

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Югорский государственный университет»**  
**НИЖНЕВАРТОВСКИЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИКУМ (филиал)**  
**федерального государственного бюджетного образовательного учреждения**  
**высшего образования**  
**«Югорский государственный университет»**



**КОМПЛЕКС ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ**  
**по МДК 02.01 Эксплуатация нефтегазопромыслового оборудования**

**Методические указания**  
**к выполнению практических занятий**  
**для студентов образовательных учреждений**  
**среднего профессионального образования**  
**всех форм обучения (очная, заочная)**  
**специальности**  
**21.02.01 Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений**


**Часть 1**

**Нижневартовск 2016**

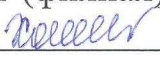
## ББК 30.82

Э-41

### РАССМОТРЕНО

На заседании ПЦК «МД»  
Протокол № 1 от 14 января 2016 г.  
Председатель ПЦК  
 Л. Г. Таранина

### УТВЕРЖДАЮ

Председатель методического совета  
ННТ (филиал) ФГБОУ ВО «ЮГУ»  
 Р. И. Хайбулина  
«28» января 2016г.

Методические указания к выполнению лабораторно-практических занятий для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования всех форм обучения (очная, заочная) специальности 21.02.01 Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений по дисциплине МДК 02.01 Эксплуатация нефтегазового оборудования, часть 1 разработаны в соответствии с:

1. Федеральным государственным образовательным стандартом по специальности среднего профессионального образования 21.02.01 Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений, утвержденным приказом № 482 от 12.05.2014г.

2. Программой профессионального модуля 02 Эксплуатация нефтегазового оборудования, утв. 11.09.2015г.

#### Разработчик:

Тетикли Надежда Михайловна, высшая квалификационная категория, преподаватель Нижневартовского нефтяного техникума (филиала) ФГБОУ ВО «ЮГУ».

#### Рецензенты:

1. Таранина Л.Г., высшая квалификационная категория, преподаватель Нижневартовского нефтяного техникума (филиала) ФГБОУ ВО «ЮГУ».

2. Коростелева И.В., ведущий геолог АО «Самотлорнефтегаз».

Замечания, предложения и пожелания направлять в Нижневартовский нефтяной техникум (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Югорский государственный университет» по адресу: 628615, Тюменская обл., Ханты-Мансийский автономный округ, г. Нижневартовск, ул. Мира, 37.

## ВВЕДЕНИЕ

Комплекс практических занятий соответствует Федеральным государственным образовательным стандартам (далее ФГОС) по специальности среднего профессионального образования 21.02.01 «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений».

Цель методической разработки: закрепление полученных теоретических знаний, приобретение расчетных навыков и навыков работы со схемами, таблицами. Представленные задачи могут быть использованы для самостоятельной работы студентов.

Программа профессионального модуля 02 «Эксплуатация нефтегазового промышленного оборудования» является программой подготовки специалистов среднего звена (ППССЗ) по специальности 21.02.01 «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений».

Программа профессионального модуля 02 «Эксплуатация нефтегазового промышленного оборудования» является профессиональной, устанавливающей базовые знания для освоения других специальных дисциплин.

Междисциплинарный курс 02.01 «Эксплуатация нефтегазового промышленного оборудования» предусматривает изучение разделов по гидравлики и термодинамики применительно к основным процессам нефтяной промышленности и газовой.

В результате освоения междисциплинарного курса 02.01 «Эксплуатация нефтегазового промышленного оборудования» студент **должен**

**уметь:**

- производить расчеты требуемых физических величин в соответствии с законами и уравнениями термодинамики и теплопередачи;
- определять физические свойства жидкости;
- выполнять гидравлические расчеты трубопроводов;

**знать:**

- основные понятия, законы и процессы термодинамики и теплопередачи;
- методы расчета термодинамических и тепловых процессов;
- классификацию, особенности конструкции, действия и эксплуатации котельных установок, поршневых двигателей внутреннего сгорания, газотурбинных и теплосиловых установок;
- основные физические свойства жидкости;
- общие законы и уравнения гидростатики и гидродинамики;
- методы расчёта гидравлических сопротивлений движущейся жидкости.

Данные методические указания разработаны с целью оказания помощи студентам всех форм обучения среднего специального заведения при организации их самостоятельной работы по овладению системой знаний, умений и навыков, решения технологических задач.

**Цель методической разработки:** закрепление полученных теоретических знаний, приобретение расчетных навыков и навыков работы с графиками, схемами, таблицами.

## ТЕМАТИКА ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Номер темы	Номер и наименование занятия	Количество аудиторных часов
1	2	3
1.2	Практическое занятие №1. Применение газовых законов при решении задач	2
1.3	Практическое занятие №2. Определение массового состава смеси	2
1.4	Практическое занятие №3. Табличный метод нахождения теплоемкости	2
1.6	Практическое занятие №4. Расчет параметров состояния в изотермических процессах	2
1.7	Практическое занятие №5. Расчет цикла Карно, теоретического цикла ДВС	2
	Практическое занятие №6. Расчет теоретической мощности компрессора.	2
	<b>Всего</b>	<b>12</b>
2.1	Практическое занятие №7. Применение закона Фурье при решении задач. Расчет теплообменного аппарата	2
	<b>Всего</b>	<b>2</b>
3.1	Практическое занятие №8. Расчет топлива в процессе горения, КПД котельного агрегата, эффективной мощности дизеля, расход топлива	2
	<b>Всего</b>	<b>2</b>
	<b>Итого</b>	<b>16</b>

### ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1

#### ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОВЫХ ЗАКОНОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

**Цель:** Закрепление знаний основных газовых законов; формирование навыков самостоятельной работы с таблицами.

**Общие сведения:**

Все газовые законы отражают состояние идеальных газов.

**Идеальный газ** – это газ, имеющий объем молекул равный нулю, не имеющий сил межмолекулярного взаимодействия и подчиняющийся уравнению Менделеева-Клайперона.

**Уравнение Менделеева-Клайперона** отражает взаимосвязь между основными параметрами состояния рабочего тела. Уравнение может быть записано в следующем виде:

$$P \cdot V = G \cdot R \cdot T \quad (1.1)$$

где  $P$  - абсолютное давление газа, МПа;  
 $V$  - объем газа, м<sup>3</sup>;  
 $G$  - масса газа, кг;  
 $R$  - удельная газовая постоянная, Дж/кг·°С;  
 $T$  - абсолютное температура идеального газа, °К;

В настоящее время можно утверждать, что ни один из реальных газов не подчиняется газовым законам. Тем не менее, эти специфические газовые законы в термодинамике сохранены, и учение об идеальных газах широко используется в технике, эти законы несложны и достаточно хорошо характеризуют поведение реальных газов при невысоких давлениях и не очень низких температурах, вдали от областей насыщения и критической точки.

**Закон Бойля (1662 г.) - Мариотта (1676 г.)** - при постоянной температуре ( $t = \text{const}$ ) произведение абсолютного давления и удельного объёма идеального газа сохраняет неизменную величину ( $Pv = \text{const}$ ):

$$P \cdot v = \text{const} \quad (1.2)$$

$$P \cdot v = f(t)$$

**Закон Гей-Люссака (1802 г.)** - при постоянном давлении ( $p = \text{const}$ ) объём идеального газа изменяется прямо пропорционально повышению температуры:

$$v = v_0(1 + \alpha \cdot t) \quad (1.3)$$

где  $v_0$  - удельный объем газа при температуре  $t^0\text{C}$  и давлении  $P$ , м<sup>3</sup>/кг;  
 $\alpha$  - температурный коэффициент объемного расширения идеальных газов при  $0^0\text{C}$ ,  $1/273 \text{ K}^{-1}$ ;  
 $t$  - температура газа, °С.

### **Задание:**

Решить следующие задачи, применяя знания, полученные при изучении законов идеальных газов.

#### **Задача № 1.**

Дымовые газы, образовавшиеся в топке парового котла, охлаждаются с  $t_1$  до  $t_2$ . Во сколько раз уменьшится их объём, если давление газа в начале и конце газохода одинаково. Исходные данные приведены в таблице 1.1.

#### **Задача № 2.**

В баллоне содержится газ известной массы при определенном давлении и температуре. Какова вместимость баллона при данных условиях согласно варианта? Исходные данные приведены в таблице 1.2; 1.3.

Таблица 1.1 - Исходные данные

Параметры	Варианты														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
начальная температура $t_1, ^\circ\text{C}$	1200	1100	1250	1310	1340	950	1375	1382	1231	1189	1174	1131	1000	1230	1150
конечная температура $t_2, ^\circ\text{C}$	205	215	210	185	190	173	169	178	200	210	230	242	213	165	194
Параметры	Варианты														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
начальная температура $t_1, ^\circ\text{C}$	1150	1160	1170	1205	1220	1315	1415	1350	1362	1470	1520	1290	1300	990	1400
конечная температура $t_2, ^\circ\text{C}$	110	115	120	130	140	125	135	150	160	170	180	190	220	230	250

Таблица 1.2 - Исходные данные

Вариант	Параметр			
	Наименование газа	масса газа $G, \text{ кг}$	давление газа $P, \text{ МПа}$	начальная температура $t_1, ^\circ\text{C}$
1	Кислород	1,2	8,3	15
2	Воздух	2	7,7	13
3	Водород	3	7,9	12
4	Азот	4	8,5	14
5	Оксид углерода	2,1	9,1	15
6	Гелий	2,6	7,3	20
7	Метан	3,2	9,7	25
8	Диоксид углерода	3,7	10	29
9	Кислород	1,7	9,2	30
10	Азот	4,2	10,5	32
11	Метан	4,6	11,2	28
12	Воздух	5,1	5,6	39
13	Гелий	5,5	6,7	42
14	Кислород	2,9	7,7	45
15	Метан	3,9	9,1	52
16	Оксид углерода	4,2	5,5	19
17	Гелий	4,5	5	53
18	Азот	4,7	6	55
19	Кислород	5,1	7	19
20	Метан	5,9	11,5	62
21	Диоксид углерода	6,3	10,4	75
22	Воздух	6,7	9,9	81
23	Гелий	6,9	10,7	20
24	Азот	7,1	10,9	44
25	Кислород	7,3	12	10
26	Оксид углерода	8,5	12,1	5
27	Метан	8,2	13	90
28	Азот	9	14,1	96
29	Водород	11	13,8	53
30	Гелий	10,6	15	106

Таблица 1.3 – Значения молярной массы веществ

№ п/п	Вещество	Обозначение	Молярная масса $\mu$ , кг/кмоль
1	Водород	H <sub>2</sub>	2,016
2	Гелий	He	4,003
3	Метан	CH <sub>4</sub>	16,043
4	Азот	N <sub>2</sub>	28,013
5	Оксид углерода	CO	28,011
6	Воздух	-	28,97
7	Кислород	O <sub>2</sub>	32
8	Диоксид углерода	CO <sub>2</sub>	44,011

**Методические указания:**

1. Перед решением предложенных задач, необходимо все физические величины перевести в систему СИ.

