достигло  $4\text{ МПа}$ . Теплоемкость есть величина постоянная  $c_v = 756\text{ Дж/кг К}$ .

7.  $3\text{ м}$  воздуха при давлении  $0,2\text{ МПа}$  и температуре  $25^\circ\text{C}$  подогреваются при постоянном давлении до температуры  $225^\circ\text{C}$ . Найти работу, изменение внутренней энергии и внешнюю теплоту. Теплоемкость постоянная ( $c_p = 1,008\text{ КДж/кг C}$ ).

8.  $0,01\text{ кг}$  воздуха при давлении  $40\text{ бар}$  изотермически расширяется в цилиндре с подвижным поршнем до давления  $3\text{ бара}$ . Найти конечный объем, конечную температуру, работу, произведенную газом и подведенное тепло.

9.  $1\text{ кг}$  воздуха при давлении  $1\text{ МПа}$  и температуре  $30^\circ\text{C}$  адиабатно сжимается до  $10\text{ МПа}$ . Найти работу сжатия и изменение внутренней энергии. Показатель адиабаты  $K=1,41$ .

10. Требуется сжать  $1,5\text{ м}^3$  воздуха от давления  $0,1\text{ МПа}$  и температуры  $17^\circ\text{C}$  до давления  $0,7\text{ МПа}$  и температуры  $100^\circ\text{C}$ . Найти показатель политропы и работу сжатия.

*Использованные источники: [1]; [2]; [4].*

### **Практическое занятие № 3 Условия применимости уравнения Бернулли – решение задач**

*Цель занятия:*

Закрепление темы, решение задач. ОК 01-07,09, ПК 1.1-1-5, ПК 3.1-3.3.

*Порядок выполнения задания:*

1. Вывести уравнение Бернулли для объемных гидроприводов.
2. Прочитать задание. Составить или прочитать схему.
3. Составить уравнение Бернулли с учетом условия задачи.
4. Ввести справочные данные.
5. Произвести необходимые расчеты.

*Методические указания:*

Изучение темы начинается с понятия об удельной энергии потока жидкости. Итак, удельная потенциальная энергия потока жидкости, находящаяся в потоке, равна гидростатическому напору и для всех точек рассматриваемого объема жидкости одинакова. Вводятся понятия: удельная потенциальная энергия положения, удельная потенциальная энергия давления, удельная кинетическая энергия скоростного напора. Единицей измерения этих величин в системе СИ является 1 м.

Основным уравнением гидродинамики является уравнение Бернулли, которое устанавливает связь между скоростью движения и давлением жидкости при установившемся движении.

Сначала рассматривается уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости. Энергетическая сущность данного уравнения заключается в том, что оно выражает закон сохранения энергии элементарной струйки. Полная удельная энергия элементарной струйки есть величина постоянная для всех рассматриваемых сечений, хотя удельная кинетическая энергия в различных сечениях может быть различной. Гидродинамический напор есть сумма трёх высот: геометрической, пьезометрической (манометрической) и высоты скоростного напора.

Расчётным уравнением является уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости есть уравнение баланса удельной энергии с учетом потерь. Энергия теряется жидкостью, но не исчезает бесследно, а лишь превращается в тепловую. Рассматриваются полные потери напора. Определяется режим движения жидкости.

*Контрольные вопросы:*

1. Дайте определение установившегося и неустановившегося, равномерного и неравномерного движения.
2. Формулировка и значение уравнения неразрывности потока жидкости.
3. Какие существуют режимы движения жидкости?
4. Что называется числом Рейнольдса? Каково значение критического числа Рейнольдса?
5. Что такое полная удельная энергия потока?
6. Уравнение Бернулли для реальной жидкости: каковы его смысл и значение. Какова размерность величин, входящих в это уравнение?
7. Расчетные формулы для определения потерь напора по длине и местных потерь. Как учитывается полная потеря напора в круглой трубе?
8. В чем заключается сущность гидравлического удара? Какими методами можно снизить величину ударного давления?
9. Что называется кавитацией жидкости? Какие меры рекомендуется применять для предотвращения кавитации жидкости в насосах?

*Задания к практическому занятию:*

ВАРИАНТ № 1

Определить режим течения жидкости вязкостью  $20 \text{ мм}^2/\text{с}$  в круглой трубе диаметром  $10 \text{ мм}$  для двух случаев: при расходе жидкости  $12,5 \text{ л/мин}$  и  $40 \text{ л/мин}$ .

ОТВЕТ: ламинарный и турбулентный.

ВАРИАНТ № 2

Нефть с кинематическим коэффициентом вязкости  $0,3 \text{ см}^2/\text{с}$  движется по трубопроводу. С каким расходом нефть будет двигаться по трубе диаметром  $150 \text{ мм}$  при числе Рейнольдса  $Re = 5000$ ?

ОТВЕТ:  $17,5 \text{ л/с}$ .

ВАРИАНТ №3

По трубопроводу диаметром  $100 \text{ мм}$  движется масло с коэффициентом кинематической вязкости  $0,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$  при температуре  $15^\circ\text{C}$ . Определить режим движения масла при скорости  $0,5 \text{ м/с}$ .

ОТВЕТ: режим движения - ламинарный (доказать).

*Использованные источники: [1]; [2]; [4].*

## Практическая работа №4 Сравнение циклов ДВС. Расчет цикла ДВС со смешанным подводом теплоты

### *Цель работы:*

Сравнить циклы ДВС в T-S координатах. ОК 01-07,09, ПК 1.1-1-5, ПК 3.1-3.3.

### *Методические указания:*

Процессы, по которым работают двигатели внутреннего сгорания, являются необратимыми. Поэтому в термодинамике рассматриваются термодинамические циклы, состоящие из обратимых процессов, которые могут подвергаться термодинамическим исследованиям.

