



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»



УТВЕРЖДАЮ:

Директор института энергетики и  
автоматизированных систем  
С.И. Лукьянов  
«28» 09 2018 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

Направление подготовки  
**13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника**

Профиль программы  
**Энергообеспечение предприятий**

Уровень высшего образования – бакалавриат

Программа подготовки – академический бакалавриат

Форма обучения  
Очная

Институт  
Кафедра  
Курс  
Семестр

Энергетики и автоматизированных систем  
Теплотехнических и энергетических систем  
2  
3, 4

Магнитогорск  
2018 г.

Рабочая программа составлена на основе ФГОС ВО по направлению подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника, утвержденного приказом МОиН РФ от 01.10.2015 № 1081.

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры теплотехнических и энергетических систем «25» сентября 2018 г., протокол № 2.

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ / Е.Б. Агапитов /

Рабочая программа одобрена методической комиссией института энергетики и автоматизированных систем «26» сентября 2018 г., протокол № 1.

Председатель \_\_\_\_\_ / С.И. Лукьянов /

Рабочая программа составлена:

профессор кафедры ТиЭС, д.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ / С.В. Картавец /

Рецензент:

зам. начальника ЦЭСТ ПАО «ММК», к.т.н.

\_\_\_\_\_ / В.Н. Михайловский /



## **1 Цели освоения дисциплины**

Целями освоения дисциплины (модуля) техническая термодинамика являются:

- изучение законов сохранения и превращения энергии, применительно к системам передачи и трансформации теплоты, в том числе при химических превращениях;
- освоение методики расчета термических и калорических свойств веществ, применительно к рабочим телам тепловых машин и теплоносителям, получение навыков работы с литературными и электронными базами данных по термодинамическим свойствам веществ;
- изучение основ термодинамического анализа рабочих процессов в теплосиловых, теплонасосных и холодильных машинах и методик анализа их энергетической эффективности.

Задачи дисциплины:

- развитие у студентов когнитивных, деятельностных и личностных качеств в соответствии с требованиями ФГОС ВО;
- обеспечение базовой теплотехнической подготовки, включающей освоение основных законов термодинамики и методов их применения для анализа и расчета процессов, используемых в тепловых машинах и других теплотехнических установках;
- получение навыков работы с литературными и электронными базами справочных данных;
- освоение методов расчета термодинамических процессов в разнообразных теплоэнергетических и низкотемпературных установках;
- освоение методов термодинамического анализа и оценки эффективности процессов и циклов теплосиловых, теплонасосных и холодильных установок.

## **2 Место дисциплины в структуре образовательной программы подготовки бакалавра**

Дисциплина Б1.Б.16 «Техническая термодинамика» в базовую часть блока 1 образовательной программы.

Для изучения дисциплины необходимы знания (умения, владения), сформированные в результате изучения дисциплин:

Б1.Б.9 Математика

Б1.Б.10 Физика

Б1.Б.11 Общая и неорганическая химия

Б1.Б.13 Информатика

Б2.В.01(У) Учебная - практика по получению первичных профессиональных умений и навыков, в том числе первичных умений и навыков научно-исследовательской деятельности

Знания (умения, владения), полученные при изучении данной дисциплины будут необходимы при изучении последующих дисциплин:

Блок 1:

Б1.Б.17 Газодинамика

Б1.Б.19 Тепломассообмен

Б1.В.03 Топливо и основы теории горения

Б1.В.04 Основы трансформации теплоты

Б1.В.05 Источники и системы теплоснабжения

Б1.В.06 Котельные установки и парогенераторы

- Б1.В.07 Тепломассообменное оборудование предприятий
- Б1.В.08 Нагнетатели и тепловые двигатели
- Б1.В.10 Технологические энергоносители предприятий
- Б1.В.13 Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологии
- Б1.В.ДВ.05.01 Высокотемпературные процессы и установки
- Б1.В.ДВ.07.01 Тепловые электрические станции
- Б1.В.ДВ.09.01 Вторичные энергоресурсы промышленных предприятий
- Б1.В.ДВ.04.01 Энергобалансы предприятий
- Б1.В.ДВ.10.01 Методы инженерных исследований

### **3 Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины (модуля) и планируемые результаты обучения**

В результате освоения дисциплины (модуля) «Техническая термодинамика» обучающийся должен обладать следующими компетенциями:

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения
<b>ОПК-2 Способностью демонстрировать базовые знания в области естественнонаучных дисциплин, готовностью выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности; применять для их разрешения основные законы естествознания</b>	
Знать	-основные термодинамические законы и зависимости, работу циклов, методы термодинамического анализа, направление повышение эффективности работы теплоэнергетических установок и процессов с точки зрения термодинамики
Уметь	- определять основные параметры процессов и установок, производить оценку их эффективности и разрабатывать мероприятия по повышению данной эффективности
Владеть	--основными законами и зависимостями технической термодинамики, методами термодинамического анализа, способами совершенствования профессиональных знаний, способами демонстрации и умения анализировать ситуацию
<b>ПК-4 способностью к проведению экспериментов по заданной методике, обработке и анализу полученных результатов с привлечением соответствующего математического аппарата</b>	
Знать	- принцип действия основных измерительных приборов, алгоритм выполнения эксперимента, методов обработки полученных результатов исходя из заявленной цели, метод постановки цели эксперимента и разработка хода его выполнения
Уметь	- определять параметры системы с помощью измерительных приборов, обрабатывать полученные результаты и делать на основе них выводы, в соответствии с поставленной целью, ставить цель и разрабатывать порядок проведения эксперимента
Владеть	-методиками постановки эксперимента, определения параметров системы измерительными приборами и обработки

	полученных результатов
--	------------------------

#### 4 Структура и содержание дисциплины (модуля) для очной формы обучения

Общая трудоемкость дисциплины составляет 6 зачетных единиц - 216 акад. часов, в том числе:

- контактная работа – 111,2 акад. часов.
  - аудиторная - 106 акад. часов.
  - внеаудиторная – 5,2 акад. часов
- самостоятельная работа – 69,1 акад. часов.
- подготовка к экзамену – 35,7 акад. часа.

3 Семестр

Раздел/ тема дисциплины	Семестр	Аудиторная контактная работа (в акад. часах)			Самостоятельная работа (в акад. часах)	Вид самостоятельной работы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации	Код и структурный элемент компетенции
		лекции	лаборат. занятия	практич. занятия				
1. Раздел. Основы термодинамики	3							
1.1 Параметры состояния. Термодинамический процесс. Диаграммы. Циклы. Идеальный газ и его законы. Смеси газов. Теплоемкость.	3	2	1	1	1	Поиск дополнительной информации по заданной теме (работа с библиографическими материалами, справочниками, каталогами, словарями, энциклопедиями). Раздел 1 п. 6.2 1-14.	Конспект лекции. Устный опрос (собеседование)	ОПК-2; ПК-4; зув
1.2 Первый закон термодинамики	3	2	1	1	0,5	Самостоятельное изучение учебной и научной литературы. Расчет лабораторных работ. Раздел 1 п. 6.2 15-17.	Конспект лекции. Отчет по лабораторным работам	ОПК-2; ПК-4; зув

Раздел/ тема дисциплины	Семестр	Аудиторная контактная работа (в акад. часах)			Самостоятельная работа (в акад. часах)	Вид самостоятельной работы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации	Код и структурный элемент компетенции
		лекции	лаборат. занятия	практич. занятия				
1.3. Второй закон термодинамики	3	2	1/ИИ	1/ИИ	0,5	Работа с электронными библиотеками. Раздел 1 п. 6.2 18-25. Контрольная работа №1.	Конспект лекции. Решение контрольной работы.	ОПК-2; ПК-4; зув
<b>Итого по разделу</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>3/ИИ</b>	<b>3/ИИ</b>	<b>2</b>			
2. Раздел. Химическая термодинамика	3							
2.1 Теплота образования веществ. Тепловой эффект сгорания	3	2	1	1	1	Поиск дополнительной информации по заданной теме (работа с библиографическим материалами, справочниками, каталогами, словарями, энциклопедиями). Раздел 2 п. 6.2 1-2.	Конспект лекции. Устный опрос (собеседование)	ОПК-2; ПК-4; зув
2.2 Химическое равновесие. Константы равновесия.	3	2	1	1	0,5	Самостоятельное изучение учебной и научной литературы. Расчет лабораторных работ. Раздел 2 п. 6.2 3-4	Конспект лекции. Отчет по лабораторным работам	ОПК-2; ПК-4; зув
2.3 Расчеты температуры горения топлив. Статический теплообмен.	3	2	1/ИИ	1/ИИ	0,5	Работа с электронными библиотеками. Раздел 2 п. 6.2 3-4. Решение 1 РГР п.6.1.1.	Конспект лекции	ОПК-2; ПК-4; зув
<b>Итого по разделу</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>3/ИИ</b>	<b>3/ИИ</b>	<b>2</b>			