2. Из таблицы 1.3 в исходные данные добавить соответствующие молярные массы газов и определить удельную газовую постоянную (задача №2):

$$R = \frac{\bar{R}}{\mu}, \text{ Дж/кг}\cdot^{\circ}\text{К} \quad (1.4)$$

где  $\bar{R}$  - универсальная газовая постоянная, 8314 Дж/кмоль·°К;  
 $\mu$  - молярная масса газа, кг/кмоль.

3. Перед решением, задач определить какому газовому закону соответствует каждая задача, и использовать его для решения.

4. Сделать вывод.

5. Выполнить контрольный тест.

**Контрольный тест:**

1. Имеется ли разница между показаниями температуры  $T = 314^{\circ}\text{К}$  и  $t = 314^{\circ}\text{С}$ .

Ответ: а)  $T < t$ ; б)  $T > t$ ; в)  $T = t$ .

2. Почему в качестве рабочего тела в термодинамике используются пары и газы?

Ответ:

а) газы (пары) имеют высокие теплоёмкости;

б) газы при изменении температуры и давления могут значительно изменять свой объём;

в) газы способны выдерживать большие температуры, чем жидкости и твёрдые тела.

3. Почему молярная газовая постоянная называется универсальной?

Ответ:

а) при помощи неё можно определить удельную газовую постоянную;

б) она для всех идеальных газов постоянна и равна 8314 Дж/кмоль·°К;

в) она применима и для реальных газов.

4. Как записывается уравнение Менделеева-Клайперона?

Ответ: а)  $PV = GRT$ , б)  $p\nu = GRT$ ; в)  $PV = \mu RT$ .

5. Назови единицу измерения количества вещества.

Ответ: а) моль; б) кг; в) м<sup>3</sup>

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССОВОГО СОСТАВА ГАЗОВОЙ СМЕСИ

**Цель:** Закрепление знаний по изучаемой теме; формирование навыков определения состава смеси через нахождение массовой концентрации веществ.

**Общие сведения:**

В термодинамике часто пользуются понятием чистого вещества и смеси. Под чистым веществом понимают вещество, все молекулы которого одинаковы. Например, вода, азот, аммиак, углекислый газ.

Смесь состоит уже из чистых веществ, химически не взаимодействующих друг с другом. Примером смеси может служить воздух, природный газ, продукты сгорания топлива, пары воды.

Важнейшей характеристикой смеси является её состав. Состав смеси обычно определяют посредством нахождения концентрации компонентов, входящих в смесь,

**Массовая концентрация** - это отношения массы  $i$ -го компонента к массе всей смеси:

$$m_i = \frac{G_i}{G} \quad (2.1)$$

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n = \sum_{i=1}^{i=n} G_i \quad (2.2)$$

где  $G_i$  - масса данного компонента, кг;  
 $G$  - масса смеси в целом, кг.

**Мольная концентрация** – это отношение числа молей  $i$ -го компонента к общему числу молей смеси:

$$r_i = \frac{\bar{G}_i}{\bar{G}} \quad (2.3)$$

$$\bar{G} = \bar{G}_1 + \bar{G}_2 + \bar{G}_3 + \dots + \bar{G}_n = \sum_{i=1}^{i=n} \bar{G}_i \quad (2.4)$$

где  $\bar{G}_i$  - количество молей данного компонента, моль;  
 $\bar{G}$  - количество молей смеси в целом, моль.

**Задание:**

Ёмкость разделена перегородкой на две полости. С одной стороны - азот при определенном давлении, температуре объёме, с другой - углекис-



лый газ, имеющий свои параметры. Определить массовый состав смеси после удаления перегородки. Исходные данные приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Исходные данные

Параметр	Вариант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$P_{N_2}$ , МПа	1,2	0,8	1	1,1	0,9	1,3	1,4	1,5	1,2	0,8	0,7	1,3	1,4	1,5	1,6
$t_{N_2}$ , °С	47	77	50	63	45	57	60	70	73	75	80	84	87	45	56
$V_{N_2}$ , м <sup>3</sup>	0,4	0,7	1,4	1,4	1,4	0,8	0,9	1,1	1,2	0,8	1,3	1,4	0,8	0,9	1,2
$P_{CO_2}$ , МПа	0,7	0,3	1,1	1,3	1	1,5	1,6	1,8	1,9	1,1	1,2	1,4	1,7	2	2,2
$t_{CO_2}$ , °С	17	20	15	16	19	21	23	19	18	16	24	26	30	31	34
$V_{CO_2}$ , м <sup>3</sup>	0,6	0,3	0,7	0,5	0,9	1	1,1	0,6	1,2	1,3	1,5	0,8	1,3	1,2	0,8

Параметр	Вариант															
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
$P_{N_2}$ , МПа	1,3	0,9	0,6	0,7	0,5	1	1,1	1,2	1,4	1,3	1,5	1,6	0,4	0,8	0,9	
$t_{N_2}$ , °С	42	48	37	24	40	25	35	52	57	61	68	70	73	78	81	
$V_{N_2}$ , м <sup>3</sup>	0,3	0,6	0,4	0,7	0,1	0,5	0,8	0,9	1	0,2	1,1	1,4	1,2	1,3	1	
$P_{CO_2}$ , МПа	0,8	1,1	0,9	1,2	1	0,7	0,6	0,9	1,2	1,3	0,8	0,7	1,5	1,8	1,9	
$t_{CO_2}$ , °С	16	19	10	12	14	17	19	21	22	23	25	13	33	35	41	
$V_{CO_2}$ , м <sup>3</sup>	0,5	0,7	0,4	0,6	0,9	0,7	0,8	1,1	1,2	0,6	1,3	1,5	1,2	0,8	0,9	

Таблица 2.2 – Значение удельной газовой постоянной

Вещество	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	He	N <sub>2</sub>	CO	Воздух	O <sub>2</sub>
Газовая постоянная, в Дж/кг °К	189,9	4124,3	2077,2	296,8	296,8	287	259,8

### Методические указания:

1. Перед решением предложенных задач, необходимо все физические величины перевести в систему СИ.

2. Из таблицы 2.3 в исходные данные добавить соответствующие удельные газовые постоянные (ПЗ №1).

3. Используя уравнение Менделеева-Клайперона, определить массу для каждого газа:

$$PV = GRT \quad (2.5)$$

- где **P** - абсолютное давление газа, МПа;  
**V** - объём газа, м<sup>3</sup>;  
**G** - масса газа, кг;  
**R** - удельная газовая постоянная газа; Дж/кг °С;  
**T** - абсолютная температура идеального газа, °К.

4. Определить массу смеси, состоящую из данных газов.

5. Определить массовые концентрации для азота и углекислого газа.

6. Определить температуру смеси:

$$T_m = \frac{G_{N_2} \cdot T_{N_2} + G_{CO_2} \cdot T_{CO_2}}{G}, \text{ } ^\circ\text{К} \quad (2.6)$$

- где  $T_{CO_2}$  - температура углекислого газа, °К;  
 $T_{N_2}$  - температура азота, °К;  
 $G_{N_2}$  - масса азота, кг;  
 $G_{CO_2}$  - масса углекислого газа, кг;  
 $G$  - масса смеси, кг.

7. Определить удельную газовую постоянную смеси:

$$R_m = R_{N_2} \cdot m_{N_2} + R_{CO_2} \cdot m_{CO_2}, \text{ Дж/кг}^{\circ}\text{К} \quad (2.7)$$

- где  $m_{N_2}$  - массовая концентрация азота;  
 $m_{CO_2}$  - массовая концентрация углекислого газа;  
 $R_{CO_2}$  - удельная газовая постоянная углекислого газа; Дж/кг<sup>°</sup>С;  
 $R_{N_2}$  - удельная газовая постоянная азота; Дж/кг<sup>°</sup>С.

8. Определить молярную массу смеси:

$$\mu_m = \frac{1}{\frac{m_{N_2}}{\mu_{N_2}} + \frac{m_{CO_2}}{\mu_{CO_2}}}, \text{ кг/кмоль} \quad (2.8)$$

- где  $m_{N_2}$  - массовая концентрация азота;  
 $m_{CO_2}$  - массовая концентрация углекислого газа;  
 $\mu_{CO_2}$  - молярная масса углекислого газа; кг/кмоль;  
 $\mu_{N_2}$  - молярная масса азота; кг/кмоль.

### Контрольный тест:

1. Выбери правильный ответ: Моль - это...

- а) количество молекул вещества на 1 см<sup>2</sup> поверхности;  
 б) количество вещества в граммах равное его молярной массе;  
 в) число атомов, определяющих агрегатное состояние вещества.

2. Выберите соответствующие термины между левым и правым столбцами:

Смесь – это .....	а) несколько активных веществ; б) несколько чистых веществ, взаимодействующих между собой; в) несколько чистых веществ, химически не взаимодействующих друг с другом; г) воздух, природный газ.
Молярная масса – это .....	а) число молей вещества; б) отношение числа молей к массе вещества; в) отношение массы вещества к количеству молей.

3. Как записывается закон Дальтона?

- а)  $PV = GRT$ , б)  $P_i = r_i \cdot p_i$ , в)  $pV = \text{const}$ .

### Контрольные вопросы:

1. Назвать условие существования газовой смеси.
2. Дать определение массовой и мольной концентрации вещества
3. Записать формулы, определяющие молярную массу смеси.
4. Сформулируйте закон Дальтона.
5. Что такое чистое вещество?

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3

### РАСЧЕТ ТЕПЛОЕМКОСТИ ТАБЛИЧНЫМ МЕТОДОМ

**Цель:** Закрепление знаний по изучаемой теме; формирование навыков определения теплоёмкости с применением таблиц.

**Общие сведения:**

**Удельная теплоёмкость тела** - это количество теплоты, необходимой для нагрева единицы количества вещества на один градус в процессе  $z$ :

$$C_{zm} = \frac{q_z}{t_1 - t_2}, \text{ Дж/кг}^0\text{К} \quad (3.1)$$

- где  $q_z$  - теплота, подведенная к единицы количества вещества, Дж/кг;  
 $t_1$  - начальная температура,  $^0\text{C}$ ;  
 $t_2$  - конечная температура,  $^0\text{C}$ ;  
 $z$  - показатель процесса

Наиболее часто на практике используют теплоёмкости изобарного ( $z = p = \text{const}$ ) и изохорного ( $z = v = \text{const}$ ) процессов - эти теплоёмкости обозначаются  $C_p$  и  $C_v$ . Теплоёмкость величина переменная, зависящая от температуры и давления, а для идеального газа - только от температуры.

Истинная теплоёмкость определяется в конкретной температурной точке. Средняя теплоёмкость определяется в интервале температур  $t_2 - t_1$ .

**Задание:**

Произвести расчёт массовой теплоёмкости при постоянном давлении для газа в пределах  $t_1 - t_2$  по таблице (3.1). Исходные данные приведены в таблице 3.1. и 3.2.

Таблица 3.1 - Исходные данные для расчета.