В зависимости от способа подвода теплоты к рабочему телу рассматриваются следующие термодинамические циклы ДВС:

1. Цикл с изохорным подводом теплоты (цикл ОТТО), который является идеальным циклом для карбюраторных двигателей.
2. Цикл с изобарным подводом теплоты (цикл ДИЗЕЛЯ).
3. Цикл со смешанным подводом теплоты (цикл ТРИНКЛЕРА), который является идеальным циклом широко распространённых двигателей внутреннего сгорания – бескомпрессорных двигателей.

Для наглядности принимается T-S система координат. Берутся, условия:

- при одинаковых степенях сжатия и разных максимальных давлениях и температурах;
- при разных степенях сжатия, и одинаковых максимальных давлениях и температурах.

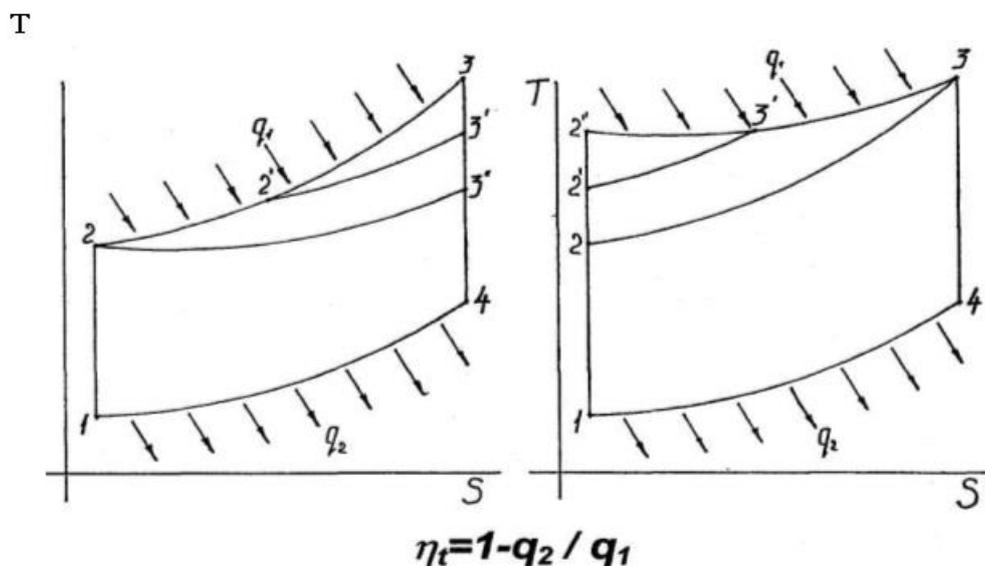
### *Следует знать:*

1. T-S система координат - тепловая (площадь фигуры, ограниченная линией процесса подвода теплоты и осью энтропии есть удельная подводимая теплота).
2. Второй закон термодинамики - расчетное уравнение термического к.п.д. для любой тепловой машины.
3. Циклы ДВС в T-S координатах.

При указанных условиях, циклы ДВС в T-S координатах совмещаются. Производится сравнение термических КПД.

## Сравнение термодинамических циклов ДВС

*Документ управляется программными средствами 1С: Колледж  
Проверь актуальность версии по оригиналу, хранящемуся в 1С: Колледж*



12341 – цикл с изохорным подводом  
 теплоты

123<sup>1</sup>41 – цикл с изобарным подводом  
 теплоты

122<sup>1</sup>3<sup>1</sup>41 – цикл со смешанным подво-  
 дом теплоты

$$q_1^p < q_1^{см} < q_1^v$$

$$\eta_t^p < \eta_t^{см} < \eta_t^v$$

При одинаковой степени сжатия и разном  
 максимальном давлении и температуре,  
 термический к.п.д. изохорного цикла выше  
 чем у циклов со смешанным и изобарным  
 подводом теплоты.

12341 – цикл с изохорным подводом  
 теплоты

12<sup>1</sup>1'3'41 – цикл с изобарным подво-  
 дом теплоты

12<sup>1</sup>3<sup>1</sup>3'41 – цикл со смешанным под-  
 водом теплоты

$$q_1^p > q_1^{см} > q_1^v$$

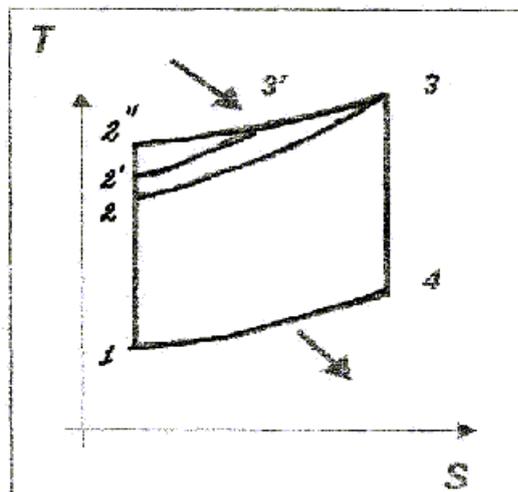
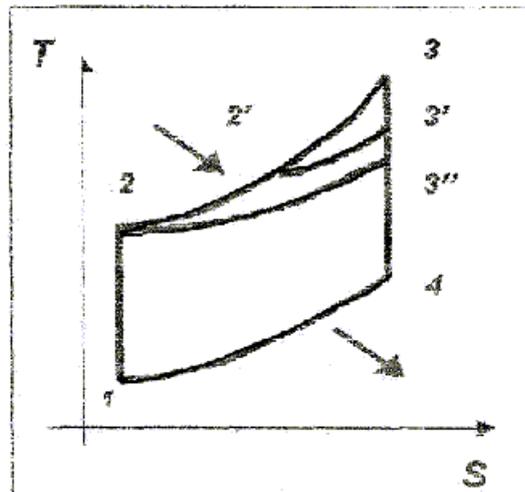
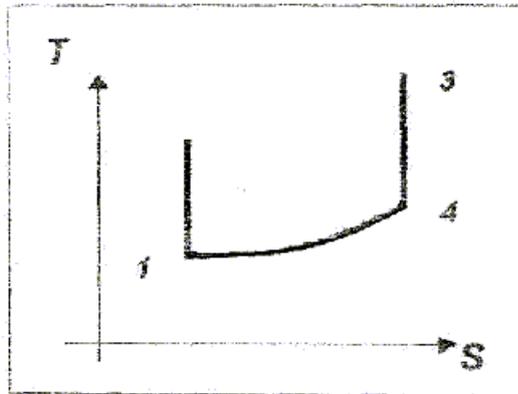
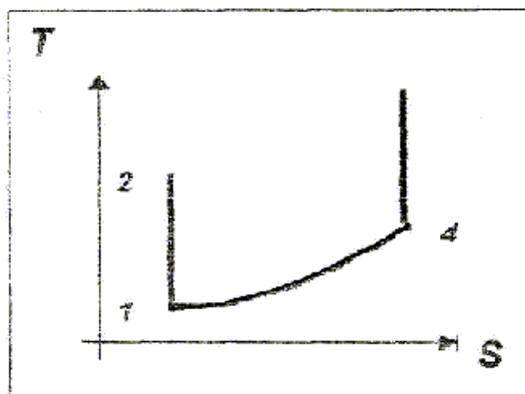
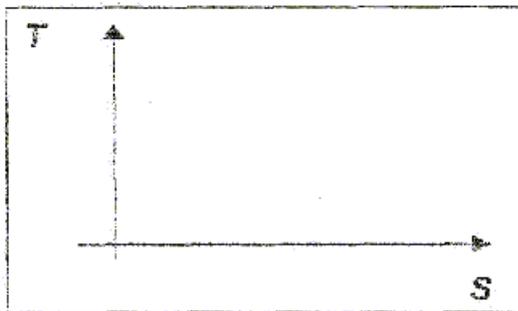
$$\eta_t^p > \eta_t^{см} > \eta_t^v$$