Раздел/ тема дисциплины	Семестр	Аудиторная контактная работа (в акад. часах)			Самостоятельная работа (в акад. часах)	Вид самостоятельной работы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации	Код и структурный элемент компетенции
		лекции	лаборат. занятия	практич. занятия				
Раздел 3. Термодинамические свойства веществ. Основные термодинамические процессы.	3							
3.1 Равновесие термодинамических систем и фазовые переходы. Термические и калорические свойства веществ. Термодинамические диаграммы состояния веществ. Водяной пар. Влажный воздух.	3	2	1	1	1	Поиск дополнительной информации по заданной теме (работа с библиографическим материалами, справочниками, каталогами, словарями, энциклопедиями). Раздел 3 п. 6.2 1-5.	Конспект лекции. Устный опрос (собеседование)	ОПК-2; ПК-4; зув
3.2 Изопроцессы. Политропные процессы. Дросселирование. Адиабатное расширение реального газа в вакуум. Процессы смешения.	3	2	1	1	0,5	Самостоятельное изучение учебной и научной литературы. Раздел 3 п. 6.2 6-10.	Конспект лекции. Отчет по лабораторным работам	ОПК-2; ПК-4; зув
3.3 Процессы сжатия в компрессоре.	3	2	1/1И	1/1И	0,5	Работа с электронными библиотеками. Раздел 3 п. 6.2 11-12	Конспект лекции	ОПК-2; ПК-4; зув
<b>Итого по разделу</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>3/1И</b>	<b>3/1И</b>	<b>2</b>			
Раздел 4. Теплосиловые циклы	3							
4.1 Теплосиловые газовые циклы. ДВС, ГТУ, реактивные	3	2	1	1	0,5	Поиск дополнительной информации по заданной теме (работа с библиографическим	Конспект лекции. Устный опрос (собеседование). Наличие решенной задачи.	ОПК-2; ПК-4; зув

Раздел/ тема дисциплины	Семестр	Аудиторная контактная работа (в акад. часах)			Самостоятельная работа (в акад. часах)	Вид самостоятельной работы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации	Код и структурный элемент компетенции
		лекции	лаборат. занятия	практич. занятия				
						материалами, справочниками, каталогами, словарями, энциклопедиями). Раздел 4 п. 6.2 1-4. П. 6.1. Решение 2РГР п.6.1.2		
4.2 Теплосиловые паровые циклы. Карно, Ренкина, с промежуточным перегревом пара, регенеративный, бинарный, ПГУ, теплофикационный.	3	2	1	1	0,5	Самостоятельное изучение учебной и научной литературы. Раздел 4 п. 6.2 5-9.	Конспект лекции. Отчет по лабораторным работам	ОПК-2; ПК-4; зув
4.3 Циклы прямого преобразования теплоты в электроэнергию.	3	2	1/1И	1/1И	1	Работа с электронными библиотеками. Раздел 4 п. 6.2 10-13. Контрольная работа №2.	Конспект лекции. Решение контрольной работы.	ОПК-2; ПК-4; зув
<b>Итого по разделу</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>3/1И</b>	<b>3/1И</b>	<b>2</b>			
<b>Раздел 5. Холодильные циклы</b>	<b>3</b>							
5.1 Обратные тепловые циклы. Холодильные установки. Цикл воздушной холодильной установки. Цикл парокомпрессионной холодильной установки.	3	2	1	1	0,5	Поиск дополнительной информации по заданной теме (работа с библиографическим материалами, справочниками, каталогами, словарями, энциклопедиями). Раздел 5 п. 6.2 1-8.	Конспект лекции. Устный опрос (собеседование)	ОПК-2; ПК-4; зув
5.2 Цикл парожеткорной холодильной	3	2	1	1	1	Самостоятельное изучение	Конспект лекции. Отчет	ОПК-2;

Раздел/ тема дисциплины	Семестр	Аудиторная контактная работа (в акад. часах)			Самостоятельная работа (в акад. часах)	Вид самостоятельной работы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации	Код и структурный элемент компетенции
		лекции	лаборат. занятия	практич. занятия				
установки. Цикл абсорбционной холодильной установки.						учебной и научной литературы. Раздел 5 п. 6.2 9-16	по лабораторным работам	ПК-4; зув
5.3 Цикл термоэлектрической холодильной установки. Принцип работы теплового насоса. Методы ожижения газов.	3	2	1/1И	1/1И	0,5	Работа с электронными библиотеками. Раздел 5 п. 6.2 17-22.	Конспект лекции	ОПК-2; ПК-4; зув
<b>Итого по разделу</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>3/1И</b>	<b>3/1И</b>	<b>2</b>			
6. Раздел. Процессы течения газов и жидкостей	3							
6.1 Основные уравнения процессов течения. Скорость звука. Истечение из суживающихся сопл	3	2	1	1	1	Самостоятельное изучение учебной и научной литературы. Раздел 6 п. 6.2 1-3.	Конспект лекции. Устный опрос (собеседование)	ОПК-2; ПК-4; зув
6.2 Переход через скорость звука. Сопло Лаваля.	3	2	1	1	1	Работа с электронными библиотеками. Раздел 6 п. 6.2 4-9.	Конспект лекции. Отчет по лабораторным работам.	ОПК-2; ПК-4; зув
6.3 Адиабатное течение с трением. Температура адиабатного торможения	3	2	1/1И	1/1И	2,2	Поиск дополнительной информации по заданной теме (работа с библиографическим материалами, справочниками, каталогами, словарями, энциклопедиями). Раздел 6 п.	Конспект лекции.	ОПК-2; ПК-4; зув

Раздел/ тема дисциплины	Семестр	Аудиторная контактная работа (в акад. часах)			Самостоятельная работа (в акад. часах)	Вид самостоятельной работы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации	Код и структурный элемент компетенции
		лекции	лаборат. занятия	практич. занятия				
						6.2 10-11.		
Итого по разделу	3	6	3/1И	3/1И	4,2			
Итого за семестр	3	36	18/6 И	18/6 И	14,2			
Промежуточный контроль (экзамен)		5			35,7		Устный экзамен	ОПК-2; ПК-4; зув

Раздел/ тема дисциплины	Семестр	Аудиторная контактная работа (в акад. часах)			Самостоятельная работа (в акад. часах)	Вид самостоятельной работы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации	Код и структурный элемент компетенции
		лекции	лаборат. занятия	практич. занятия				
1. Раздел. Исследование эффективности теплосиловых газовых циклов	4							
1.1 Исследование оптимальности степени сжатия. Определение оптимальных параметров цикла ГТУ	4			2/2И	4	Поиск дополнительной информации по заданной теме (работа с библиографическими материалами, справочниками, каталогами, словарями, энциклопедиями). Выполнение курсовой работы п.6.4.	Результаты решения курсовой работы	ОПК-2; ПК-4; зув
1.2 Расчеты горения топлива и определение температуры горения.	4			2	4	Выполнение курсовой работы п.6.4.	Результаты решения курсовой работы	ОПК-2; ПК-4; зув
1.3. Расчеты состава продуктов сгорания и расхода рабочего тела в цикле.	4			2/2И	4	Работа с электронными библиотеками. Выполнение курсовой работы п.6.4.	Результаты решения курсовой работы	ОПК-2; ПК-4; зув
1.4 Расчеты полезной работы в цикле и мощности ГТУ	4			2	2	Поиск дополнительной информации по заданной теме (работа с библиографическими материалами, справочниками, каталогами, словарями, энциклопедиями). Выполнение курсовой работы п.6.4.	Результаты решения курсовой работы	ОПК-2; ПК-4; зув
1.5 Расчеты общей эффективности	4			2/2И	2	Выполнение курсовой работы	Результаты решения	ОПК-2;