Параметр	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Газ/жидкость	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	воз	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
t <sub>1</sub> , $^0\text{C}$	146	63	80	230	151	250	315	218	320	165	265	70
t <sub>2</sub> , $^0\text{C}$	830	430	540	980	870	930	940	910	1100	990	935	760
Параметр	Вариант											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Газ/жидкость	SO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	воз	H <sub>2</sub> O	CO	воз	SO <sub>2</sub>
t <sub>1</sub> , $^0\text{C}$	129	240	350	420	170	94	246	95	85	230	250	272
t <sub>2</sub> , $^0\text{C}$	950	980	860	989	830	632	832	740	1240	739	980	780
Параметр	Вариант											
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Газ/жидкость	N <sub>2</sub>	CO	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	воз	N <sub>2</sub>	CO	воз	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
t <sub>1</sub> , $^0\text{C}$	75	135	151	140	300	420	440	370	230	74	250	380
t <sub>2</sub> , $^0\text{C}$	830	746	946	780	890	990	998	970	1500	780	960	958

Таблица 3.2 - Исходные данные для расчета.

t, °C	C <sub>p</sub> , ккал/кг·°C						
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	воздух
0	0,2183	0,2482	0,2483	0,1936	0,4441	0,145	0,2397
100	0,2203	0,2485	0,2488	0,2084	0,4473	0,152	0,2403
200	0,2234	0,2492	0,2499	0,2185	0,4523	0,158	0,2416
300	0,2269	0,2505	0,2517	0,2276	0,4684	0,164	0,2434
400	0,2305	0,2524	0,254	0,2367	0,4652	0,169	0,2456
500	0,2338	0,2546	0,2567	0,2429	0,4724	0,173	0,2481
600	0,2371	0,2571	0,2595	0,2593	0,4798	0,177	0,2507
700	0,2400	0,2596	0,2623	0,2551	0,4877	0,18	0,2533
800	0,2427	0,2622	0,2648	0,2602	0,4957	0,183	0,2559
900	0,2451	0,2647	0,2673	0,265	0,5038	0,185	0,2583
1000	0,2473	0,267	0,2697	0,2693	0,512	0,187	0,2606
1200	0,2511	0,2743	0,2767	0,5279	0,5279	0,191	0,2648
1400	0,2544	0,2755	0,2785	0,2828	0,5432		0,2687
1600	0,2573	0,279	0,2819	0,288	0,5576		0,272
1800	0,2600	0,2821	0,2849	0,2926	0,5709		0,2749
2000	0,2625	0,2847	0,2875	0,2964	0,5832		0,2775
2200	0,2649	0,2871	0,2899	0,2999	0,5946		0,2798
2400	0,2669	0,2893	0,292	0,3028	0,6051		0,2719
2500	0,2682	0,2903	0,2929	0,3042	0,6101		0,2729

Примечание:

При перерасчете ккал/кг<sup>0</sup>C в кДж/кг<sup>0</sup>C следует все табличные значения умножить на 4,1868

**Методические указания:**

1. По таблице 1.2 выписать ближайшие значения средней массовой теплоемкости для температур кратных ста t<sub>1</sub> и t<sub>2</sub>

Например, если газ O<sub>2</sub> t<sub>1</sub>=148<sup>0</sup>C,

$$\text{то } |C_p|_0^{100} = 0,2203 \cdot 4,1868 = 0,922 \text{ кДж / кг} \cdot ^\circ K$$

$$|C_p|_0^{200} = 0,2234 \cdot 4,1868 = 0,935 \text{ кДж / кг} \cdot ^\circ K$$

2. Допуская, что изменение теплоемкости пропорционально изменению температуры, можно записать:

$$|C_p|_0^{t_1} = \left( |C_p|_0^{t_1} \right)' + \frac{\left( |C_p|_0^{t_1} \right)'' \cdot t_2 + \left( |C_p|_0^{t_1} \right)' \cdot t_1}{t_2 - t_1}, \text{ кДж / кг} \cdot ^\circ C \quad (3.2)$$

$$|C_p|_0^{t_2} = \left( |C_p|_0^{t_2} \right)' + \frac{\left( |C_p|_0^{t_2} \right)'' \cdot t_2 + \left( |C_p|_0^{t_2} \right)' \cdot t_1}{t_2 - t_1}, \text{ кДж / кг} \cdot ^\circ C \quad (3.3)$$

3. Определить значения массовой теплоемкости в интервале температур:

$$|C_p|_{t_1}^{t_2} = \frac{|C_p|_0^{t_2} \cdot t_2 + |C_p|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}, \text{ кДж / кг} \cdot ^\circ C \quad (3.4)$$

- где  $\left(C_P|_0^{t_1}\right)$  - значение теплоемкости для температуры кратной ста перед заданным значением, кДж/кг<sup>0</sup>С;  
 $\left(C_P|_0^{t_1}\right)''$  - значение теплоемкости для температуры кратной ста после заданного значения, кДж/кг<sup>0</sup>С;  
 $t_1$  - начальная температура, <sup>0</sup>С;  
 $t_2$  - конечная температура, <sup>0</sup>С.

### Контрольные вопросы:

1. Записать и объяснить содержание формулы удельной теплоёмкости вещества.
2. Дать определение массовой, мольной, объёмной теплоёмкости вещества
3. Записать формулы, определяющие взаимосвязь между различными теплоёмкостями.
4. В чём отличие между истинной и средней теплоёмкостью.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №4

### РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА В ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

**Цель:** Закрепление знаний по изучаемой теме; формирование навыков определения параметров состояния в зависимости от вида термодинамического процесса

#### Общие сведения:

**Изохорный процесс** - такое изменение состояния тела, при котором удельный объём остаётся постоянным. Параметры состояния идеального газа па изохоре связаны между собой соотношением:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (4.1)$$

Удельная термодинамическая работа в изохорном процессе равна нулю:

$$L_{1,2} = P_m (V_2 - V_1) = 0 \quad (4.2)$$

**Изобарный процесс** - такое изменение состояния тела, при котором давление остаётся постоянным. Параметры состояния идеального газа на изобаре связаны между собой соотношением:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (4.3)$$

Удельная термодинамическая работа в изобарном процессе равна нулю:

$$L_{1,2} = P (V_2 - V_1) \quad (4.4)$$

**Изотермический процесс** - такое изменение состояния тела, при котором температура остаётся постоянным. Параметры состояния идеального газа связаны между собой соотношением:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 = \text{const} \quad (4.5)$$

Удельная термодинамическая работа в изотермическом процессе равна удельной потенциальной работе:

$$L_{1,2} = W_{1,2} \quad (4.6)$$

**Задание:**

**Задача № 1.** При изотермическом нагревании газа данной массы его объём увеличивается в  $n$  раз. Начальное давление газа известно. Определить конечное давление, начальный и конечный объём, работу и теплоту в данном процессе. Исходные данные приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Исходные данные

Параметр	Вариант													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Газ	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	воз	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	воз	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
t, °C	27	15	17	18	20	23	25	28	31	32	35	41	26	34
P <sub>1</sub> , МПа	7	4,5	5,3	7,4	8,1	6,7	5,5	6,3	7,7	8,1	8,4	8,7	7	5
n	5	4	3	2	7	6	3	6	7	2	4	5	2	3
G, кг	0,05	0,1	0,2	0,6	0,01	0,09	0,7	0,2	0,2	0,9	0,8	0,4	0,5	0,7
Параметр	Вариант													
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Газ	CO	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	возд	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	возд	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
t, °C	46	30	20	21	33	27	32	44	49	56	28	62	65	67
P <sub>1</sub> , МПа	4,9	8,8	9	9,1	8,2	8,9	9,2	9,4	9,9	10	10,2	9,1	8,3	10,2
n	4	7	6	5	2	4	3	2	6	4	3	6	7	4
G, кг	0,2	0,16	0,1	0,7	0,6	0,27	0,04	0,9	0,2	0,3	0,06	0,5	0,41	0,4

**Задача № 2.** В баллоне емкостью  $V_1$  находится газ при давлении  $P_1$  и температуре  $T_1$ . Давление окружающей среды  $P_2$ . определить работу, которая может быть произведена содержащимся в баллоне газом при его расширении до давления окружающей среды по изотерме и адиабате. Найти минимальную температуру, которую будет иметь газ, в баллоне, если открыть вентиль и выпустить газ до тех пор, пока давление в нем не станет равным давлению окружающей среды при условии, что теплообмен газа окружающей средой отсутствует. Исходные данные приведены в таблице 4.2.

Таблице 4.2 - Исходные данные

Параметр	Вариант												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Газ	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	возд	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	возд	H <sub>2</sub>
t <sub>1</sub> , °C	30	95	170	180	20	203	250	208	301	320	350	401	206
P <sub>1</sub> , МПа	6	7,5	5,1	7,0	6,1	6,7	5,5	6,3	3,7	8,1	6,4	8,7	7
V <sub>1</sub> , л	100	400	300	200	70	60	30	600	700	120	400	50	200
P <sub>2</sub> , МПа	0,5	2	0,2	6	0,1	0,9	0,7	0,2	0,21	0,9	1,1	0,2	0,5
Параметр	Вариант												
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Газ	N <sub>2</sub>	CO	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	возд	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	возд	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO
t <sub>1</sub> , °C	340	406	300	200	201	303	207	320	404	490	501	560	286
P <sub>1</sub> , МПа	5	4,9	8,8	9	9,1	8,2	8,9	9,2	9,4	9,9	8,4	10	10,2
V <sub>1</sub> , л	300	40	700	60	500	200	400	350	260	630	540	400	310
P <sub>2</sub> , МПа	0,4	0,2	0,6	0,7	0,9	0,2	0,7	0,4	0,8	0,2	0,3	0,35	0,6

**Методические указания:**

К задаче № 1:

1. Определить начальный объём газа из уравнения Менделеева-Клайперона:

$$P \cdot V = GRT \quad (4.7)$$

- где **P** - абсолютное давление газа, МПа;  
**V** - объём газа, м<sup>3</sup>;  
**G** - масса газа, кг;  
**R** - удельная газовая постоянная, Дж/кг·°C (ПЗ.№2);  
**T** - абсолютная температура идеального газа, °K

2. Определить конечный объём газа зная, что от первоначального объёма он увеличивается в n раз.

3. Используя закон Бойля-Мариотта, определить конечное давление:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \quad (4.8)$$

4. Термодинамическая работа в изотермическом процессе определяется по формуле:

$$L_1 = GRT \cdot \ln \frac{V_1}{V_2}, \text{ Дж} \quad (4.9)$$

К задаче № 2.

1. Определить работу изотермического расширения газа по формуле:

$$L_1 = P_1 V_1 \cdot \ln \frac{P_2}{P_1}, \text{ Дж} \quad (4.10)$$

- где **P<sub>1</sub>** - начальное давление газа, МПа;  
**V<sub>1</sub>** - начальный объём газа, м<sup>3</sup>;  
**P<sub>2</sub>** - конечное давление газа, МПа;  
**ln** - натуральный логарифм.