При разных степенях сжатия и оди-  
 наковом максимальном давлении и  
 температуре, термический к.п.д. цик-  
 ла с изобарным подводом теплоты  
 выше чем у циклов со смешанным  
 и изохорным подводом теплоты.

Сравнение термодинамических циклов ДВС

При одинаковых степенях сжатия

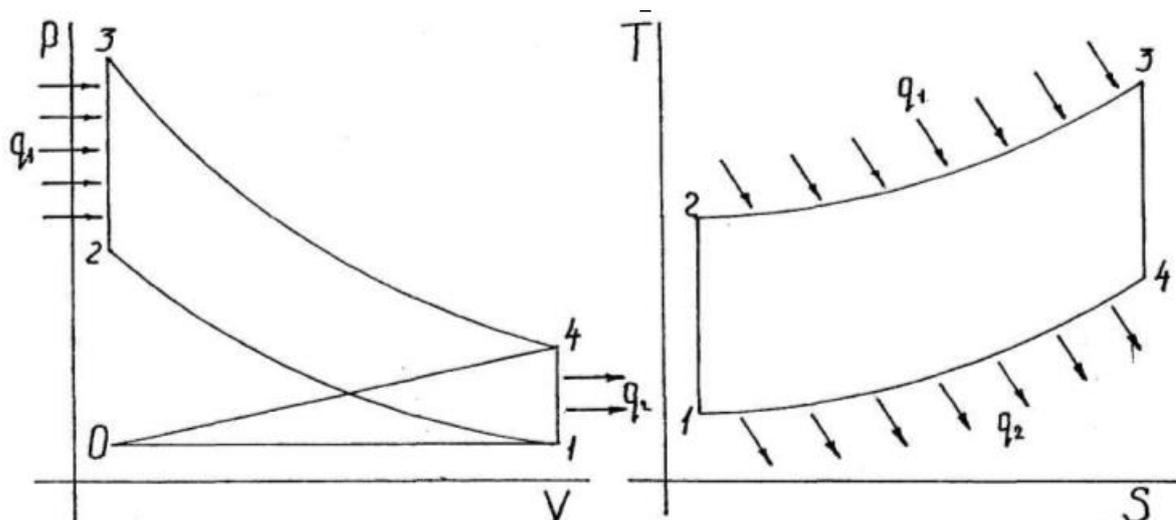
При разных степенях сжатия



$$T_{2t}^V > T_{2t}^{cm} > T_{2t}^P$$

$$T_{2t}^P > T_{2t}^{cm} > T_{2t}^V$$

Термодинамический цикл ДВС с изохорным подводом теплоты. Цикл Отта.



0 - 1 – линия всасывания

1 – 2 – адиабатное сжатие

2 – 3 – изохорный подвод теплоты (процесс горения)

3 – 4 – адиабатное расширение (рабочий ход)

4 – 1 – изохорный отвод теплоты (выпуск)

4 – 0 – линия выпуска

$\varepsilon = V_1 / V_2$  – степень сжатия

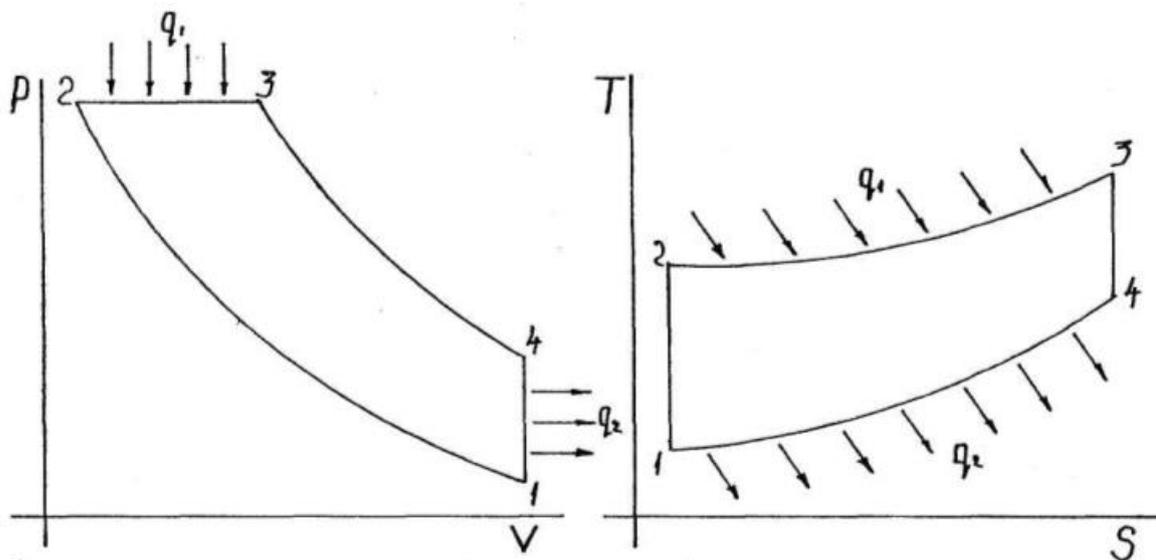
$\lambda = P_3 / P_2$  – степень повышения давления