Раздел/ тема дисциплины	Семестр	Аудиторная контактная работа (в акад. часах)			Самостоятельная работа (в акад. часах)	Вид самостоятельной работы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации	Код и структурный элемент компетенции
		лекции	лаборат. занятия	практич. занятия				
цикла ГТУ.						п.6.4.	курсовой работы	ПК-4; зув
1.6 Расчеты вариантов охлаждения отходящих газов ГТУ	4			2	1	Работа с электронными библиотеками.	Результаты решения курсовой работы	ОПК-2; ПК-4; зув
<b>Итого по разделу</b>	<b>4</b>			<b>12/6И</b>	<b>17</b>			
2. Раздел Исследование эффективности теплосиловых паровых циклов								
2.1 Расчет эффективности цикла Карно для влажного пара.	4			2/2И	4	Поиск дополнительной информации по заданной теме (работа с библиографическим материалами, справочниками, каталогами, словарями, энциклопедиями). Выполнение курсовой работы п.6.4.	Результаты решения курсовой работы	ОПК-2; ПК-4; зув
2.2 Расчет эффективности цикла Ренкина	4			2	3	Выполнение курсовой работы п.6.4.	Результаты решения курсовой работы	ОПК-2; ПК-4; зув
2.3. Расчет эффективности цикла с перегревом пара	4			2/2И	3	Работа с электронными библиотеками. Выполнение курсовой работы п.6.4.	Результаты решения курсовой работы	ОПК-2; ПК-4; зув
2.4 Расчет эффективности цикла с промежуточным перегревом	4			2	2	Поиск дополнительной информации по заданной теме	Результаты решения курсовой работы	ОПК-2; ПК-4;

Раздел/ тема дисциплины	Семестр	Аудиторная контактная работа (в акад. часах)			Самостоятельная работа (в акад. часах)	Вид самостоятельной работы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации	Код и структурный элемент компетенции
		лекции	лаборат. занятия	практич. занятия				
						(работа с библиографическими материалами, справочниками, каталогами, словарями, энциклопедиями). Выполнение курсовой работы п.6.4.		зуб
2.5 Расчет эффективности цикла с регенерацией	4			2/2И	3	Выполнение курсовой работы п.6.4.	Результаты решения курсовой работы	ОПК-2; ПК-4; зуб
2.6 Расчет эффективности цикла теплофикации	4			2	3	Работа с электронными библиотеками. Выполнение курсовой работы п.6.4.	Результаты решения курсовой работы	ОПК-2; ПК-4; зуб
<b>Итого по разделу</b>	<b>4</b>			<b>12/6И</b>	<b>18</b>			
<b>3. Раздел. Парогазовые установки</b>								
3.1 Расчет эффективности варианта с котлом-утилизатором.	4			2	2	Поиск дополнительной информации по заданной теме (работа с библиографическими материалами, справочниками, каталогами, словарями, энциклопедиями). Выполнение курсовой работы п.6.4.	Результаты решения курсовой работы )	ОПК-2; ПК-4; зуб
3.2 Расчет эффективности варианта со сбросом в котел.	4			2	3	Выполнение курсовой работы п.6.4.	Результаты решения курсовой работы	ОПК-2; ПК-4; зуб
3.3. Расчет эффективности варианта с	4			2/2И	4	Работа с электронными	Результаты решения	ОПК-2;

Раздел/ тема дисциплины	Семестр	Аудиторная контактная работа (в акад. часах)			Самостоятельная работа (в акад. часах)	Вид самостоятельной работы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации	Код и структурный элемент компетенции
		лекции	лаборат. занятия	практич. занятия				
параллельной работой						библиотеками. Выполнение курсовой работы п.6.4.	курсовой работы	ПК-4; зув
3.4 Расчет эффективности варианта замкнутой ПГУ	4			2	6	Поиск дополнительной информации по заданной теме (работа с библиографическими материалами, справочниками, каталогами, словарями, энциклопедиями). Выполнение курсовой работы п.6.4.	Результаты решения курсовой работы	ОПК-2; ПК-4; зув
3.5 Расчет эффективности варианта с полунезависимой схемой	4			2	4,9	Самостоятельное изучение учебной и научной литературы. Выполнение курсовой работы п.6.4.	Результаты решения курсовой работы	ОПК-2; ПК-4; зув
Итого по разделу	4			10/2И	19,9		Зачет	
Итого за семестр	4			34/14И	54,9			
Промежуточный контроль (защита курсовой работы, зачет)	6				1,1	Подготовка и оформление курсовой работы	Защита курсовой работы/зачет	ОПК-2; ПК-4; зув
<b>Итого по дисциплине</b>		<b>36</b>	<b>18/6И</b>	<b>52/14И</b>	<b>69,1</b>			

## 5 Образовательные и информационные технологии

1. Для решения предусмотренных видов учебной работы при изучении дисциплины «Техническая термодинамика» в качестве образовательных технологий используются как традиционные, так и модульно - компетентностные технологии:

2. 1. Традиционные образовательные технологии ориентируются на организацию образовательного процесса, предполагающую прямую трансляцию знаний от преподавателя к студенту (преимущественно на основе объяснительно-иллюстративных методов обучения). Учебная деятельность студента носит в таких условиях, как правило, репродуктивный характер.

3. Практическое занятие, посвященное освоению конкретных умений и навыков по предложенному алгоритму.

4. Лабораторная работа – организация учебной работы с реальными материальными и информационными объектами, экспериментальная работа с аналоговыми моделями реальных объектов.

5. Информационные технологии – обучение в электронной образовательной среде с целью расширения доступа к образовательным ресурсам, для чего при проведении отдельных занятий и организации самостоятельной работы студентов используются электронные версии курса лекций и расчетно-графической работы.

6. Работа в команде – совместная деятельность студентов в группе при расчетах на практических и лабораторных занятиях, направленная на решение общей задачи путем сложения результатов индивидуальной работы членов группы.

7. Case-study - анализ реальных проблемных ситуаций, имевших место в соответствующей области профессиональной деятельности, и поиск вариантов лучших решений.

8. Междисциплинарное обучение – использование знаний из разных областей и их группировка в контексте решаемой задачи.

## 6 Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов.

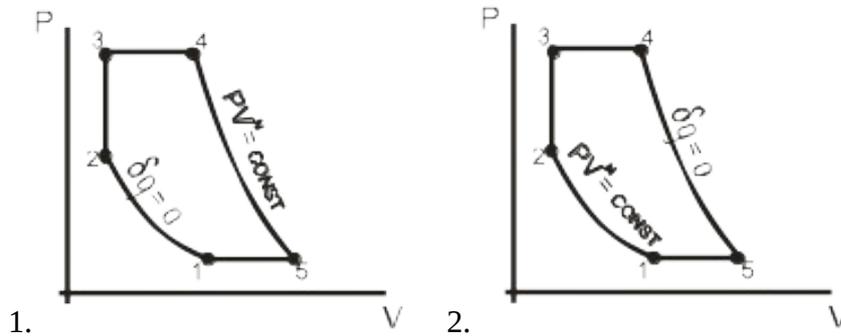
### 6.1 Оценочные средства для проведения текущего контроля успеваемости