2. Определить конечный объём газа по формуле:

$$V_2 = \frac{V_1 \cdot P_1}{P_2}, \text{ м}^3 \quad (4.11)$$

3. Работа, затраченная на преодоление атмосферного давления:

$$L_2 = P_2 (V_2 - V_1), \text{ Дж} \quad (4.12)$$

4. Полезная работа при изотермическом расширении определяется по формуле:

$$L = L_1 - L_2, \text{ Дж} \quad (4.13)$$

5. Определить работу адиабатного расширения газа по формуле:

$$L_{\text{АД1}} = \frac{P_1 \cdot V_1}{k-1} \left( 1 - \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \text{ Дж} \quad (4.14)$$

где  $P_1$  - начальное давление газа, МПа;  
 $V_1$  - начальный объём газа, м<sup>3</sup>;  
 $P_2$  - конечное давление газа, МПа;  
 $k$  - показатель адиабаты:  $k = 1,4$  для воздуха;  $k = 1,3$  для кислорода и водорода;  $k = 1,2$  для углекислого и угарного газа.

6. Определить конечный объём газа при адиабатном расширении по формуле:

$$V_2 = V_1 \cdot \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}}, \text{ м}^3 \quad (4.15)$$

7. Работа, затраченная на преодоление атмосферного давления в адиабатном процессе:

$$L_{\text{АД2}} = P_2 (V_2 - V_1), \text{ Дж} \quad (4.16)$$

8. Полезная работа при адиабатном расширении определяется по формуле:

$$L = L_{\text{АД1}} - L_{\text{АД2}}, \text{ Дж} \quad (4.17)$$

9. Определить минимальную температуру, которую будет иметь газ, если открыть вентиль:

$$T_2 = T_1 \left[ \frac{V_1}{V_2} \right]^{k-1} \quad (4.18)$$



10. Сделать вывод.

**Контрольные вопросы:**

1. Записать уравнение адиабаты Пуассона.
2. Почему адиабата идёт круче изотермы в координатах  $p - v$ ?
3. Дайте определение изотермического процесса.
4. Изобразить процессы графически в координатах  $p - v$ ?
5. Записать формулы, характеризующие изотермический процесс.

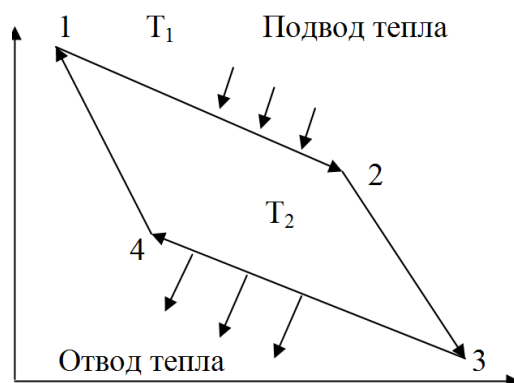
## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 5

### РАСЧЕТ ЦИКЛА КАРНО, ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ЦИКЛА ДВС

**Цель:** Закрепить знания обратного и прямого термодинамических циклов. Научиться практически, использовать основные газовые законы и определить основные параметры во всех точках цикла, определять индикаторную, эффективную мощность и удельный расход горючего 4-х тактного ДВС.

**Общие сведения:**

В 1894г. Французский инженер Карно предложил обратный цикл тепловых машин, осуществляемых между двумя источниками постоянных температур – нагревателем  $T_1$  и холодильником  $T_2$ . В качестве рабочего тела в цикле используется идеальный газ. На всех стадиях присутствует одно и то же количество газа.



**Участок 1-2:**  $T_1 = \text{const}$ . Подводится к рабочему телу с  $T_1$  теплота от горячего источника. Рабочее тело расширяется, совершая полезную работу.

**Участок 2-3:**  $q=0$ . Расширение рабочего тела осуществляется по адиабате, при этом температура снижается до  $T_2$ .

**Участок 3-4:**  $T_2 = \text{const}$ . Рабочее тело начинает сжиматься за счет отвода тепла к холодному источнику.

**Участок 4-1:**  $q=0$ . Адиабатное сжатие рабочего тела с повышением температуры до  $T_1$ .

**Задача теплового расчета поршневых ДВС** (двигатель внутреннего сгорания) – определение параметров состояния рабочего тела в характер-

ных точках цикла, нахождение среднего индикаторного давления.

**Среднее индикаторное давление  $P_i$**  – это условное постоянное давление, которое действует на поршень в течении хода расширения, совершает работу, равную индикаторной работе двигателя  $L_i$ .

**Эффективная мощность  $N_i$**  – это работа газов в единицу времени в цилиндре двигателя.

Эффективная мощность на валу двигателя  $N_e$ , меньше  $N_i$  на величину механических потерь  $N_m$ .

### Задача № 1

**Условие:** Рассчитать цикл Карно, совершаемый 1 кг газа, если известно  $P_1, t_1, P_3, t_3$ . Исходные данные для расчета даны в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Исходные данные для расчета.

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Газ	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	воздух	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
t <sub>1</sub> , °C	317	250	657	297	307	250	617	240	230	470
t <sub>3</sub> , °C	17	30	57	10	7	30	37	20	10	33
P <sub>1</sub> , МПа	2	1	5,6	1,7	1,8	1	6	0,9	0,8	6,5
P <sub>3</sub> , МПа	0,12	0,12	0,1	0,1	0,11	0,12	0,14	0,1	0,9	0,1
k	1,4	1,39	1,38	1,38	1,39	1,39	1,4	1,38	1,4	1,4
R, Дж/кг °K	296,8	259,8	4124,3	296,8	189,9	259,8	287	296,8	4124,3	259,8

### Методические указания к решению задачи № 1:

1. Используя уравнение Менделеева-Клапейрона  $PV=GRT$ , определить объем газа в точках 1 и 3:

$$V_1 = \frac{RT_1}{P_1}; \text{м}^3 \quad (5.1)$$

$$V_3 = \frac{RT_3}{P_3}; \text{м}^3 \quad (5.2)$$

$$T_1=T_2; \quad T_3=T_4$$

где  $V_1, V_3$  - объем газа в точках 1 и 3, м<sup>3</sup>;  
 $T_1, T_2, T_3, T_4$  - абсолютная температура в точках 1,2,3,4 соответственно, °K;  
 $R$  - газовая постоянная, Дж/кг °K.

2. Определить объем газа в точках 2 и 4, зная, что здесь идет адиабатный процесс (процесс 2-3 и 4-1):

$$V_2 = V_3 \frac{T_3}{T_2}; \text{м}^3 \quad (5.3)$$

$$V_4 = V_1 \frac{T_1}{T_4}; \text{м}^3 \quad (5.4)$$

где  $V_1, V_3$  - объем газа в точках 1 и 3, м<sup>3</sup>;  
 $T_1, T_2, T_3, T_4$  - абсолютная температура в точках 1,2,3,4 соответственно, °K.

3. Так как процесс 1-2 изотермический, определить давление в точке 2 используя закон Бойля-Мариотта  $P_1V_1=P_2V_2$ :

$$P_2 = \frac{P_1 \cdot V_1}{V_2}; \text{Па} \quad (5.5)$$

где  $V_1, V_2$  - объем газа в точках 1 и 2, м<sup>3</sup>;  
 $P_1$  - давление в точке 1, Па.

4. Используя уравнение Менделеева-Клайперона  $PV=GRT$ , определить давление в точке 4:

$$P_4 = \frac{R \cdot T_4}{V_4}; \text{Па} \quad (5.6)$$

где  $V_4$  - объем газа в точке 4, м<sup>3</sup>;  
 $T_4$  - абсолютная температура в точке 4, °К;  
 $R$  - газовая постоянная, Дж/кг °К.

5. Определить термический КПД цикла Карно:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_3}{T_1}; \quad (5.7)$$

где  $T_1, T_3$  - абсолютная температура в точках 1 и 3, °К.

6. Определить удельное подведенное количество теплоты в процессе 1-2, определить отведенное количество теплоты в процессе 3-4, т.к. процесс изотермический, то теплота равна совершенной работе:

$$q_1 = R \cdot T_1 \cdot \ln \frac{V_1}{V_2}; \text{Дж/кг} \quad (5.8)$$

где  $V_1, V_2$  - объем газа в точках 1 и 2, м<sup>3</sup>;  
 $T_1$  - абсолютная температура в точке 1, °К;  
 $R$  - газовая постоянная, Дж/кг °К;  
 $\ln$  - натуральный логарифм.

7. Определить массу газа в процессе 1-2:

$$G_1 = \frac{P_1 \cdot V_1}{R \cdot T_1}; \text{кг} \quad (5.9)$$

где  $V_1$  - объем газа в точке 1, м<sup>3</sup>;  
 $T_1$  - абсолютная температура в точке 1, °К;  
 $P_1$  - давление в точке 1, Па;  
 $R$  - газовая постоянная, Дж/кг °К.

8. Определить общее количество теплоты в процессе 1-2:

$$Q_1 = q_1 \cdot G_1; \text{ Дж/кг} \quad (5.10)$$

где  $q_1$  - удельное подведенное количество теплоты в процессе 1-2, Дж/кг;  
 $G_1$  - масса газа в процессе 1-2, кг.

9. Определить удельное отведенное количество теплоты в процессе 3-4, т.к. процесс изотермический, то теплота равна совершенной работе:

$$q_2 = R \cdot T_3 \cdot \ln \frac{V_3}{V_4}; \text{ Дж/кг} \quad (5.11)$$

где  $V_3, V_4$  - объем газа в точках 3 и 4, м<sup>3</sup>;  
 $T_3$  - абсолютная температура в точке 3, °К;  
 $R$  - газовая постоянная, Дж/кг °К;  
 $\ln$  - натуральный логарифм.

10. Определить массу газа в процессе 3-4:

$$G_2 = \frac{P_2 \cdot V_2}{R \cdot T_2}; \text{ кг} \quad (5.12)$$

где  $V_2$  - объем газа в точке 2, м<sup>3</sup>;  
 $T_2$  - абсолютная температура в точке 2, °К;  
 $P_2$  - давление в точке 2, МПа;  
 $R$  - газовая постоянная, Дж/кг °К.

11. Определить общее количество теплоты в процессе 3-4:

$$Q_2 = q_2 \cdot G_2; \text{ Дж/кг} \quad (5.13)$$

где  $q_2$  - удельное подведенное количество теплоты в процессе 3-4, Дж/кг;  
 $G_2$  - масса газа в процессе 3-4, кг.

12. Определить работу в процессе:

$$L_{1,2} = Q_1 - Q_2; \text{ Дж} \quad (5.14)$$

где  $Q_1$  - общее количество теплоты в процессе 1-2, Дж/кг;  
 $Q_2$  - общее количество теплоты в процессе 3-4, Дж/кг.

Если  $L_{1,2} > 0$ , то расчет произведен для теплового двигателя.

Если  $L_{1,2} < 0$  – холодильная установка.

### Задача №2

**Условие:** Определить индикаторную, эффективную мощность и удельный расход горючего 4-х тактного ДВС. Исходные данные для расчета даны в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Исходные данные для расчета.