$\eta_i^V = 1 - 1/\lambda^{k-1}$  – термический к.п.д. двигателя

Термический к.п.д. данного двигателя будет увеличиваться если будет увеличиваться степень сжатия.

Увеличение степени сжатия более 9 приводит к взрывному горению (детонации). Ограничение степени сжатия определяется конечной температурой в процессе сжатия.

Термодинамический цикл ДВС с изобарным подводом теплоты. Цикл Дизеля.



- 1 – 2 – адиабатное сжатие воздуха
- 2 – 3 – изобарный подвод теплоты
- 3 – 4 – адиабатное расширение
- 4 – 1 – изохорный отвод теплоты

$\epsilon = V_1 / V_2$  – степень сжатия

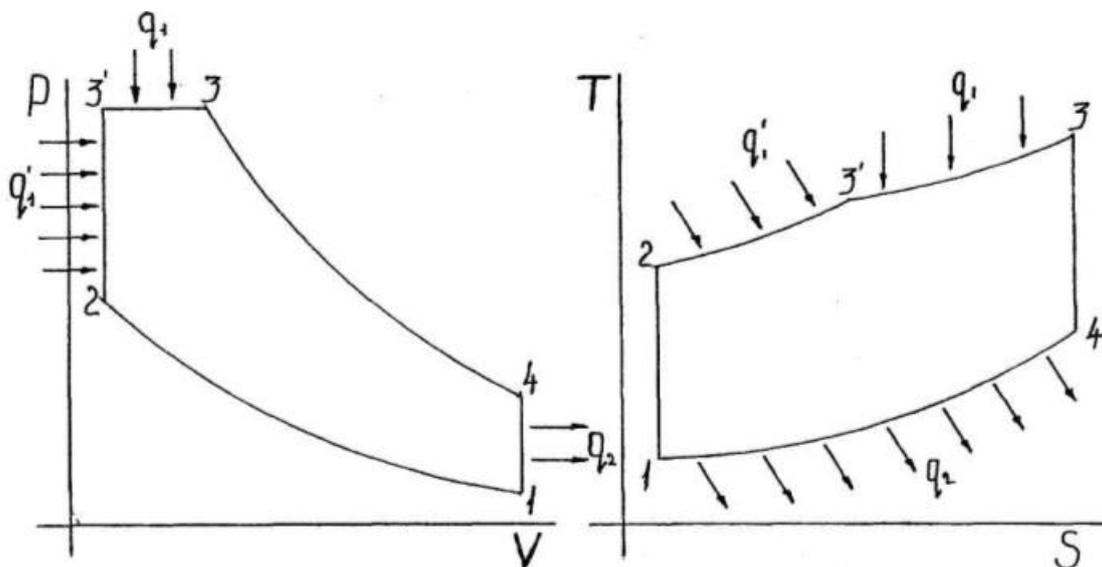
$\rho = V_3 / V_2$  – степень предварительного расширения

$\eta_i^p = 1 - (\rho^k - 1) / \epsilon^{k-1} (\rho - 1)$

Термический к.п.д. данного двигателя будет увеличиваться если увеличить степень сжатия и уменьшить степень предварительного расширения.

Термодинамический цикл ДВС со смешанным подводом теплоты.

Цикл Тринклера.



- 1 – 2 – адиабатное расширение

2 – 3<sup>1</sup> – изохорный подвод теплоты

3<sup>1</sup> – 3 – изобарный подвод теплоты

3 – 4 – адиабатное расширение

4 – 1 – изохорный отвод теплоты

$\varepsilon = V_1 / V_2$  – степень сжатия

$\lambda = P_3 / P_2$  – степень повышения давления

$\rho = V_3 / V_2$  – степень предварительного расширения

$\eta_i^p = 1 - 1 / \varepsilon^{k-1} * \lambda \rho^k - 1 / \lambda - 1 + k \lambda (\rho - 1)$ , где  $k = 1,41$  – постоянная адиабаты

Термический к.п.д. данного двигателя увеличится, если увеличить степень сжатия и степень повышения давления, а степень предварительного расширения – понизить.

*Порядок выполнения работы:*

1. Рассмотреть принцип работы циклов.
2. Показать циклы в P-V и T-S координатах.
3. Ввести основные характеристики работы двигателя.
4. Рассчитать зависимость термического КПД циклов ДВС и ГТУ от основных характеристик двигателя.
5. Решение задач.

*Контрольные вопросы.*

1. Какие упрощения допускаются при расчете по реальным циклам?
2. Что значит цикл ДВС с быстрым сгоранием топлива?
3. Зависимость термического КПД от основных характеристик двигателя.
4. Цикл ДВС с изохорным подводом теплоты в P-V и T-S координатах.
5. Цикл ДВС с изобарным подводом теплоты в P-V и T-S координатах.
6. Цикл ДВС со смешанным подводом теплоты в P-V и T-S координатах.
7. Цикл ГТУ с изобарным подводом теплоты в P-V и T-S координатах.

*Использованные источники:* [1]; [2]; [3].

ЦИКЛЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ – ЗАДАЧИ

1. Как изменится термический коэффициент полезного действия двигателя внутреннего сгорания с изохорным подводом теплоты, если степень сжатия

увеличится от 6 до 12. показатель адиабаты принять 1,37. Цикл показать в P-V и T-S координатах.

2. Определить термический КПД двигателя внутреннего сгорания с изохорным подводом теплоты и его наибольшую температуру, если начальное давление 0,1 МПа, начальная температура 17°C, степень сжатия 4, степень повышения давления 3,5; показатель адиабаты 1,41; теплоемкость постоянная  $C_v=0,72$  КДж/кг К.

3. Найти полезную работу и термический КПД в цикле ДВС с изобарным подводом теплоты, если дано: начальное давление 0,1 МПа температура 17°C, степень сжатия 14, степень предварительного расширения 1,8; показатель адиабаты 1,41.

4. Определить термический КПД цикла двигателя внутреннего сгорания с изохорным подводом теплоты, если начальная температура 20°C, а конечная температура сжатия 217°C.

5. Для цикла ДВС со смешанным подводом теплоты дано рабочее тело – воздух, начальное давление 0,1 МПа температура 27°C, степень сжатия 14, степень повышения давления 1,5 степень предварительного расширения 1,7. Определить термический КПД и параметры характерных точек.

6. Температура воспламенения топлива в цикле ДВС с изобарным подводом теплоты равна 787°C. Найти минимально необходимое значение степени сжатия, если начальная температура воздуха 50°C. Сжатие считать адиабатным ( $\kappa = 1,41$ ).

7. Вычислить наивысшие давление и температуру рабочего тела в цикле ДВС с изохорным подводом теплоты, если начальное давление 0,1 МПа, температура 17°C, степень сжатия равна 6. Количество подведенной теплоты 800 КДж/кг.

8. Определить термически КПД цикла ДВС с изобарным подводом теплоты, если известны начальная температура 40°C, температура в конце сжатия 600°C температура в конце расширения газов 270°C. Определить также термический КПД цикла Карно, осуществленного в том же интервале предельных температур. Показатель адиабаты 1.41.

9. В цикле поршневого двигателя с изохорным подводом теплоты степень сжатия равна 5. Степень повышения давления 1,5. Определить термический КПД цикла и полезную работу, если начальное давление 100 КПа, начальная температура 400 К.

10. Определить параметры узловых точек цикла ДВС с изохорным подводом

теплоты, если дано начальное давление 0,1 МПа, начальная температура 17°C, степень сжатия 4, степень повышения давления 3,5; показатель адиабаты 1,41.

*Использованные источники:* [1]; [2]; [4].

### **Практическое занятие №5 № 6 Диаграммы водяных паров. Расчет сопла Лавалья**

*Цель работы:*

Изучить диаграммы водяных паров. ОК 01-07,09, ПК 1.1-1-5, ПК 3.1-3.3.

*Порядок выполнения работы:*

1. Изучение P-V, T-S, h-S диаграмм водяных паров.
2. Нахождение параметров состояния пара по h-S диаграмме.
3. Процессы истечения и дросселирования – решение задач с использованием h-S диаграммы водяных паров.

*Методические указания:*

Пары – это реальные газы, состояния которых ближе к состоянию жидкости. В термодинамике паров большое место занимают опытные данные. Кроме того, первый и второй законы термодинамики полностью относятся к парам. В качестве рабочего тела используется перегретый пар. Свойства перегретого пара соответствуют состоянию идеального газа тем больше, чем выше степень перегрева. Особое внимание следует обратить на состояние пара, на образование пограничных кривых. Надо знать критические параметры водяного пара, параметры тройной точки воды. Изучая процесс парообразования, нужно уметь пользоваться h-S диаграммой водяного пара. Дополнительно используются таблицы насыщенного и перегретого водяного пара.

*Контрольные вопросы.*

1. Что такое процесс парообразования?
2. В чем разница между процессами испарения и кипения жидкости?
3. Что такое критическая точка и тройная точка воды?
4. Рассмотреть состояния водяного пара.
5. Какой пар используется в качестве рабочего тела, почему?
6. Рассмотреть цикл паротермодинамической установки с учетом принципа работы

## ВОДЯНОЙ ПАР – ЗАДАЧИ

1. Влажный пар с параметрами: давление 1,7 МПа и степень сухости 0,9 вытекает в среду с давлением 1,1 МПа. Определить теоретическую скорость при адиабатном истечении пара процесс представить в  $h - S$  координатах.

2. Как велика теоретическая скорость истечения пара через сопло Лавалья, если давление пара 1,5 МПа температура 400°C, а противодействие 0,004 МПа.

3. Влажный пар с параметрами: давление 25 атм. и степень сухости 0,97 вытекает в среду с давлением 11 атм. Площадь выходного сечения сопла 20 мм<sup>2</sup>. Определить теоретическую скорость при адиабатном истечении пара и его секундный расход.

4. 1 кг перегретого водяного пара с давлением 10 МПа и температурой 530°C сначала дросселируется в вентиле до промежуточного давления 0,3 МПа, а затем опять расширяется адиабатно в паровой турбине до конечного давления 0,005 МПа. Определит параметры пара за вентилем, увеличение энтропии и теплоперепад при адиабатном расширении.

5. Влажный пар с параметрами: давление 20 атм., степень сухости 0,95 вытекает в среду с давлением 13 атм. Площадь выходного сечения сопла 20 мм<sup>2</sup>. Определить теоретическую скорость при адиабатном истечении пара и его секундный расход.

6. Как велика теоретическая скорость истечения пара через сопло Лавалья, если давление парс 15 атм., температура 370°C, а противодействие 0,06 атм.

7. 1 кг перегретого водяного пара с давлением 9 МПа и температурой 520°C поступает в паровую турбину, где адиабатно расширяется до конечного давления 0,005 МПа. При этом за счет изменения внешней кинетической энергии пар совершает работу численно равную изменению энтальпии. Определить параметры пара на выходе из турбины и теплоперепад при адиабатном расширении.