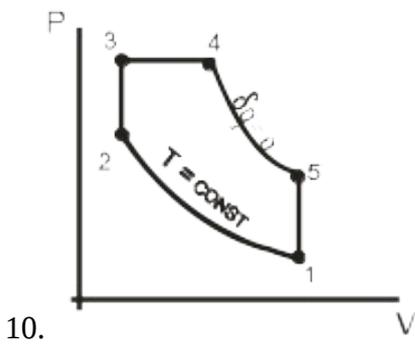
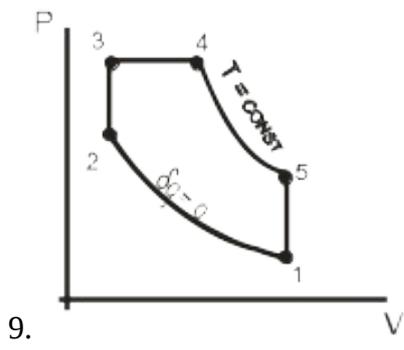
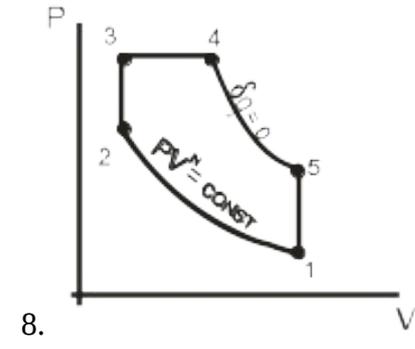
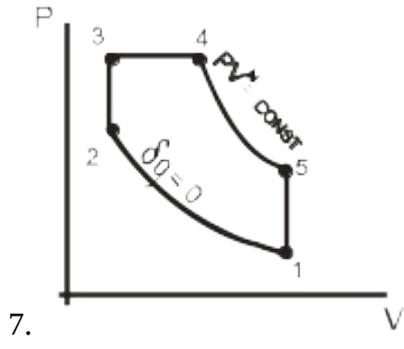
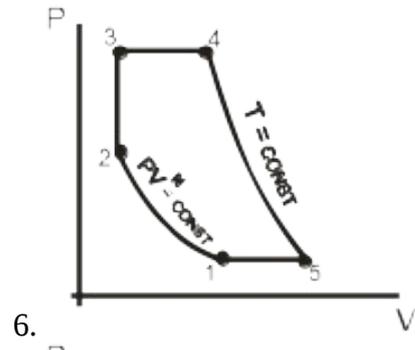
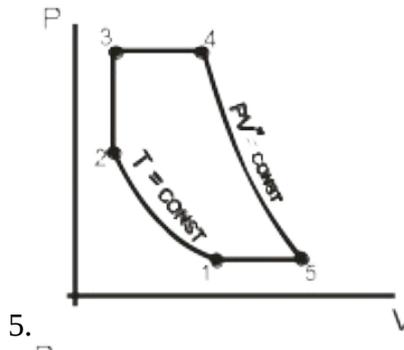
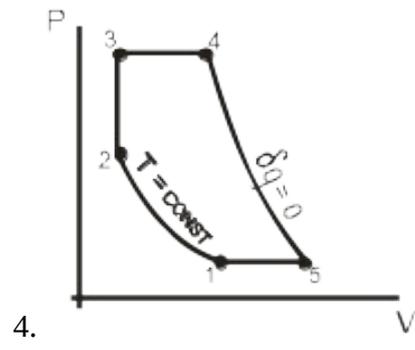
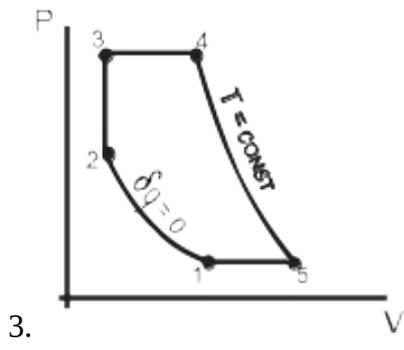
#### 6.2.1 Задания для выполнения РГР – 1:

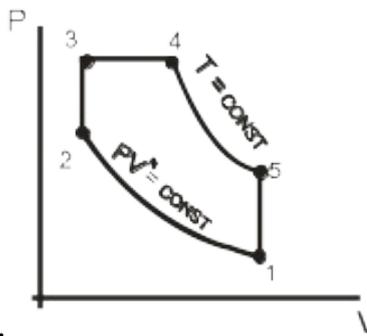
Исходные данные к РГР-1:									
№ вар.	$P_1$ , МПа	$t_1$ , °C	$\frac{V_1}{V_2}$			$n$		$\eta_0$	рабочее тело
1	1,5	25	3,0	1,8	1,6	1,25	0,97	0,93	воздух
2	1,0	20	2,9	1,7	1,6	1,27	0,98	0,92	азот
3	0,8	17	2,8	2,0	1,7	1,26	0,95	0,90	кислород
4	0,6	22	3,2	2,0	1,8	1,30	0,94	0,87	СО
5	0,9	18	3,1	2,2	1,6	1,27	0,93	0,86	СО <sub>2</sub>
6	1,2	20	2,8	1,7	1,7	1,25	0,92	0,84	воздух
7	1,0	25	3,0	2,0	1,6	1,24	0,89	0,81	азот
8	0,9	23	2,7	1,6	1,7	1,28	0,93	0,87	азот атмосферный
9	1,3	20	3,2	1,7	1,5	1,29	0,94	0,89	кислород

10	1,2	24	3,0	1,6	1,6	1,24	0,93	0,86	СО
11	0,8	22	2,7	1,8	1,7	1,26	0,95	0,89	СО <sub>2</sub>
12	0,5	27	3,0	1,6	1,8	1,27	0,97	0,92	воздух
13	0,7	21	3,2	1,8	1,6	1,29	0,95	0,90	азот
14	0,6	24	3,5	1,6	1,9	1,27	0,94	0,87	кислород
15	0,8	22	3,2	1,8	1,7	1,26	0,96	0,90	СО
16	1,2	20	4,0	1,7	1,6	1,25	0,97	0,92	СО <sub>2</sub>
17	1,0	18	3,7	1,8	1,6	1,27	0,96	0,90	азот атмосферный
18	0,9	20	3,5	1,7	1,7	1,28	0,95	0,89	воздух
19	0,95	21	3,4	1,8	1,6	1,26	0,94	0,88	азот
20	1,2	18	3,7	1,6	1,7	1,25	0,96	0,92	кислород
21	1,5	20	3,0	1,8	1,7	1,26 <sup>1</sup>	0,95	0,90	СО
22	1,3	22	2,9	1,7	1,9	1,27 <sup>1</sup>	0,97	0,91	СО <sub>2</sub>
23	1,2	23	3,2	1,8	1,7	1,29 <sup>1</sup>	0,93	0,85	воздух
24	1,0	22	3,1	1,9	1,7	1,28 <sup>1</sup>	0,94	0,87	азот
25	1,0	24	3,4	1,8	1,9	1,27 <sup>1</sup>	0,95	0,88	кислород
26	1,2	25	3,2	1,7	1,7	1,28 <sup>1</sup>	0,94	0,87	СО
27	1,4	18	3,0	1,8	1,7	1,30 <sup>1</sup>	0,95	0,82	СО <sub>2</sub>
28	1,1	25	3,1	1,6	1,5	1,28 <sup>1</sup>	0,89	0,80	азот атмосферный
29	1,05	22	2,97	1,8	1,6	1,26 <sup>1</sup>	0,92	0,83	воздух
30	0,75	19	2,70	1,6	1,6	1,25 <sup>1</sup>	0,92	0,80	азот атмосферный

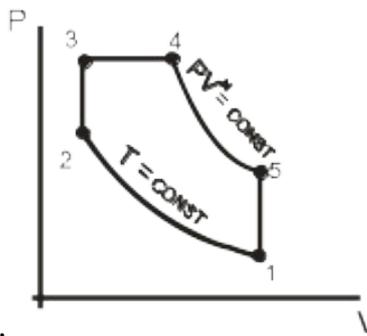
Цикл теплового двигателя (по вариантам):



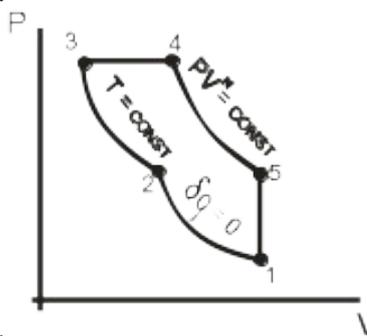




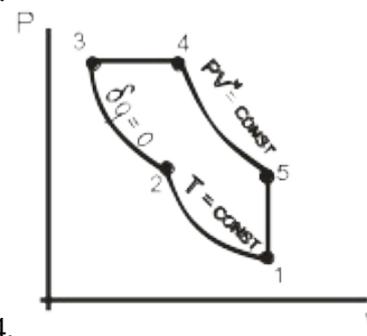
11.



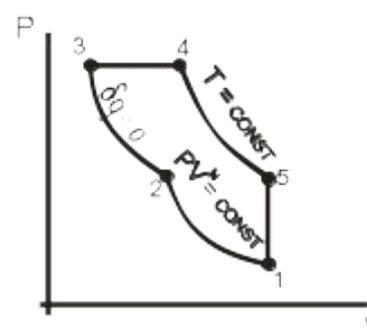
12.



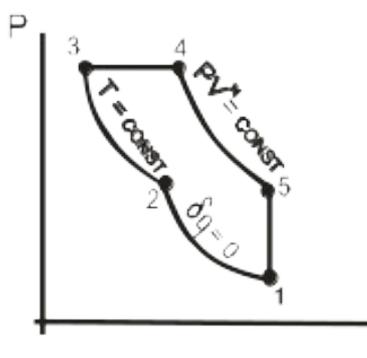
13.



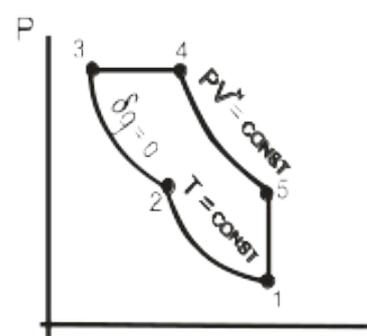
14.