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_i$ , МПа	0,6	0,5	0,7	0,8	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9	0,4
$D$ , мм	70	68	74	80	71	69	72	81	65	77
$S$ , мм	85	82	87	93	86	80	87	97	78	89
$n$ , об/мин	1700	1650	1600	1640	1710	1620	1770	1800	1705	1815
$Z$	4	3	4	5	4	5	3	4	5	4
$\eta_m$ , д/ед	0,87	0,86	0,85	0,88	0,87	0,86	0,85	0,87	0,88	0,86
$A$ , кДж/кг	4000	4150	4150	3970	3940	4160	4210	3860	3905	3820

### Методические указания к решению задачи № 2:

1. Определить рабочий объем цилиндра:

$$V_n = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot S; \text{м}^3 \quad (5.16)$$

где  $D^2$  - диаметр цилиндра, м<sup>2</sup>;  
 $S$  - ход поршня, м.

2. Определить индикаторную мощность:

$$N_i = \frac{P_i \cdot V_n \cdot n \cdot Z}{10^3 \cdot 60 \cdot i}; \text{кВт} \quad (5.17)$$

где  $P_i$  - среднее индикаторное давление, МПа;  
 $V_n$  - рабочий объем цилиндра, м<sup>3</sup>;  
 $n$  - частота вращения, об/мин;  
 $Z$  - число цилиндров, шт;  
 $i$  - число тактов.

3. Определить эффективную мощность:

$$N_e = N_i \cdot \eta_m; \text{кВт} \quad (5.18)$$

где  $N_i$  - индикаторная мощность, кВт;  
 $\eta_m$  - механический КПД, д/ед.

4. Вычислить эффективный КПД двигателя:

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m; \text{д/ед} \quad (5.19)$$

где  $\eta_i$  - индикаторный КПД = 0,3, д/ед;  
 $\eta_m$  - механический КПД, д/ед.

5. Определить удельный расход топлива в эффективном процессе:

$$Q_e = \frac{A}{Q} \cdot \eta_e; \text{Дж} \quad (5.20)$$

где  $A$  - тепловой эквивалент, кДж/кг;  
 $\eta_e$  - эффективный КПД, доли ед;  
 $Q$  - теплота сгорания = 60000, Дж.

Сделать вывод.

**Контрольные вопросы:**

1. Что представляет собой обратный цикл Карно.
2. Что называется круговым процессом.
3. Дайте определение среднего индикаторного давления.
4. Какова задача теплового расчета поршневых ДВС.
5. Дайте определение, что такое топливо, рабочее тело, сухая масса.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №6

### РАСЧЕТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ КОМПРЕССОРА

**Цель:** Закрепление знаний по изучаемой теме; формирование навыков определения сжатия при изотермическом, адиабатном и политропном процессах.

**Общие сведения:**

Компрессорные машины предназначены для сжатия газов и паров. По принципу действия компрессоры можно разбить на три основные группы: объемные, лопаточные и струйные. К объемным компрессорам относятся поршневые, ротационные и винтовые. К лопаточным компрессорам относятся центробежные и осевые. Основными параметрами, характеризующими работу компрессорных машин, можно считать соотношение давлений сжатия, определяемое как отношение давления за компрессором к давлению перед компрессором, и их подачу. Под подачей принято понимать секундное или часовое количество газа или пара, которое подаёт компрессор, выраженное в кубических метрах газа или пара при параметрах, которые они имеют на входе в компрессор.

Преимущества поршневых компрессоров - длительный срок службы, способность работать в широком диапазоне давлений, возможность регулирования подачи за счет изменения числа оборотов и т. д. К недостаткам этих машин относятся большие масса и размеры, динамическая неуравновешенность, что требует для них мощных фундаментов, неравномерность подачи газа и т.п.

Осевые и центробежные компрессоры различаются между собой направлением основного потока в рабочем колесе.

**Условие:** Компрессор всасывает воздух при начальном давлении  $P_1$  МПа и температуре  $t_1$  °С. Конечное давление сжатия  $P_2$  МПа. Определить теоретическую мощность двигателя для привода компрессора и расход охлаждающей воды, если её температура при этом повышается на 13°С. Расчеты произвести для изотермического, адиабатного и политропного процессов сжатия. Исходные данные для расчета даны в таблице б.1.

Таблица 6.1 – Исходные данные для расчета.

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_1$ , МПа	0,1	0,5	0,7	0,8	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9	0,4
$P_2$ , МПа	0,8	1,0	1,4	1,6	0,9	1,2	1,4	1,6	1,8	0,9
$t_1$ , °С	27	32	37	33	36	28	30	25	38	29
$t_2$ , °С	18	22	24	28	27	19	21	16	29	17
$\Delta t$ , °С	13									
$V_1$ , м <sup>3</sup> /с	100	98	86	92	104	88	78	80	102	90
$c_p$ , кДж/(кг·°С)	4,19									
$Q$ , Дж	10416,4									
$\omega_{1,2}$ , Дж/кг	2,3									

### Методические указания:

#### I. Изотермическое сжатие

1. Определить работу на сжатие воздуха в компрессоре по абсолютной величине:

$$W_{1,2} = \omega_{1,2} \cdot V_1 = \omega_{1,2} \cdot P_1 \cdot V_1 \cdot \ln \frac{P_2}{P_1}, \text{ кДж/ч} \quad (6.1)$$

где  $P_1$  - начальное давление, МПа;  
 $P_2$  - конечное давление сжатия, МПа;  
 $V_1$  - начальный объём воздуха, м<sup>3</sup>/с;  
 $\omega_{1,2}$  - удельная потенциальная (или техническая) работа сжатия, Дж/кг;  
 $\ln$  - натуральный логарифм.

2. Определить теоретическую мощность двигателя (это работа в единицу времени):

$$N = \frac{W_{1,2}}{3600}, \text{ кВт} \quad (6.2)$$

где  $W_{1,2}$  - работа на сжатие воздуха, кДж/ч.

Теплота, отводимая с охлаждающей водой в изотермическом процессе по первому началу термодинамики, численно равна работе сжатия  $Q = W_{1,2}$  кДж/ч.

3. Определить расход охлаждающей воды:

$$G = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta t}, \text{ кг/ч} \quad (6.3)$$

где  $\Delta t$  - повышение температуры, °С;  
 $c_p$  - теплоёмкость воды, кДж/(кг·°С);  
 $Q$  - теплота, Дж.

#### II. Адиабатное сжатие

1. Определить работу на адиабатное сжатие воздуха в компрессоре:

$$W_{1,2} = \frac{k}{k-1} P_1 \cdot V_1 = \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right], \text{кДж/ч} \quad (6.4)$$

где  $P_1$  - начальное давление, МПа;  
 $P_2$  - конечное давление сжатия, МПа;  
 $V_1$  - начальный объём воздуха, м<sup>3</sup>/с;  
 $k$  - показатель адиабаты,  $k = 1,4$ .

2. Определить мощность двигателя в данном случае по формуле:

$$N = \frac{W_{1,2}}{3600}, \text{кВт} \quad (6.5)$$

где  $W_{1,2}$  - работа на сжатие воздуха, кДж/ч.

### III. Политропное сжатие

1. Определить работу на политропное сжатие воздуха в компрессоре:

$$W_{1,2} = \frac{n}{n-1} P_1 \cdot V_1 = \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right], \text{кДж/ч} \quad (6.6)$$

где  $P_1$  - начальное давление, МПа;  
 $P_2$  - конечное давление сжатия, МПа;  
 $V_1$  - начальный объём воздуха, м<sup>3</sup>/с;  
 $n$  - показатель политропы,  $n = 1,2$ .

2. Определить мощность двигателя в данном случае по формуле:

$$N = \frac{W_{1,2}}{3600}, \text{кВт} \quad (6.7)$$

где  $W_{1,2}$  - работа на сжатие воздуха, кДж/ч.

3. Определить, расход газа через компрессор:

$$G = \frac{P_1 V_1}{R T_1}, \text{кг/с} \quad (6.8)$$

где  $P_1$  - начальное давление, МПа;  
 $V_1$  - начальный объём воздуха, м<sup>3</sup>/с;  
 $T_1$  - начальная температура, °С;  
 $R$  - удельная газовая постоянная,  $R = 287 \text{ Дж/кг} \cdot \text{°К}$ .

4. Определить теплоемкость воздуха при постоянном давлении:

$$c_v = 0,723 \cdot \frac{k-n}{k-1}, \text{кДж/(кг} \cdot \text{°К)} \quad (6.9)$$



- где  $n$  - показатель политропы,  $n = 1,2$ ;  
 $k$  - показатель адиабаты,  $k = 1,4$ .

5. Определить количество теплоты, отводимой при сжатии от воздуха:

$$Q_{1,2} = G \cdot \frac{k-n}{k-1} \cdot c_v (t_1 - t_2), \text{ кДж/ч} \quad (6.10)$$

- где  $G$  - расход воздуха через компрессор, кг/с;  
 $c_v$  - теплоёмкость воздуха, Дж/(кг·°C);  
 $t_1$  - начальная температура, °C;  
 $t_2$  - конечная температура, °C;  
 $n$  - показатель политропы,  $n = 1,2$ ;  
 $k$  - показатель адиабаты,  $k = 1,4$ .

6. Определить конечную температуру сжатия:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}, \text{ } ^\circ\text{K} \quad (6.11)$$

- где  $P_1$  - начальное давление, МПа;  
 $P_2$  - конечное давление сжатия, МПа;  
 $n$  - показатель политропы,  $n = 1,2$ .

7. Определить разность температур сжатия:

$$\Delta T = T_1 - T_2 = \Delta t = t_1 - t_2, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6.12)$$

- где  $T_1$  - конечная температура, °K;  
 $T_2$  - конечная температура, °K;  
 $t_1$  - начальная температура, °C;  
 $t_2$  - конечная температура, °C.

8. Определить расход охлаждающей воды:

$$G = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta t}, \text{ кг/ч} \quad (6.13)$$

- где  $\Delta t$  - повышение температуры, °C;  
 $c_p$  - теплоёмкость воды, кДж/(кг·°C);  
 $Q$  - теплота, Дж.

9. Сделать вывод

#### Контрольные вопросы:

1. Охарактеризуйте три основные группы компрессоров по принципу действия.
2. Назовите основные параметры характеризующие работу компрессора.
3. Преимущества и недостатки поршневых компрессоров.
4. Чем отличается осевой компрессор от центробежного компрессора?
5. Для чего предназначены компрессорные машины

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №7

### ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНА ФУРЬЕ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ. РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА

**Цель:** Закрепление знаний по изучаемой теме, формирование навыков определения параметров ТА.

**Общие сведения:**

В основу теории теплопроводности положен **Закон Фурье** – тепловой поток прямо пропорционален температурному градиенту и площади поверхности тела.