8. Влажный пар с параметрами: давление 1,7 МПа, степень сухости 0,93 вытекает в среду с давлением 1,1 МПа. Площадь выходного сечения сопла 20 мм<sup>2</sup>. Определить теоретически скорость при адиабатном истечении пара и его секундный расход.

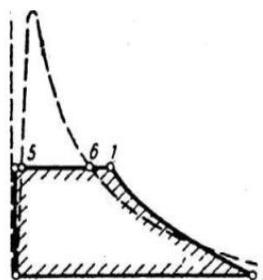
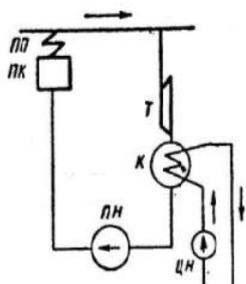
9. Как велика теоретическая скорость истечения пара через сопло Лавалья, если давление пар 1,4 МПа при температуре 300°C, а противодействие 0,06 МПа.

10. 1 кг перегретого водяного пара с давлением 5 МПа и температурой 380°C

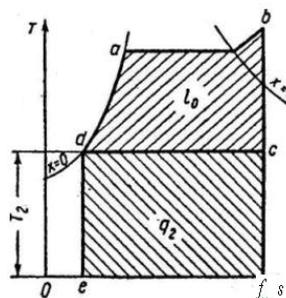
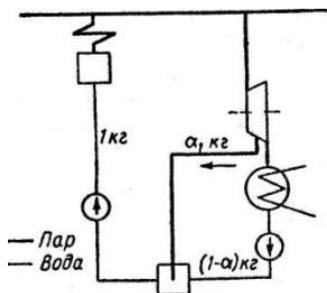
сначала дросселируется в вентиле до промежуточного давления 0,2 МПа, а затем расширяется адиабатно до конечного давления 0,004 МПа. Определить параметры пара за вентилем, увеличение энтропии и теплоперепад при адиабатном расширении.

ЦИКЛЫ ПАРОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК

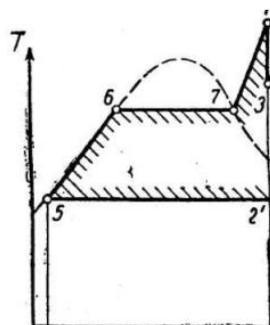
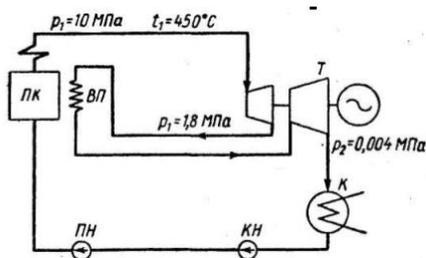
Цикл Ренкина

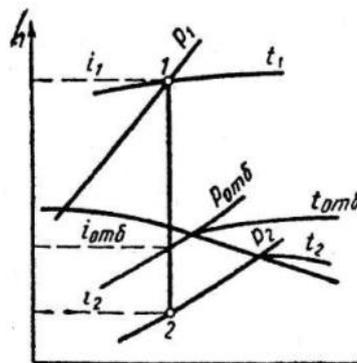
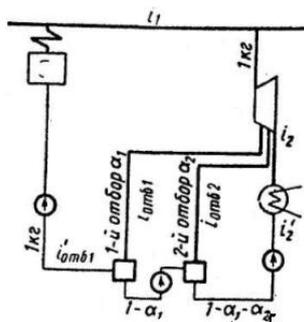


Регенеративный цикл



Вторичный перегрев пара





Примечание:  $\eta_t \uparrow$   $d \downarrow$  при  $\uparrow P_1$   $\uparrow T_1$   $\downarrow P_2$

Использованные источники: [1]; [2]; [3].

### Практическое занятие №7 Расчет теплообменных аппаратов. Расчет холодильника

*Цель работы:* Приобретение навыков в расчетах по определению площади теплообмена. ОК 01-07,09, ПК 1.1-1-5, ПК 3.1-3.3.

*Методические указания:*

Расчет теплообменных аппаратов

1. Уравнение теплопередачи

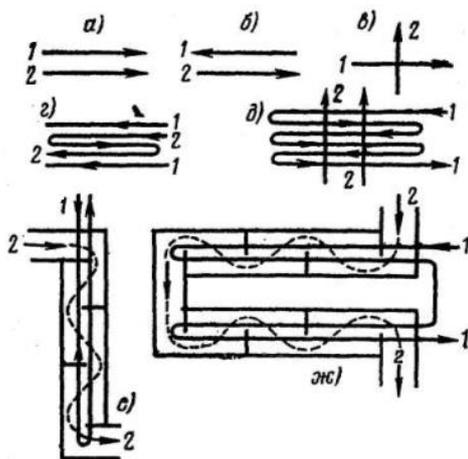
$$\Phi = K * S(t_1 - t_2) \rightarrow F = \frac{Q}{\Delta t} \rightarrow \bar{\Delta t} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{2,31g \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}}$$

2. Уравнения теплового баланса

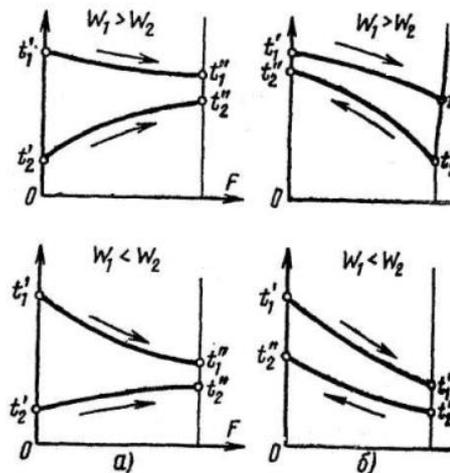
$$Q = m_{t_1} * \bar{c}_{p_1} (t_1' - t_1'')$$

$$Q = m_{t_2} * \bar{c}_{p_2} (t_2'' - t_2')$$

Схемы движения рабочих жидкостей  
в теплообменниках



Характер изменения температур  
рабочих жидкостей при прямо-  
токе (а) и противотоке (б)



### ТЕПЛОПЕРЕДАЧА – ЗАДАЧИ

1. Определить коэффициент теплопроводности кирпичной стенки толщиной 390 мм, если температура на внутренней поверхности стенки  $300^{\circ}\text{C}$ . Потери тепла через стенку  $178 \text{ Вт/м}^2$ .