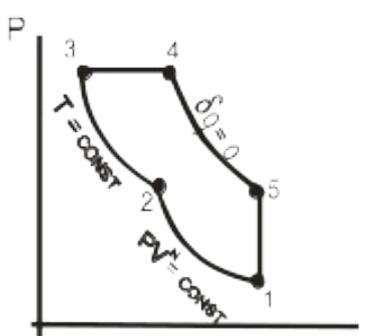
15.



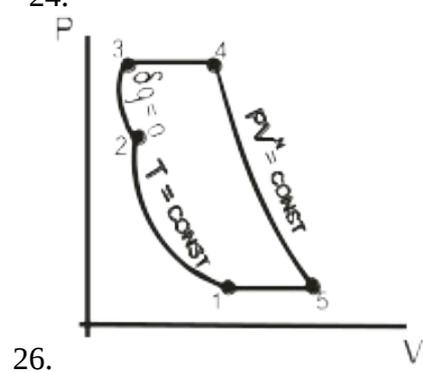
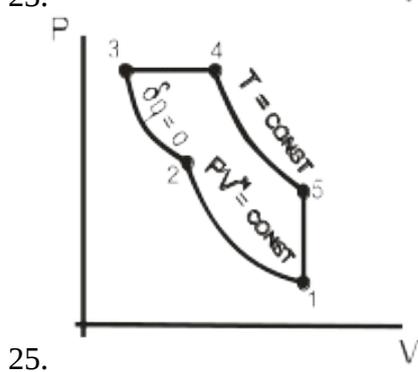
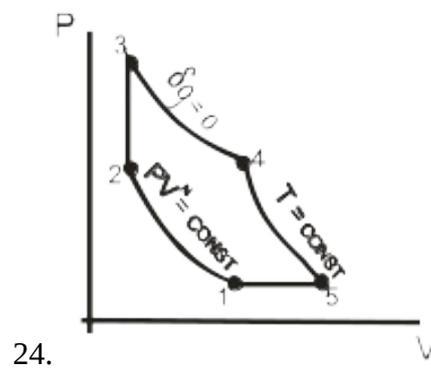
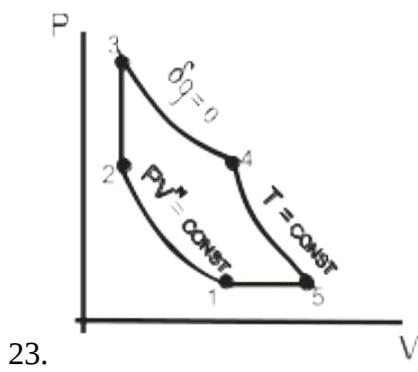
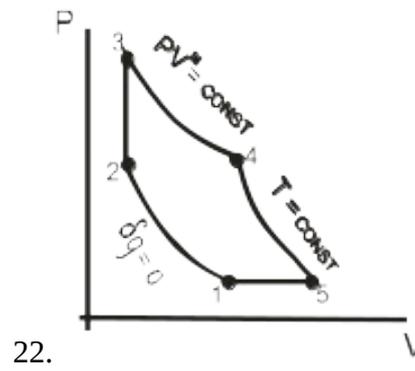
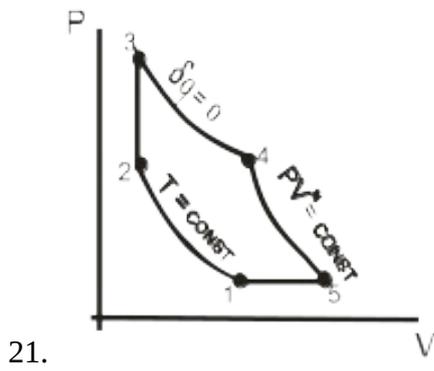
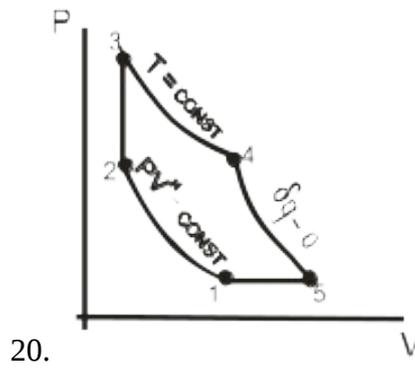
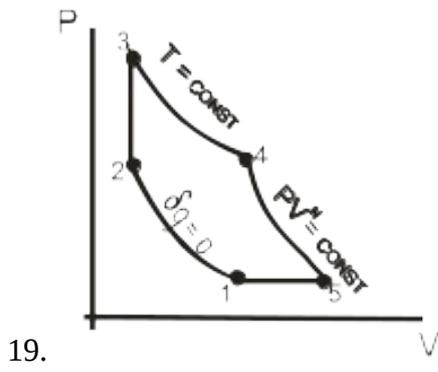
16.

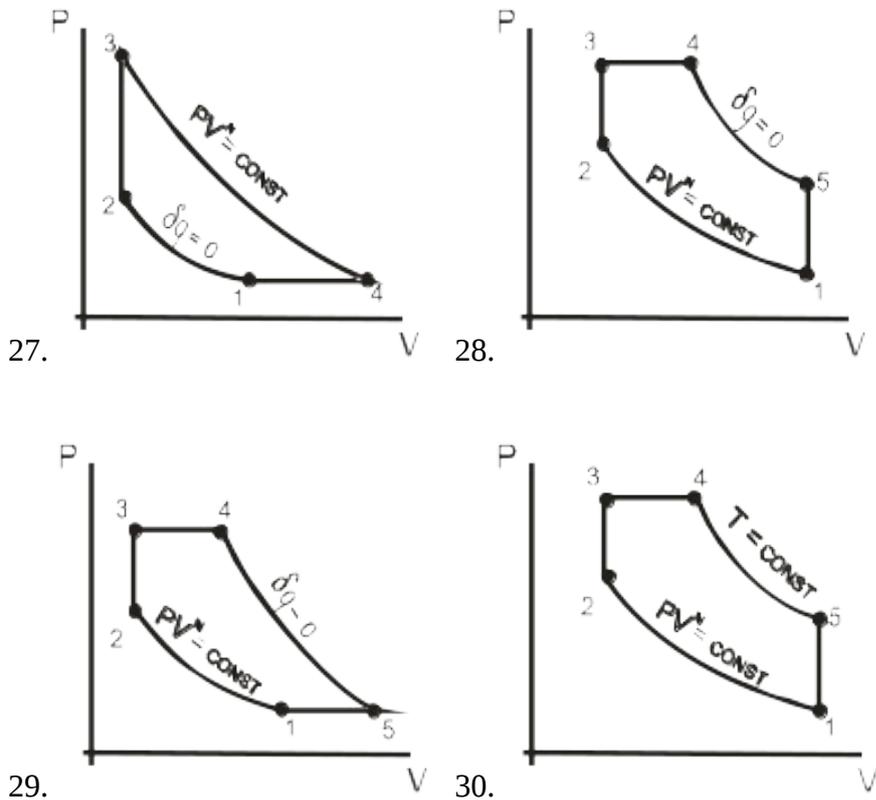


17.



18.





6.2.2. Задания для выполнения РГР – 2:

Задача 1

К паровой турбине пар поступает с параметрами  $P_1$ ,  $t_1$ . После адиабатного расширения пара в первой ступени до температуры  $T_a$ , он направляется в промежуточный подогреватель, где при постоянном давлении его температура повышается до  $T_b$ . Затем пар расширяется в последующих ступенях турбины до давления  $P_2$  в конденсаторе. Относительный внутренний КПД турбины  $\eta_{oi}$ , насоса  $\eta_{oi}$ . Определить:

1. Параметры рабочего тела в характерных точках цикла (свести в таблицу);
2. Теоретические и действительные работы турбины, насоса и цикла в целом;
3. Термический и абсолютный внутренний КПД цикла с вторичным перегревом и без него (цикла Ренкина);
4. На сколько уменьшится влажность пара на выходе из турбины по сравнению с циклом Ренкина;
5. Каковы среднеинтегральные температуры подвода и отвода теплоты в цикле с вторичным перегревом и без него;

Построить на  $P - v$ ,  $T - s$ ,  $h - s$  диаграммах (в масштабе) идеальный и действительный цикл с промежуточным перегревом и без него.