**Закон Фурье** для плоской однослойной стенки записывается следующим образом:

$$Q = \lambda \cdot \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\delta} \cdot F = \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{R} \cdot F, \text{ Вт} \quad (7.1)$$

- где
- $Q$  - тепловой поток, Вт;
  - $\frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\delta}$  - температурный градиент,  $^{\circ}\text{C}/\text{м}$ ;
  - $\Theta_1 - \Theta_2$  - изменение температуры на пути теплового потока,  $^{\circ}\text{C}$ ;
  - $\delta$  - толщина стенки, м;
  - $\lambda$  - коэффициент теплопроводности материала стенки,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;
  - $F$  - площадь поверхности стенки,  $\text{м}^2$ ;
  - $R$  - термическое сопротивление стенки  $R = \frac{\delta}{\lambda}$ ,  $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ .

Под температурным градиентом понимают изменение температуры на единицу длины потока.

Отношение теплового потока к площади поверхности теплопроводности называется **плотностью теплового потока**.

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{\lambda}{\delta} (\Theta_1 - \Theta_2), \text{ Вт} \quad (7.2)$$

- где
- $Q$  - тепловой поток, Вт;
  - $\Theta_1 - \Theta_2$  - изменение температуры на пути теплового потока,  $^{\circ}\text{C}$ ;
  - $\delta$  - толщина стенки, м;
  - $\lambda$  - коэффициент теплопроводности материала стенки,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;
  - $F$  - площадь поверхности стенки,  $\text{м}^2$ .

Коэффициент теплопроводности характеризует способность тел проводить теплоту:

$$\lambda = \frac{q \cdot \delta}{(\Theta_1 - \Theta_2)}, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}) \quad (7.3)$$

- где
- $q$  - плотность теплового потока, Вт;
  - $\Theta_1 - \Theta_2$  - изменение температуры на пути теплового потока,  $^{\circ}\text{C}$ ;
  - $\delta$  - толщина стенки, м.

**Теплообменный аппарат (ТА)** – это устройство, предназначено для передачи теплоты от одной среды к другой. Применяются: в нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей, химической промышленности, при транспортировке и хранении нефти, нефтепродуктов и газа.

По принципу действия ТА делятся на рекуперативные, регенеративные и смешительные (рис.7.1).

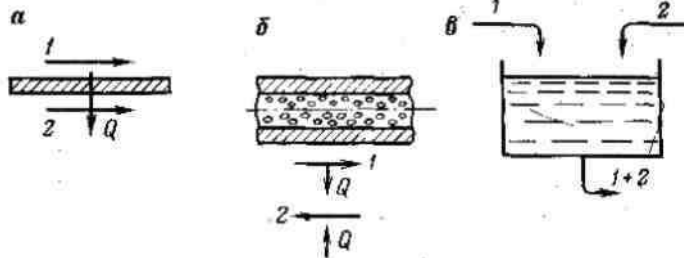


Рис. 7.1 - Схемы теплообменных аппаратов  
1 – горячий теплоноситель;  
2 – холодный теплоноситель;  
Q – тепловой поток

В **рекуперативных** ТА (рис. 7.1, а) горячая и холодная среды одновременно с разных сторон омывают поверхность теплопередачи, а теплота передается через стенку.

В **регенеративных** ТА (рис. 7.1, б) горячая и холодная среды омывают одну и ту же поверхность последовательно: сначала горячая жидкость, отдавая теплоту поверхности, а затем холодная жидкость – нагревается от поверхности

В **смесительных** ТА (рис. 7.1, в) теплопередача от горячей жидкости к холодной передается путем смешивания.

Схемы движения теплоносителей – прямоток, противоток, перекрестный ток (рис. 2). От схемы движения сред в прямой зависимости находится и теплообмен между ними, поэтому схемы движения жидкости еще называются схемами теплообмена.

Несмотря на особенности конструктивного исполнения, и способа действия различных типов ТА, тепловой расчет их имеет общие принципы.

В основу теплового расчета поверхностных ТА положены уравнения теплового баланса и обобщенные уравнения теплопередачи при переменных температурах, действительных для любых схем движения сред (схем теплообмена) и для конструктивных и проверочных расчетов.

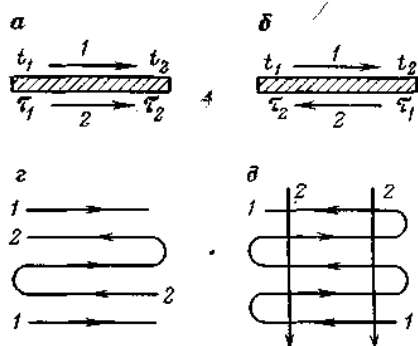


Рис. 7.2 - Схемы движения теплоносителей  
а – прямоток;  
б – противоток;  
в – перекрестный ток;  
г – смешанное движение;  
д- многократно перекрестный ток.

**Уравнение теплового баланса можно написать, если предположить, что количество теплоты, отдаваемой горячей жидкостью, равно количеству теплоты, воспринятой холодной жидкостью.**

$$Q = W_1 \cdot \Delta t = W_2 \cdot \Delta t; \text{ кВт} \quad (7.4)$$

- где  $W_1$  - водяной эквивалент нагревающей среды  $W_1=G_1 \cdot C_{p1}$ , Вт/ $^{\circ}$ С;  
 $W_2$  - водяной эквивалент нагреваемой среды  $W_2=G_2 \cdot C_{p2}$ , Вт/ $^{\circ}$ С;  
 $\Delta t$  - изменение температуры горячей жидкости,  $\Delta t=t_1-t_2$ ;  $^{\circ}$ С;  
 $\Delta \tau$  - изменение температуры холодной жидкости,  $\Delta \tau=\tau_1-\tau_2$ ;  $^{\circ}$ С;  
 $C_p$  - теплоемкость соответствующих сред, Дж/кг $\cdot$  $^{\circ}$ С;  
 $G$  - массовый расход соответствующих сред, кг/с.

### Задача №1.

**Условие:** Плоская стенка печи состоит из двух слоев: огнеупорного кирпича и строительного кирпича. Определить плотность теплового потока при стационарной теплопроводности стенки и температуру стенки на границы слоев. Исходные данные приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 - Исходные данные

Параметр	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\delta_1$ , мм	500	489	368	465	502	498	473	451	506	472	455	444
$\delta_2$ , мм	250	256	182	159	247	236	212	210	254	231	196	192
$\Theta_1$ , $^{\circ}$ С	1260	1210	1120	890	1212	1102	1008	1002	1222	1113	982	896
$\Theta_2$ , $^{\circ}$ С	108	98	88	76	96	82	78	74	110	102	72	68
$\lambda_1$ , Вт/(м $\cdot$ $^{\circ}$ С)	1,16	1,08	1,01	1,05	1,03	1,00	0,98	0,96	1,01	1,12	0,86	0,82
$\lambda_2$ , Вт/(м $\cdot$ $^{\circ}$ С)	0,58	0,54	0,48	0,44	0,42	0,38	0,32	0,31	0,36	0,52	0,28	0,26
Параметр	Вариант											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$\delta_1$ , мм	432	398	512	453	426	508	482	438	402	458	500	481
$\delta_2$ , мм	193	178	262	225	202	252	241	216	201	226	249	240
$\Theta_1$ , $^{\circ}$ С	898	856	1262	1224	988	1266	1118	1012	1000	1046	1088	1008
$\Theta_2$ , $^{\circ}$ С	64	60	112	100	90	114	106	104	92	86	88	79
$\lambda_1$ , Вт/(м $\cdot$ $^{\circ}$ С)	0,80	0,78	1,22	1,14	1,06	1,24	1,12	1,07	1,01	1,06	1,04	1,02
$\lambda_2$ , Вт/(м $\cdot$ $^{\circ}$ С)	0,24	0,20	0,60	0,56	0,46	0,62	0,53	0,45	0,34	0,32	0,30	0,29

### Методические указания к задаче №1:

1. Определить суммарную толщину стенки:

$$\Delta = \delta_1 + \delta_2, \text{ м} \quad (7.5)$$

- где  $\delta_1$  - толщина стенки огнеупорного кирпича, мм;  
 $\delta_2$  - толщина стенки строительного кирпича, мм.

2. Определить общее термическое сопротивление стенки:

$$R = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}, \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{С/Вт} \quad (7.6)$$

- где  $\lambda_1$  - коэффициент теплопроводности строительного кирпича, Вт/(м $\cdot$  $^{\circ}$ С);  
 $\lambda_2$  - коэффициент теплопроводности огнеупорного кирпича, Вт/(м $\cdot$  $^{\circ}$ С);  
 $\delta_1$  - толщина стенки огнеупорного кирпича, мм;  
 $\delta_2$  - толщина стенки строительного кирпича, мм.

3. Определить эквивалентный коэффициент теплопроводности условной однослойной стенки:

$$\lambda_{\text{э}} = \frac{\Delta}{R}, \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{С)} \quad (7.7)$$

где  $\Delta$  - суммарная толщина стенки, м;

$R$  - термическое сопротивление стенки  $R = \frac{\delta}{\lambda}, \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{С/Вт}$ .

4. Определить плотность теплового потока:

$$q = \frac{\lambda_{\text{э}}}{\Delta} (\Theta_1 - \Theta_2), \text{ Вт/м}^2 \quad (7.8)$$

где  $\lambda_{\text{э}}$  - плотность теплового потока, Вт;

$\Theta_1 - \Theta_2$  - изменение температуры на пути теплового потока,  $^{\circ}\text{С}$ ;

$\Delta$  - толщина стенки, м.

5. Определить температуру стенки на границе слоев:

$$\Theta = \Theta_1 - q \cdot R, ^{\circ}\text{С} \quad (7.9)$$

где  $q$  - плотность теплового потока, Вт;

$R$  - термическое сопротивление стенки  $R = \frac{\delta}{\lambda}, \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{С/Вт}$

$\Theta_1$  - температура внутренней поверхности стенки,  $^{\circ}\text{С}$ .

### Задача №2.

**Условие:** Для охлаждения нефти  $t_1$  до  $t_2$  с подачей  $G_1$  и предварительного подогрева водонефтяной эмульсии от температуры  $\tau_1$  с обводненностью  $W_2$  и подачей  $G_2$  в блоке регенерации теплоты на установки промышленной подготовки нефти УПН выбрать теплообменный аппарат типа «труба в трубе» с индексом противоточности  $p = 1$ . Исходные данные приведены в таблицы 7.2.