2. Автомобильный радиатор передает от охлаждающей воды в окружающую среду  $40 \text{ КДж/с}$ . Средняя температура воды в радиаторе  $87^{\circ}\text{C}$ , теплорассеивающая поверхность радиатора  $5 \text{ м}^2$ . Определить коэффициент теплопередачи.

3. Определить температуру провода электронагревателя, если его диаметр и длина соответственно равны:  $d = 0,5 \text{ мм}$  и  $l = 2,5 \text{ м}$ . Степень черноты поверхности провода  $0,9$ , а температура окружающей среды  $15^{\circ}\text{C}$ . Мощность, потребляемая нагревателем  $0,4 \text{ кВт}$ . Конвективным теплообменом пренебречь.

4. Определить плотность теплового потока через плоскую стенку топки парового котла и температуру на поверхности стенки, если заданы: температура топочных газов  $1200^{\circ}\text{C}$ , температура воды в котле  $200^{\circ}\text{C}$ , коэффициенты теплоотдачи соответственно  $45 \text{ Вт/м}^2\text{C}$  и  $5000 \text{ Вт/м}^2\text{C}$ , толщина стенки  $14 \text{ мм}$ , коэффициент теплопроводности материала стенки  $58 \text{ Вт/м}^2\text{C}$ .

5. Определить поверхностную плотность потока излучения стенки с коэффициентом излучения  $4,53 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$ , если температура излучающей поверхности стенки  $1027^{\circ}\text{C}$ . Найти также степень черноты стенки.

6. Определить тепловой поток от газов к воздуху через кирпичную обмуровку котла площадью  $120 \text{ м}^2$  и толщиной  $250 \text{ мм}$ , если температура газов  $600^\circ\text{C}$ , температура воздуха  $30^\circ\text{C}$ , коэффициент теплоотдачи от поверхности стенки к наружному воздуху  $9,3 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ , теплопроводность кирпичной обмуровки  $0,91 \text{ Вт/м К}$ . Найти также температуры на внутренней и наружной поверхности обмуровки.

7. В маслоохладителе температура масла понижается от  $59^\circ\text{C}$  до  $50^\circ\text{C}$ , а температура воды при этом повышается от  $9^\circ\text{C}$  до  $18^\circ\text{C}$ . Найти средний перепад температур при прямотоке. Построить график изменения температур теплообменника при прямотоке.

8. Определить плотность теплового потока через бетонную стенку толщиной  $300 \text{ мм}$ , если температуры на внутренней и наружной поверхности стенки равны  $15^\circ\text{C}$  и  $(-15^\circ\text{C})$ . Коэффициент теплопроводности бетона  $1 \text{ Вт/м}^\circ \text{ C}$ .

9. Определить толщину тепловой изоляции, если плотность теплового потока через изоляционный слой  $523 \text{ Вт/м}^2$ , температура его поверхностей  $700^\circ\text{C}$  и  $40^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности  $0,0303 \text{ Вт/м К}$ .

10. Определить, сколько теплоты передается ежечасно через стенки картера двигателя. Толщина стенок  $5,5 \text{ мм}$ , площадь поверхности стенок  $0,6 \text{ м}^2$ , температура внутренней поверхности  $75^\circ\text{C}$ , наружной  $-68^\circ\text{C}$ , а средний коэффициент теплопроводности стенок  $175 \text{ Вт/м К}$ .

*Использованные источники:* [1]; [2]; [4].

## **Практическое занятие № 8 Расчет простого и сложного трубопроводов – расчетная работа**

### *Цель занятия:*

Произвести гидравлический расчет. ОК 01-07,09, ПК 1.1-1-5, ПК 3.1-3.3.

### *Порядок выполнения задания:*

1. Прочитать задание, разобрать схему.
2. Составить уравнение Бернулли с учетом условия заданий.
3. Произвести необходимые расчеты.
4. Выводы.

При расчете трубопроводов учитываем три основных типа задач:

1. Заданы: длина, диаметр, шероховатость трубы, напор. Необходимо определить пропускную способность трубопровода.

*Решение:* - принимаем по справочным таблицам коэффициенты

- вычисляем полные потери напора
- определяем площадь сечения трубы
- находим среднюю скорость движение жидкости в трубе
- вычисляем расход жидкости.

2. Заданы: длина, диаметр, шероховатость трубы, расход жидкости и местные сопротивления. Необходимо определить потребный напор.

*Решение:* - вычисляем площадь сечения трубы;

- среднюю скорость движения жидкости в трубе;
- находим число Рейнольдса;
- по таблицам выбираем необходимые коэффициенты;
- вычисляем напор.

3. Заданы: расход жидкости, напор, длина и шероховатость трубы. Определить диаметр трубы.

*Решение:* основной формулой для определения диаметра трубы является формула для нахождения напора.

Задача 5: по трубопроводу длиной 200 м и диаметром 300 мм вода поднимается на высоту 50 м. Трубопровод имеет две задвижки, для каждой из которых коэффициент местных потерь равен 3,5. Трубопровод имеет также два поворота с коэффициентом 0,5 для каждого. Коэффициент шероховатости труб 0,02. Какой напор должен обеспечить насос, чтобы расход воды составил 98 л/с?

*Примечание:* живые сечения I-I в месте присоединения трубопровода к насосу.

II - II – в конце трубопровода, где вода вытекает в атмосферу.