Исходные данные:

Параметры	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Давление пара перед турбиной, $P_1$ , МПа	17	15	13	11	10	12	9	13	14	9
Температура пара перед турбиной, $t_1$ , °С	550	560	540	570	560	510	540	550	560	520
Температура пара перед промежуточным перегревом, $t_a$ , °С	300	320	370	380	350	420	310	320	340	330
Температура пара перед второй ступенью	530	540	520	550	580	560	530	540	530	520

турбины, $t_b$ , °C										
Давление пара на выходе из турбины $P_2$ , МПа		0,003		0,0035		0,004		0,003		
Относительный внутренний КПД:										
турбины $\eta_{oi}^T$	0,86	0,88	0,90	0,87	0,86	0,85	0,91	0,94	0,95	0,92
насоса $\eta_{oi}^H$	0,82	0,85	0,86	0,84	0,83	0,82	0,88	0,87	0,90	0,84

### Задача 2

В паровую турбину поступает пар с параметрами  $P_1, t_1$ .

Турбина имеет два регенеративных отбора в подогреватели поверхностного типа с каскадным сбросом конденсата греющего пара. Давление отборов  $P_{01}$  и  $P_{02}$ . Давление в конденсаторе  $P_2$ . Относительный внутренний КПД турбины  $\eta_{oi}$ .

Определить:

1. Параметры рабочего тела в характерных точках цикла (свести в таблицу);
2. Теоретическую и действительную работу турбины (цикла);
3. Термический и абсолютный внутренний КПД цикла с регенерацией и без нее (цикл Ренкина);
4. Экономию за счет введения регенеративного подогрева;
5. Каковы среднеинтегральные температуры подвода и отвода теплоты в цикле с регенерацией и без нее;

Построить на  $P - v, T - s, h - s$  диаграммах (в масштабе) идеальный и действительный циклы ПТУ с регенерацией.

#### Исходные данные:

Параметры	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Давление пара перед турбиной $P_1$ , МПа	15	17	10	8	12	9	12	10	11	9
Температура пара перед турбиной $t_1$ , °C	520	560	500	450	510	480	530	540	550	490
Давление пара в первом отборе $P_{01}$ , МПа	0,7	0,5	0,6	0,8	0,4	0,5	0,6	0,9	0,7	1,2
Давление пара во втором отборе $P_{02}$ , МПа	0,12	0,14	0,15	0,11	0,15	0,13	0,10	0,20	0,16	0,3
Давление пара на выходе из турбины $P_2$ , МПа		0,003			0,0035			0,004		
Относительный внутренний КПД турбины $\eta_{oi}$	0,87	0,85	0,89	0,91	0,90	0,94	0,88	0,93	0,92	0,92

### Задача 3

На ТЭЦ установлена турбина, в которой работает пар с начальными параметрами  $P_1, t_1$ . Турбина имеет два отбора. Первый

– производственный при давлении  $P_{01}$ , расход пара –  $D_{01}$ . Второй - теплофикационный при давлении  $P_{02}$ , расход пара  $D_{02}$ . Давление в конденсаторе  $P_2$ . Мощность турбины  $N_s$ . Температура питательной воды  $t_{п.в.}$ . Относительный внутренний КПД турбины  $\eta_{oi}$ .

Определить:

1. Параметры рабочего тела в характерных точках цикла (свести в таблицу);
2. Теоретическую и действительную работу турбины (цикла);
3. Расход пара в конденсаторе;
4. Количество теплоты на производственные и теплофикационные нужды;
5. Теоретический и действительный коэффициент использования теплоты;

Построить на  $P - v, T - s, h - s$  диаграммах (в масштабе) идеальный и действительный цикл ТЭЦ.

#### Исходные данные:

Параметры	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Давление пара перед турбиной $P_1$ , МПа	5	7	10	12	15	18	9	11	14	6
Температура пара перед турбиной $t_1$ , °С	470	510	540	550	560	570	520	530	550	560
Давление пара в первом отборе $P_{01}$ , МПа	1	2	1,5	2	2,5	2,5	1	2	2,5	1,8
Давление пара во втором отборе $P_{02}$ , МПа	0,15	0,18	0,20	0,25	0,20	0,30	0,15	0,17	0,20	0,5
Расход пара в первом отборе $D_{01}$ , т / ч	20	15	18	25	30	35	16	14	10	20
Расход пара во втором отборе $D_{02}$ , т / ч	45	40	35	15	20	25	30	36	24	25
Давление пара на выходе из турбины $P_2$ , МПа		0,003			0,0035			0,004		
Мощность турбины $N$ , МВт	15	25	30	35	45	40	35	30	40	18
Температура питательной воды, С	130	125	140	130	150	125	130	145	135	120
Относительный внутренний КПД турбины	0,85	0,86	0,82	0,84	0,88	0,83	0,90	0,92	0,89	0,93

## 6.2. Перечень вопросов для текущего контроля

### Раздел 1:

1. Дайте определение идеального газа.
2. Что такое термодинамическая система? Какая система называется закрытой, открытой, замкнутой, адиабатной?
3. Что такое уравнение состояния? Написать уравнение состояния идеального газа.
4. Что такое термодинамический процесс? Объяснить понятия равновесный и неравновесный процессы.
5. Что такое теплота? Единицы измерения.
6. Что такое работа? Единицы измерения.
7. Объяснить сходство и различие между теплотой и работой. Можно ли их назвать энергиями?
8. Что такое внутренняя энергия? Функцией чего она является и как может быть вычислена? Свойства внутренней энергии.
9. Что такое энтальпия газа? Как она связана с внутренней энергией? Физический смысл энтальпии. Функцией чего она является? Объяснить ее свойства.
10. Как изображаются работа расширения и располагаемая работа на диаграмме состояния в P-v координатах?
11. Что такое массовая, объемная, мольная теплоемкость? Изобарная и изохорная теплоемкость?
12. Почему изобарная теплоемкость больше изохорной? Какая связь между ними?
13. От каких параметров зависит теплоемкость идеального газа? Как определяется изменение энтальпии и внутренней энергии идеального газа, если известны истинные и средние теплоемкости при постоянном давлении и при постоянном объеме?
14. Почему теплоемкость зависит от процесса? Дайте значения теплоемкостей для основных процессов изменения состояния.
15. Выведите уравнение Майера. Для какого газа оно справедливо? Физический смысл индивидуальной и универсальной газовой постоянной?
16. Напишите аналитические выражения I закона термодинамики через энтальпию и

внутреннюю энергию, объясните их. Объясните содержание закона.

17. Напишите аналитическое выражение II закона термодинамики. Содержание и основные формулировки II закона термодинамики.

18. Что такое эксергия системы в замкнутом объеме? Как ее определить?

19. Что такое эксергия открытой системы (потока)? Как ее определить?

20. Объясните понятие эксергии теплоты. Как она рассчитывается?

21. Как изменяется работоспособность (эксергия) изолированной системы при протекании в ней необратимых процессов? Как подсчитать это изменение работоспособности?

22. В чем сущность статистического толкования второго закона термодинамики? Физический смысл энтропии. Связь между энтропией и термодинамической вероятностью.

23. Что такое обратимые и необратимые процессы? Изменение энтропии системы в необратимых процессах. Изменение энтропии в адиабатных процессах.

24. Как может изменяться энтропия в изолированной системе при протекании в ней различных термодинамических процессов? Дайте примеры.

25. Покажите, что термодинамический КПД идеального обратимого цикла Карно

$$\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

не зависит от свойств рабочего тела, при помощи которого совершается цикл.

### Раздел 2:

1. Напишите уравнение Ван-дер-Ваальса. Объясните его смысл.

2. Что называется влажным, сухим насыщенным и перегретым паром?

3. Что такое фаза и что называется фазовым превращением? Приведите формулу правила фаз Гиббса и разъясните ее.

4. Напишите уравнение Клапейрона - Клаузиуса для теплоты парообразования и поясните, как можно использовать его для определения теплоты плавления и сублимации твердых тел.

### Раздел 3:

1. Напишите уравнение I закона термодинамики для потока в развернутой форме и дайте объяснения для всех членов уравнения.

2. Для осуществления каких процессов применяются сопла и диффузоры? Приведите примеры технического использования этих устройств.

3. Как получить уравнение неразрывности потока в дифференциальной форме? Преобразуйте уравнение неразрывности потока в дифференциальной форме применительно к истечению идеального газа.

4. Упростите уравнение первого закона термодинамики для потока применительно к случаю адиабатного истечения через сопло и получите из него выражение для скорости потока за соплом в общем виде и применительно к идеальному газу.

5. Что такое параметры торможения? Как они определяются для идеального и реального газов?

6. Как физически объяснить, почему при снижении внешнего давления ниже критического, скорость истечения через суживающееся сопло перестает увеличиваться?