Таблица 7.2 - Исходные данные

Параметр	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$t_1, ^{\circ}\text{С}$	75	83	72	85	79	89	68	93	95	76	81	67
$t_2, ^{\circ}\text{С}$	45	51	41	55	47	59	36	57	61	44	49	36
$G_1, \text{ кг/с}$	23,9	19,7	21,4	22,3	20,5	21,7	19,4	23,1	22,7	18,8	23,4	21,2
$G_2, \text{ кг/с}$	28,9	28,4	29,3	28,1	27,7	27,3	29,1	28,6	27,8	26,8	29,2	28,6
$\tau_1, ^{\circ}\text{С}$	30	33	28	37	36	41	24	40	46	29	31	21
Параметр	Вариант											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$t_1, ^{\circ}\text{С}$	83	97	77	70	85	98	100	115	120	91	87	85
$t_2, ^{\circ}\text{С}$	52	63	41	39	38	65	44	51	47	60	59	64
$G_1, \text{ кг/с}$	22,6	24,5	25,1	27,0	19,9	29,0	22,3	25,5	26,9	24,1	23,5	28,9
$G_2, \text{ кг/с}$	29,5	27,5	28,6	26,1	23,0	25,0	27,0	27,9	28,5	28,9	30,0	30,5
$\tau_1, ^{\circ}\text{С}$	38	22	19	20	31,1	40	41	51	39	35	42	47

Параметр	Вариант											
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$t_1, ^\circ\text{C}$	91	99	76	79	81	85	92	87	93	98	75	77
$t_2, ^\circ\text{C}$	59	39	39	40	41	38	42	43	47	52	53	45
$G_1, \text{кг/с}$	27,9	28,0	24,0	25,0	24,5	25,9	27,2	28,1	29,8	26,1	25,9	26,0
$G_2, \text{кг/с}$	28,9	29,0	23,2	22,6	23,9	24,0	29,6	27,5	29,8	22,2	23,5	26,9
$\tau_1, ^\circ\text{C}$	38	15	19	23	24	25	26	41	42	44	43	40

### Методические указания к задаче №2:

1. Для проведения предложенного расчета необходимы дополнительные данные (таблица 7.2).

Таблица 7.2 – Дополнительная информация

Начальные параметры теплофизических свойств нефти			
Плотность $\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности $\lambda_1$ , Вт/м·°C	Теплоемкость изобарного процесса $C_{P1}$ , кДж/кг·°C	Кинематическая вязкость $\nu_1$ , м <sup>2</sup> /°C
873	0,115	1,994	$53,01 \cdot 10^6$
Конечные параметры теплофизических свойств нефти			
Плотность $\rho_2$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности $\lambda_2$ , Вт/м·°C	Теплоемкость изобарного процесса $C_{P2}$ , кДж/кг·°C	Кинематическая вязкость $\nu_2$ , м <sup>2</sup> /°C
907	0,174	2,424	$203,01 \cdot 10^6$

2. Определить начальный и конечный водяные эквиваленты сред:

$$W_1 = G_1 \cdot C_{P1}; \text{ Вт/}^\circ\text{C}$$

$$W_2 = G_2 \cdot C_{P2}; \text{ Вт/}^\circ\text{C} \quad (7.10)$$

3. Определить тепловой поток по формуле:

$$Q = W_1 \cdot \Delta t = W_1 (t_2 - t_1); \text{ кВт} \quad (7.11)$$

4. Определить температуру водонефтяной эмульсии на выходе из ТА по формуле:

$$\tau_2 = \tau_1 + \frac{Q}{W_2}; ^\circ\text{C} \quad (7.12)$$

где  $\tau_1$  - начальная температура среды, °C;  
 $W_2$  - водяной эквивалент нагреваемой среды  $W_2 = G_2 \cdot C_{P2}$ , Вт/°C;  
 $Q$  - тепловой поток, кВт;

5. Определить начальную и конечную температуру при противотоке по формуле:

$$\Theta_1 = t_1 - \tau_2; ^\circ\text{C}$$

$$\Theta_1 = t_2 - \tau_1; ^\circ\text{C} \quad (7.13)$$

6. Определить среднюю разность температур при противотоке по формуле:

$$\Theta_m = \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\ln \frac{\Theta_1}{\Theta_2}}; \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.14)$$

7. Определить водяной эквивалент поверхности теплопередачи по формуле:

$$kF = \frac{Q}{\Theta_m}; \text{ кВт}/^\circ\text{C} \quad (7.15)$$

8. Оценить каковы должны быть площади проходных сечений для протоков при оптимальных скоростях движения ( $\omega_1 = \omega_2 = 1,5 - 2,5$  м/с):

$$f_1 = \frac{G_1}{\rho_1 \cdot \omega_1}; \text{ м}^2$$

$$f_2 = \frac{G_2}{\rho_2 \cdot \omega_2}; \text{ м}^2 \quad (7.16)$$

где **G** - массовый расход соответствующих сред, кг/с  
**ρ** - плотность нефти, кг/м<sup>3</sup>;  
**ω** - оптимальные скорости движения среды, м/с;

9. Определить фактические скорости движения по формуле:

$$\omega_1 = \frac{G_1}{\rho_1 \cdot f_1}; \text{ м/с} - \text{нефти}$$

$$\omega_2 = \frac{G_2}{\rho_2 \cdot f_2}; \text{ м/с} - \text{эмульсии} \quad (7.17)$$

10. Определить площадь поверхности теплообмена по формуле:

$$F = \frac{kF}{k}; \text{ м}^2 \quad (7.18)$$

где **kF** - водяной эквивалент поверхности, подставить в Вт/<sup>0</sup>С;  
**k** - перерасчетный коэффициент, 55,6 Вт/м<sup>2</sup> · <sup>0</sup>С.

Сделать вывод.

#### **Контрольные вопросы:**

1. Какие формы передачи теплоты известны.
2. Сформулируйте закон Фурье
3. Дать определение следующим понятиям: тепловой поток, плотность теплового потока.
4. Что такое температурный градиент и термическое сопротивление.
5. Назвать типы ТА по принципу их действия.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №8

### РАСЧЕТ ТОПЛИВА В ПРОЦЕССЕ ГОРЕНИЯ, КПД КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА, ЭФФЕКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ ДИЗЕЛЯ, РАСХОД ТОПЛИВА

**Цель:** Закрепить теоретические знания по видам топлива, основным его частям. Приобрести навыки расчета воздуха для сжигания топлива, элементарного состава топлива; теплового расчёта поршневых ДВС.

**Общие сведения:**

**Топливо** – это любое вещество, при сгорании которого выделяется значительное количество теплоты на единицу массы или объема.

**Рабочее топливо** – это топливо в том виде, в каком оно попадает в топку котельного агрегата и сгорает. Элементарный состав топлива характеризуется содержанием следующих элементов:

$$C^P + H^P + O^P + S^P_{\text{д}} + N^P + A^P + W^P = 100\% \quad (8.1)$$

Зола и влага – нежелательные примеси, составляющие внешний баланс топлива. **Сухая масса** – это топливо, освобожденное от влаги:

$$C^c + H^c + O^c + S^c_{\text{д}} + N^c + A^c = 100\% \quad (8.2)$$

**Горючая масса** – это безводная и беззольная масса топлива:

$$C^r + H^r + O^r + S^r_{\text{д}} + N^r = 100\% \quad (8.3)$$

**Удельная высшая теплота сгорания  $Q^P_{\text{в}}$**  – это удельная теплота сгорания рабочего топлива с учетом дополнительной теплоты, которая выделяется при конденсации водяных паров.

**Удельная низшая теплота сгорания топлива  $Q^P_{\text{н}}$**  – это количество теплоты, которая выделяется в обычных практических условиях, т.е. когда водяные пары не конденсируются, а выбрасываются в атмосферу:

$$Q^P_{\text{н}} = 0,33C^P + 1,025H^P - 0,108(O^P - S^P_{\text{д}}) - 0,25W^P \quad (8.4)$$

**Задача теплового расчета поршневых ДВС** (двигатель внутреннего сгорания) – определение параметров состояния рабочего тела в характерных точках цикла, нахождение среднего индикаторного давления.

**Среднее индикаторное давление  $P_i$**  – это условное постоянное давление, которое действует на поршень в течение хода расширения, совершает работу, равную индикаторной работе двигателя  $L_i$ .

$$L_i = p_i V_H$$

$$p_i = \frac{L_i}{V_H} \quad (8.5)$$

**Индикаторная мощность  $N_i$**  – это работа газов в единицу времени в цилиндре двигателя. Индикаторная мощность (в кВт) ДВС с учётом тактности ( $2/i$ ,  $i$  – число тактов), частоты вращения коленчатого вала ( $n$ , об/мин) и числа цилиндров ( $z$ ) определяется по формуле:



$$N_i = \frac{L_i \cdot n}{10^3 \cdot 60} \cdot \frac{2}{i} \cdot z = \frac{p_i \cdot V_H \cdot n}{10^3 \cdot 60} \cdot \frac{2}{i} \cdot z; \quad (8.6)$$

где  $L_i$  - индикаторная работа двигателя, кДж;  
 $n$  - частота вращения коленчатого вала, об/мин  
 $i$  - число тактов;  
 $z$  - число цилиндров;  
 $V_H$  - рабочий объём цилиндра, м<sup>3</sup>.

Эффективная мощность на валу двигателя  $N_e$ , меньше  $N_i$  на величину механических потерь  $N_m$ .

**Балансом теплоты котельного агрегата** называется равенство между имеющимся количеством энергии и его распределением.

**Расход топлива** при проектировании и планировании определяют из уравнения теплового баланса:

$$B = \frac{Q_{к.а}}{(Q_H^P \cdot \eta_{к.а})}, \text{ кг} \quad (8.7)$$

где  $Q_{к.а}$  - тепловой поток, кДж/кг;  
 $Q_H^P$  - низшая температура сгорания 1 кг топлива, кДж/кг;  
 $\eta_{к.а}$  - коэффициент полезного действия котельного агрегата.

**Коэффициент полезного действия котельного агрегата** определяют в эксплуатационных условиях из уравнения:

$$\eta_{к.а} = \frac{Q_{к.а}}{(B \cdot Q_H^P)} \quad (8.8)$$

где  $Q_{к.а}$  - тепловой поток, кДж/кг;  
 $Q_H^P$  - низшая температура сгорания 1 кг топлива, кДж/кг;  
 $B$  - расход топлива, кг.

**Коэффициент теплопроводности** характеризует способность тел проводить теплоту:

$$\lambda = \frac{q \cdot \delta}{(\Theta_1 - \Theta_2)}, \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)} \quad (8.9)$$

где  $q$  - плотность теплового потока, Вт;  
 $\Theta_1 - \Theta_2$  - изменение температуры на пути теплового потока, °C;  
 $\delta$  - толщина стенки, м.

Тепловой расчет топочных устройств и газоходов котельных агрегатов и трубчатых печей может быть произведен по методу Н.И. Белоконя.

### **Задача №1.**

**Условие:** Определить низшую теплоту сгорания топлива, теоретическое и действительное количество воздуха для сжигания 1 кг топлива, следующего элементарного состава на горячую смесь. Исходные данные для расчета даны в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Исходные данные для расчета.