6. Центробежный насос подает 14 л/с жидкости. Манометр на нагнетательном патрубке показывает 255 КПа, вакуумметр на всасывающем патрубке показывает 33,3 КПа, расстояние между манометром и точкой присоединения вакуумметра 0,6 м. Диаметры нагнетательного и всасывающего патрубков одинаковы. Коэффициент полезного действия насоса равен 0,62. Определить мощность на валу центробежного насоса

$$N_s = N_n / \eta_n$$

Ответ: 6,58 кВт.

*Задания к практическому занятию:*

## ВАРИАНТ № 1

Определить перепад давления между сечениями трубопровода (1-11) и мощность, которую необходимо сообщить жидкости, если перекачивается бензин с расходом 30 л/с при температуре 20°C, коэффициент кинематической вязкости 0,0064 см<sup>2</sup>/с. Коэффициент шероховатости труб 0,028. Трубопровод имеет четыре ответвления с коэффициентом сопротивления каждого 0,2 и два поворота с коэффициентом сопротивления каждого 1,5. Диаметр трубопровода 100 мм. Плотность бензина 680-720 кг/см<sup>3</sup>.

## ВАРИАНТ № 2

Определить перепад давления между сечениями трубопровода (1-П) и мощность, которую необходимо сообщить жидкости, если перекачивается вода с расходом 30 л/с при температуре 20°C, коэффициент кинематической вязкости 0,01 см<sup>2</sup>/с. Коэффициент шероховатости труб 0,028. Трубопровод имеет четыре ответвления с коэффициентом сопротивления каждого 0,2 и два поворота с коэффициентом сопротивления каждого 1,5. Диаметр трубопровода 100 мм. Плотность воды 10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>.

## ВАРИАНТ № 3

Определить перепад давления между сечениями трубопровода (1-П) и мощность, которую необходимо сообщить жидкости, если перекачивается масло с расходом 30 л/с при температуре 20°C, коэффициент кинематической вязкости 0,4 м<sup>2</sup>/с. Коэффициент шероховатости труб 0,028. Трубопровод имеет четыре ответвления с коэффициентом сопротивления каждого 0,2 и два поворота с коэффициентом сопротивления каждого 1,5. Диаметр трубопровода 100 мм. Плотность масла 880 кг/м<sup>3</sup>.

*Примеры решения задач по гидродинамике:*

1. Определить режим течения жидкости вязкостью 20 мм<sup>2</sup>/с в круглой трубе диаметром 10 мм при расходе 4 л/с. Температура воды 20 °С.

## РЕШЕНИЕ:

- Находим скорость движения воды:

$$v = Q/S = 0,51 \text{ м /с}$$

- Для определения режима движения жидкости вычисляем число Рейнольдса:

$Re = d v / \nu = 2550$  – режим движения жидкости турбулентный.

Из таблицы коэффициент кинематической вязкости воды при температуре 20°C равен 0,01 см<sup>2</sup>/с.

Для определения режима движения воды вычисляем число Рейнольдса

$Re = 51000$  – режим движения воды турбулентный

Вывод: зависимость режима движения жидкости от её вязкости.

Сравнение: определить, что при движении нефти в трубе того же диаметра при расходе 2 л/с режим движения будет ламинарным.

2. Определить характер движения жидкости по трубопроводу диаметром 0,3 м, если расход ее составит 0,05 м<sup>3</sup>/с, а вязкость в градусах Энглера равна  $E = 10$ .

*Решение:*

Переведем вязкость, выраженную в градусах Энглера, в кинематическую вязкость:

$$\nu = 0,0731^\circ E - 0,0631 / ^\circ E = 0,725 \text{ см}^2/\text{с} = 0,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$$

Определим скорость движения жидкости из уравнения расхода:

$$g = 0,707 \text{ м/с}$$

Вычислим число Рейнольдса:

$$Re = 2925$$

Вывод: т.к.  $Re > 2300$ , то режим будет турбулентным.

3. Определить диаметр стального маслопровода, подающего 150 л/мин масла с давлением 30 бар, при скорости 5 м/с.

*Решение:*

Определяем площадь живого сечения маслопровода:

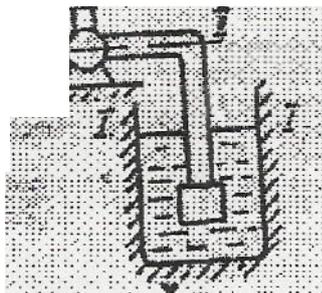
$$S = Q / g = 5 \text{ см}^2$$

Вычисляем внутренний диаметр трубопровода:

$$D = \sqrt{4s / \pi} = 2,53 \text{ мм}$$

Вывод: выбираем трубопровод с внутренним диаметром 25 мм.

4. Центробежный насос качает воду из колодца. Определить высоту расположения вала насоса от поверхности воды в колодце, если насос перекачивает 40 л/с воды по трубе диаметром 200 мм. Местные потери равны 9. Потерями по длине трубопровода пренебречь. В месте присоединения насоса к трубе вакуумметр показывал 0,7 бар. Живые сечения принять, как показано на схеме.



РЕШЕНИЕ:

Составим уравнение Бернулли для реальной жидкости:

$$P_1 - P_2 / \rho g = Z_2 + \vartheta^2 / 2g + h_n$$

Определяем скорость движения жидкости;

$$\vartheta = Q / 0,785d^2 = 1,27 \text{ м/с}$$

Определяем потери напора:

$$h_n = \sum \xi \vartheta^2 / 2g$$

Определяем высоту расположения вала насоса:

$$H = 6,32 \text{ м.}$$

*Использованные источники: [1]; [2]; [4].*

### Используемые источники литературы

1. Иванов А.Е., Иванов С.А. Механика. Молекулярная физика и термодинамика. [Электронный ресурс] – М.: КНОРУС, 2020.

*Дополнительные источники:*

1. Брюханов О.Н. Основы гидравлики и теплотехники – М., Академия, 2011.

2. Лашутина Н.Г. Техническая термодинамика с основами теплопередачи и

3. Трофимова Т.И. Основы физики. Термодинамика.[Электронный ресурс] – М.: КНОРУС, 2016.