7. Как определяются скорость и расход газа при истечении из суживающегося сопла, если давление среды  $P_{cp} > P_{кр}$ ?

8. Обоснуйте устройство сопла Лавалья. Как определяется скорость и расход газа при истечении газа из сопла Лавалья при  $P_2 < P_{кр}$ ?

9. Изобразите на T-s и h-s - диаграммах обратимый и необратимый процессы истечения.

10. Опишите реальный процесс дросселирования. Преобразуйте уравнение первого закона термодинамики для потока применительно к идеальному процессу дросселирования.

11. Как изменяются параметры газа (или пара) при дросселировании? Почему при

дросселировании не изменяется температура идеального газа? Как изменяется температура реального газа?

12. Что такое температура инверсии, точка инверсии? Как изображается на P-t -диаграмме инверсионная кривая?

#### Раздел 4:

1. Изобразите в P-v и T-s - диаграммах изотермический, адиабатный и политропный процессы сжатия рабочего тела в компрессоре и покажите техническую работу, затрачиваемую на эти процессы. Какой из них наиболее выгоден?

2. Изобразите индикаторную диаграмму идеального одноступенчатого компрессора. В чем заключается принципиальное различие между ней и P-v - диаграммой процесса в том же компрессоре?

3. Что такое объемный КПД компрессора? Каково влияние вредного пространства на работу компрессора?

4. С какой целью применяется многоступенчатое сжатие? Покажите схему многоступенчатого компрессора, P-v и T-s -диаграмму с изображением процессов в многоступенчатом компрессоре (процесс сжатия – адиабатный).

5. Изобразите в T-s – диаграмме процесс политропного сжатия газа в многоступенчатом компрессоре при показателе политропы  $1 < n < \kappa$ . Покажите на графике теплоту, отводимую от газа в цилиндрах компрессора и в промежуточных холодильниках.

6. Как вычисляется необходимое число ступеней сжатия в многоступенчатом компрессоре при заданных начальном и конечном давлениях рабочего тела.

7. Что такое внутренний относительный КПД компрессора и в каких случаях он используется для оценки эффективности его работы?

8. Какие предпосылки положены в основу идеализации циклов двигателей внутреннего сгорания? Изобразите в P-v и T-s –диаграммах идеальный цикл поршневых ДВС с подводом теплоты при постоянном объеме, при постоянном давлении и со смешанным подводом теплоты и сопоставьте их с рабочими процессами в реальных двигателях.

9. Как влияет степень сжатия на термический КПД идеального цикла поршневых ДВС и какие факторы ограничивают ее величину?

10. Как влияет степень предварительного расширения на термический КПД идеального цикла ДВС с подводом теплоты при постоянном давлении?

11. Изобразите принципиальную схему газотурбинной установки без регенерации. Опишите процессы в ее основных элементах и постройте идеальный цикл установки в P-v и T-s –диаграммах.

12. Изобразите принципиальную схему ГТУ с регенерацией. Опишите процессы в отдельных ее элементах и покажите на графике P-v и T-s –диаграммах, как осуществляется в такой установке регенерация теплоты.

13. Изобразите на T-s – диаграмме реальный цикл ГТУ с регенерацией теплоты. Объясните, что такое внутренний относительный КПД компрессора и турбины, внутренний абсолютный КПД установки, а также, что такое степень регенерации.

#### Раздел 5:

1. Покажите, что применение пара в теплосиловых установках повышает коэффициент заполнения цикла. Каким требованиям должно удовлетворять рабочее тело, при помощи которого осуществляется паросиловой цикл?

2. Почему основным рабочим телом паросиловых установок служит водяной пар? Каковы его преимущества и недостатки по сравнению с парами других жидкостей?

3. Почему применение цикла Карно в паросиловых установках технически неосуществимо? Какие преимущества по сравнению с ним имеет цикл Ренкина?

4. Изобразите в  $P-v$  и  $T-s$  - диаграммах цикл Ренкина, опишите отдельные процессы из которых он состоит. В каких элементах схемы эти процессы осуществляются?
5. Как определяется работа, затрачиваемая на привод насоса? Почему при низких и средних давлениях пара этой работой можно пренебречь? Как в этом случае определяется термический КПД цикла Ренкина.
6. Как влияют начальные параметры пара на термический КПД цикла Ренкина? Покажите их влияние с помощью  $T-s$  -диаграммы (для цикла Ренкина с перегретым паром).
7. Изобразите реальный цикл Ренкина с перегретым паром на  $T-s$  – диаграмме. Как определяется внутренний относительный КПД турбины, насоса, внутренний абсолютный КПД установки?
8. Изобразите на  $T-s$  – диаграмме идеальный цикл паросиловой установки с промежуточным перегревом пара. Объясните, какие процессы составляют цикл и в каких элементах они осуществляются. Как определяется термический КПД этого цикла?
9. Как сказывается промежуточный перегрев пара на конечной влажности пара?
10. Как практически осуществляется регенерация теплоты в паросиловых установках? Изобразите принципиальную схему такой установки с одним регенеративным отбором и объясните, почему термический КПД цикла в этом случае выше, чем у цикла Ренкина при тех же параметрах пара?
11. Покажите, что термический КПД цикла ПГУ с регенерацией повышается с повышением числа регенеративных отборов.
12. Составьте уравнение теплового баланса смешивающего регенеративного подогревателя паросиловой установки с одним регенеративным отбором и напишите выражение для определения ее термического КПД.
13. В чем заключается сущность комбинированной выработки электроэнергии и теплоты на ТЭЦ и каковы ее преимущества по сравнению с отдельной выработкой их? Для сопоставления используйте  $T-s$  – диаграмму.
14. Какие типы паровых турбин используются при комбинированной выработке электроэнергии и теплоты на ТЭЦ? Каковы преимущества, недостатки и область применения этих турбин?
15. Что такое коэффициент использования теплоты теплофикационной установки? Чему равно предельно высокое значение этого коэффициента для идеальной ТЭЦ и какие значения он может достигать в действительности?
16. Изобразите схему парогазовой установки с одной парогазовой турбиной, опишите ее работу и представьте идеальный цикл в  $T-s$  - диаграмме. Какие преимущества дает применение такого цикла по сравнению с циклом Ренкина. Как определяется термический КПД ПГУ?
17. Изобразите схему парогазовой установки с двумя турбинами (паровой и газовой), опишите работу ПГУ и представьте идеальный цикл в  $T-s$  - диаграмме. Как определяется термический КПД цикла, каковы преимущества использования двух рабочих тел.
18. Изобразите схему и цикл в  $T-s$  – диаграмме бинарной ртутно-водяной установки. Опишите достоинства и недостатки использования такой установки. Как определяется термический КПД цикла?
19. Изобразите схему простейшей установки с МГД - генератором и опишите ее работу. В чем заключаются принципиальные преимущества таких установок?
20. Изобразите в  $T-s$  – диаграмме идеальный цикл установки с МГД - генератором и поясните, из каких процессов он состоит. Как определяется термический КПД идеального цикла такой установки?
21. Какую температуру имеет плазма, вытекающая из канала МГД - генератора и как используется ее внутренняя энергия? Приведите схему.
22. Каким образом повышается электропроводимость плазмы в канале МГД - генератора? На каком принципе основано получение в нем электрической энергии?

## Раздел 6:

1. Изобразите схему воздушной компрессионной холодильной установки, опишите ее работу и представьте ее идеальный цикл в P-v и T-s -диаграммах
2. Каково основное назначение детандера в воздушной компрессионной холодильной установке и почему его нельзя заменить дроссельным вентилем?
3. Что такое холодильный коэффициент и каково примерно его значение для воздушной холодильной установки? Какое значение имеет холодильный коэффициент эквивалентного по действию обратного цикла Карно?
4. Изобразите схему и идеальный цикл пароконденсационной холодильной установки с дроссельным вентилем и опишите процессы, из которых он состоит. Какова потеря холодопроизводительности, обусловленная заменой детандера дроссельным вентилем?
5. Какими свойствами должно обладать вещество, применяемое в качестве холодильного агента в пароконденсационных холодильных установках?
6. Какие преимущества имеет пароконденсационная холодильная установка по сравнению с воздушной холодильной установкой. Сопоставьте между собой идеальные циклы этих установок в T-s –диаграмме.
7. Изобразите схему парожеткционной холодильной установки и опишите ее работу, как происходит сжатие холодильного агента в этой установке и каким коэффициентом характеризуется ее эффективность? Покажите идеальный цикл установки на T-s –диаграмме.
8. Изобразите схему абсорбционной холодильной установки и опишите ее работу. Как повышается давление холодильного агента в этой установке?
9. В чем принципиальное отличие цикла теплового насоса от цикла холодильной установки? Изобразите в T-s – диаграмме идеальные циклы обеих установок и дайте пояснения по графику. Каким коэффициентом характеризуется эффективность цикла теплового насоса?
10. Что такое совмещенный термотрансформатор и каким коэффициентом характеризуется эффективность идеального цикла этой установки?
11. Как определяется холодопроизводительность и теплопроизводительность совмещенного термотрансформатора, если известен расход рабочего тела?