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C <sup>P</sup>	85,2	82,3	80	86,7	76,4	83	73,1	74,1	83	82
H <sup>P</sup>	10,2	11	13,5	6,48	7,31	10,86	11,85	10,35	11,63	10,08
N <sup>P</sup>	0,4	0,4	0,3	0,22	0,34	0,44	0,58	0,67	0,51	0,23
O <sup>P</sup>	0,4	0,5	0,4	1,38	0,46	0,56	0,32	0,43	0,39	0,67
S <sup>P</sup> <sub>л</sub>	0,5	0,6	0,49	0,72	0,64	0,54	0,68	0,47	0,51	0,43
A <sup>P</sup>	0,3	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3	0,4
W <sup>P</sup>	3	3,4	3,6	2,9	2,5	3,1	2,2	3,6	2,5	3
α	1,3	1,6	1,4	1,5	1,15	1,2	1,17	1,18	1,16	1,19

### Методические указания к задаче №1:

1. Определить низшую теплоту сгорания топлива по формуле Д.И. Жуковского:

$$Q_{н}^P = 0,33C^P + 1,025H^P - 0,108(O^P - S_{л}^P) - 0,25W^P, \text{ МДж/кг} \quad (8.10)$$

2. Определить теоретический удельный расход воздуха для сжигания топлива данного состава по формуле:

$$L_o = \frac{Q_{н}^P}{2,94}, \text{ кг/кг} \quad (8.11)$$

где  $Q_{н}^P$  - низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг;  
 2,94 - расход воздуха в кг на 1 МДж теплоты сгорания топлива.

3. Определить действительный расход воздуха по формуле:

$$L = L_o \cdot \alpha, \text{ кг/кг} \quad (8.12)$$

где  $L_o$  - теоретический удельный расход воздуха, кг/кг;  
 α - коэффициент избытка воздуха в топке котла.

### Задача №2.

**Условие:** Определить к.п.д. котельного агрегата ДКВР-10-13. Исходные данные приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Исходные данные

Параметр	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t <sub>v</sub> , °C	140	142	138	126	132	124	136	128	120	118	144	148
t <sub>0</sub> , °C	30	32	28	26	28	24	26	28	20	18	34	38
α <sub>y</sub>	1,45	1,48	1,38	1,26	1,32	1,24	1,36	1,28	1,20	1,18	1,44	1,48
c <sub>pm</sub> , кДж/(кг·К)	1,07	1,12	1,08	1,06	1,03	1,04	1,05	1,09	1,02	1,03	1,04	1,06
L <sub>o</sub> , кг/кг	13,4	13,6	12,9	12,6	13,2	12,4	13,6	12,8	12,0	11,8	14,4	14,8
W <sub>ф</sub> , кг	0,3	0,4	0,28	0,26	0,28	0,21	0,24	0,21	0,12	0,11	0,14	0,15
q <sub>3</sub> , %	2,0											
q <sub>4</sub> , %	0											
q <sub>5</sub> , %	1,7											
Q <sub>н</sub> <sup>P</sup> , кДж/кг	39,1 · 10 <sup>6</sup>											

Параметр	Вариант											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$t_y, ^\circ\text{C}$	150	152	116	121	134	154	156	122	112	114	158	160
$t_0, ^\circ\text{C}$	50	52	16	21	34	54	56	22	12	14	58	60
$\alpha_y$	1,50	1,52	1,16	1,21	1,34	1,54	1,56	1,22	1,12	1,14	1,58	1,59
$c_{pm}, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	1,5	1,48	1,02	1,03	1,04	1,08	1,07	1,02	1,03	1,01	1,05	1,09
$L_0, \text{кг}/\text{кг}$	15,0	15,2	11,6	12,1	13,4	15,4	15,6	12,2	11,2	11,4	15,8	15,9
$W_\phi, \text{кг}$	0,42	0,40	0,11	0,14	0,13	0,16	0,17	0,27	0,18	0,10	0,44	0,46
$q_3, \%$	2,0											
$q_4, \%$	0											
$q_5, \%$	1,7											
$Q_H^P, \text{кДж}/\text{кг}$	$39,1 \cdot 10^6$											

### Методические указания к задаче №2:

1. Определить массу газообразных продуктов сгорания на выходе из котельного агрегата:

$$G_y = 1 + \alpha_y \cdot L_0 + W_\phi, \text{ кг/кг} \quad (8.13)$$

где  $\alpha_y$  - коэффициент избытка воздуха на выходе из котельного агрегата;  
 $L_0$  - теоретический удельный расход воздуха, кг/кг;  
 $W_\phi$  - дополнительно вводимый пар, кг.

2. Определить потери теплоты с уходящими газами:

$$q_2 = \frac{G_y \cdot c_{pm} (t_y - t_0)}{Q_H^P} \cdot 100, \% \quad (8.14)$$

где  $c_{pm}$  - средняя удельная теплоемкость уходящих продуктов сгорания, кДж/(кг·К);  
 $G_y$  - масса газообразных продуктов сгорания на выходе из котельного агрегата, кг/кг;  
 $t_y$  - температура уходящих газообразных продуктов сгорания из котельного агрегата,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $t_0$  - температура окружающего воздуха,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $Q_H^P$  - низшая температура сгорания 1 кг топлива, кДж/кг.

3. Определить к. п. д. котельного агрегата:

$$\eta_{к.а} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5), \% \quad (8.15)$$

где  $q_2$  - потери теплоты с уходящими газами, %;  
 $q_3$  - потери теплоты от химической неполноты сгорания, %;  
 $q_4$  - потери теплоты от механической неполноты сгорания, %;  
 $q_5$  - потери теплоты от наружного охлаждения котельного агрегата, %.

### Задача №3.

**Условие:** Определить эффективную мощность дизеля и удельный расход топлива в эффективном процессе, шестицилиндрового четырехтактного дизельного двигателя с непосредственным впрыском топлива в цилиндр. Исходные данные приведены в таблице 3.1

Таблица 3.1 - Исходные данные

Параметр	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$Q_H^P$ , МДж/кг	42,5	39,1	28,6	35,4	42,1	26,8	36,8	38,5	41,6	42,4	25,3	24,9
$n$ , об/мин	1500	1100	986	1450	1350	856	938	948	944	989	874	950
$F$ , м <sup>2</sup>	$1,95 \cdot 10^{-3}$											
$\eta_i$	0,51											
$l$ , м	0,15											
$m$ , Па/м	$0,6 \cdot 10^8$											
$D$ , м	0,15											
$z$	6											
$S$ , м	0,18											
Параметр	Вариант											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$Q_H^P$ , МДж/кг	42,5	32,8	31,4	33,7	24,6	22,8	30,8	31,9	41,3	40,6	32,5	33,4
$n$ , об/мин	1350	864	1550	1475	986	1000	980	950	843	878	984	1100
$F$ , м <sup>2</sup>	$1,95 \cdot 10^{-3}$											
$l$ , м	0,15											
$m$ , Па/м	$0,6 \cdot 10^8$											
$D$ , м	0,15											
$z$	6											
$A_i$	1											
$\eta_i$	0,51											
$S$ , м	0,18											

### Методические указания к задаче № 3:

1. Определить среднюю скорость поршня:

$$C_m = \frac{S}{n}, \text{ м/с} \quad (8.16)$$

где  $S$  - ход поршня, м;  
 $n$  - частота вращения коленчатого вала, об/мин.

2. Определить приближенное значение среднего давления механических потерь:

$$p_m = 0,105 + 0,012 \cdot C_m, \text{ МПа} \quad (8.17)$$

где  $C_m$  - средняя скорость поршня, м/с.

3. Определить среднее индикаторное давление:

$$p_i = \frac{F}{l} \cdot m, \text{ Па} \quad (8.18)$$

где  $F$  - площадь индикаторной диаграммы двигателя, м<sup>2</sup>;  
 $l$  - длина индикаторной диаграммы двигателя, м;  
 $m$  - масштаб давлений, Па/м.

4. Определить среднее эффективное давление:

$$p_e = p_i - p_m, \text{ МПа} \quad (8.19)$$

где  $p_i$  - среднее индикаторное давление, Па;  
 $p_m$  - среднее давление механических потерь, МПа.

5. Определить рабочий объем цилиндра:

$$V_H = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot S, \text{ м}^3 \quad (8.20)$$

где  $S$  - ход поршня, м;  
 $D$  - диаметр цилиндра, м;

6. Определить эффективную мощность дизеля:

$$N_e = \frac{p_e \cdot V_H \cdot n}{10^3 \cdot 60} \cdot \frac{2}{i} \cdot z, \text{ кВт} \quad (8.21)$$

где  $p_e$  - потери теплоты с уходящими газами, МПа;  
 $V_H$  - рабочий объем цилиндра, м<sup>3</sup>;  
 $n$  - частота вращения коленчатого вала, об/мин;  
 $i$  - число тактов,  $i=4$ ;  
 $z$  - число цилиндров,  $z = 6$ .

7. Определим удельный расход топлива в эффективном процессе:

$$g_e = \frac{A_i}{Q_H^P \cdot \eta_i}, \text{ кг/(кВт·ч)} \quad (8.22)$$

где  $A_i$  - тепловой эквивалент единиц работы,  $A_i = 1$ ;  
 $Q_H^P$  - теплота сгорания топлива, МДж/кг;  
 $\eta_i$  - индикаторный к.п.д. двигателя,  $\eta_i = 0,51$ .

Сделать вывод.

### Контрольные вопросы:

1. Что называется топливом?
2. Каков элементарный состав органических топлив?
3. Перечислите основные элементы, входящие в рабочую массу топлива?
4. Дайте определение среднего индикаторного давления.
5. Какова задача теплового расчета поршневых ДВС.

## ПЕРЕЧЕНЬ РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудинов В.А., Карташов Э.М. Техническая термодинамика. М.: Высшая школа, 2000.
2. Егорушкин В.Е., Цеплович Б.И. Основы теплотехники. М.: Недра, 1982.
3. Гулак И.А. Задачи по термодинамике. М.: Недра, 1982.
4. Поршаков Б.П., Романов Б.А. Основы термодинамики и теплотехники. М.: Недра, 1988.
5. Брюханов О.А., Мелик-Аракелян А.Т., Коробко В.И. Основы гидравлики и теплотехники. М.: Академия, 2006.
6. Лучшева А.А., Чаповский А.Е. Сборник задач и руководство к практическим занятиям по основам термодинамики. М.: Недра, 1990.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	3
<b>ТЕМАТИЧЕСКА ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ</b> .....	4
<b>ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1</b> .....	4
<b>ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2</b> .....	8
<b>ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3</b> .....	11
<b>ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №4</b> .....	13
<b>ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5</b> .....	17
<b>ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №6</b> .....	22
<b>ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №7</b> .....	26
<b>ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №8</b> .....	32
<b>ПЕРЕЧЕНЬ РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	38

**КОМПЛЕКС ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ**  
по МДК 02.01 Эксплуатация нефтегазового промышленного оборудования

**Методические указания  
к выполнению практических занятий  
для студентов образовательных учреждений  
среднего профессионального образования  
всех форм обучения (очная, заочная)  
специальности**

**21.02.01 Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений**

**Часть 1**

Методические указания к выполнению практических занятий  
для студентов разработал преподаватель:  
Тетикли Надежда Михайловна

Подписано к печати *28.01.2016 г.*

Формат 60x84/16

Тираж

Объем *2,4* п.л.

Заказ

*100 экз.*

---

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования**

**«Югорский государственный университет»**

**НИЖНЕВАРТОВСКИЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИКУМ (филиал)**

**федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования**

**«Югорский государственный университет»**

628615 Тюменская обл., Ханты-Мансийский автономный округ,  
г. Нижневартовск, ул. Мира, 37.