### 6.3. Варианты контрольных работ

#### Контрольная работа №1

##### Вариант 1

1. Написать уравнение I закона термодинамики через энтальпию.
2. При исследовании какого термодинамического процесса используются функции?
3. Как определяется работа расширения во всех термодинамических процессах идеального газа?
4. Сущность II закона термодинамики.
5. Для какого количества вещества справедливо выражение  $Pv=RT$ ?
  - а). для 1 кг;
  - б). для 1 м ;
  - в). Для 1 моля;
  - г). для произвольного количества вещества;
  - д). для любого постоянного количества.

##### Задача

В процессе политропного расширения азота температура его уменьшилась от  $t_1=20^\circ\text{C}$  до  $t_2=-40^\circ\text{C}$ . Начальное давление азота  $P_1=0,5\text{МПа}$ , количество его  $m=2\text{кг}$ . Определить изменение энтропии в этом процессе, если известно, что количество подведенной теплоты составляет  $90\text{кДж}$ .

##### Вариант 2

1. Дать определение понятий «теплота» и «работа».

2. Написать уравнение I закона термодинамики через внутреннюю энергию.
3. Написать уравнение политропного процесса.
4. Как определяется изменение внутренней энергии и энтальпии во всех термодинамических процессах идеального газа?
5. Формулировка II закона термодинамики (любая).

#### Задача

В регенеративном подогревателе газовой турбины воздух нагревается при постоянном давлении от  $t_1=120^\circ\text{C}$  до  $t_2=450^\circ\text{C}$ . Определить количество теплоты, сообщенной воздуху в единицу времени, если его расход составляет 200кг/час.

#### Вариант 3

1. Дать определение понятию «внутренняя энергия» системы.
2. Написать аналитическое выражение II закона термодинамики для необратимых процессов.
3. Написать уравнение адиабатного процесса, изобразить процесс в P-V и T-S диаграммах.
4. Как определяется полезная работа во всех термодинамических процессах идеального газа?
5. Дать определение термодинамического цикла.

#### Задача

Определить изменение энтропии 1кг двуокиси углерода в изохорном процессе. Начальные параметры углекислоты:  $t_1=40^\circ\text{C}$ ,  $P_1=0,2\text{МПа}$ , конечные:  $t_2=253^\circ\text{C}$ ,  $P_2=4,5\text{Мпа}$ .

#### Вариант 4

1. Дать определение понятию «энтальпия».
2. Как определяется теплота, подведенная (отведенная) в каждом из термодинамических процессов?
3. Объяснить физический смысл удельной (индивидуальной) газовой постоянной.
4. Как связаны между собой параметры состояния в изохорном, изобарном, изотермическом процессах?
5. Написать формулу для расчета термического КПД цикла Карно.

#### Задача

В компрессор газотурбинной установки входит воздух при  $P_1=0,1\text{МПа}$  и  $t_1=15^\circ\text{C}$ . Воздух сжимается адиабатно до давления  $P_2=3\text{МПа}$ . Определить температуру в конце адиабатного сжатия и работу, затраченную на сжатие.

Изобразить процесс в P-V и T-S диаграммах.

#### Вариант 5

1. Дать определение понятию «энтропия».
2. Чему равна теплоёмкость в каждом из термодинамических процессов?
3. Написать уравнение изобарного процесса, изобразить его в P - V и T - S диаграммах.
4. Как определить удельную (индивидуальную) газовую постоянную для любого газа, ее размерность?
5. Написать формулу для расчета термического КПД цикла теплового двигателя.
- 6.

#### Задача

Компрессор всасывает 100 м<sup>3</sup>/ч воздуха при  $P_1=0,2\text{МПа}$  и  $t_1=25^\circ\text{C}$  и сжимает его до  $P_2=1,2\text{МПа}$ . Определить температуру и объем сжатого воздуха, мощность, расходуемую на сжатие. Процесс сжатия считать политропным с показателем  $n=1,3$ .

### Вариант 6

1. Написать уравнение состояния для 1 кг идеального газа.
2. Как определяется изменение энтропии для каждого процесса?
3. Написать уравнение изохорного процесса, изобразить его в  $P - V$  и  $T - S$  диаграммах.
4. Объяснить физический смысл универсальной газовой постоянной, ее значение и размерность.
5. Принципиальная схема теплового двигателя.
- 6.

#### Задача

Воздух в количестве  $5 \text{ м}^3$  расширяется политропно от  $P_1=0,5 \text{ МПа}$  и  $t_1=45^\circ\text{C}$  до  $P_2=0,15 \text{ МПа}$ . Объем, занимаемый при этом воздухом, становится равным  $10 \text{ м}^3$ . Найти показатель политропы, конечную температуру, полученную работу и количество подведенной теплоты.

### Вариант 7

1. Написать уравнение состояния идеального газа для произвольного количества вещества.
2. Дать определение полной теплоемкости, её обозначение и размерность.
3. В каком соотношении находятся параметры состояния ( $P, V, T$ ) в политропном процессе?
4. Какой цикл называется прямым?
5. Как определить среднюю интегральную температуру подвода (отвода) теплоты в цикле?

#### Задача

В поршневом компрессоре сжимается воздух, имеющий давление  $P_1=0,1 \text{ МПа}$  и температуру  $t_1=20^\circ\text{C}$ . Процесс сжатия - политропный с показателем политропы  $n=1,3$ . Давление в конце сжатия  $P_2=0,7 \text{ МПа}$ . Определить работу сжатия для 1 кг воздуха и количество отнятой теплоты.

### Вариант 8

1. Написать уравнение состояния идеального газа для 1 кмоль.
2. Какой процесс называется политропным, его уравнение, показатель политропы?
3. Дать определение удельной массовой теплоемкости, ее обозначение и размерность.
4. Какой цикл называется обратным?
5. Как определить изменение энтропии в каждом термодинамическом процессе?

#### Задача

Чему равна плотность воздуха при параметрах  $t = 200^\circ\text{C}$  и  $P = 15 \text{ бар}$ ?

### Вариант 9

1. Какой процесс называется адиабатным? Написать уравнение адиабатного процесса, объяснить смысл показателя адиабаты « $K$ ».
2. Написать уравнение Майера для 1 кг газа; для 1 кмоль.
3. Дать определение удельной объемной теплоемкости, ее обозначение и размерность.
4. В каком соотношении находятся параметры состояния ( $P, V, T$ ) идеального газа в адиабатном процессе ( $K=\text{const}$ )?
5. Как оценить эффективность цикла теплового двигателя?

#### Задача

2 кг воздуха при давлении  $P_1=0,1 \text{ МПа}$  и  $t_1=15^\circ\text{C}$  адиабатно сжимаются в цилиндре компрессора до давления  $P_2=0,7 \text{ МПа}$ . Найти конечную температуру сжатого воздуха и работу, затраченную на сжатие. Изобразить процесс в  $P-V$  и  $T-S$  диаграммах.

### Вариант 10

1. Какой процесс называется обратимым?

2. Написать уравнение I закона термодинамики через внутреннюю энергию и энтальпию.
3. Написать уравнение изотермического процесса, изобразить его в P-V и T-S диаграммах.
4. Дать определение удельной мольной теплоемкости, ее обозначение и размерность.
5. Почему теплоемкость  $C_p$  больше теплоемкости  $C_v$ ?
- 6.

Задача

Сосуд емкостью 90 л содержит воздух при давлении 0,8 МПа и температуре 30°C. Определить количество теплоты, которое необходимо сообщить воздуху, чтобы повысить его давление при  $V = \text{const}$  до 1,6 МПа.

Вариант 11

1. Написать объединенное выражение I и II законов термодинамики для обратимых процессов.
2. Связь теплоемкости газа с энтальпией.
3. Показать на P-V диаграмме все термодинамические процессы идеального газа.
4. Как определяется теплоемкость в политропном процессе?
5. Написать уравнение адиабатного процесса, изобразить процесс в P-V и T-S диаграммах.

Задача

1 кг воздуха при  $P_1 = 0,09$  МПа и  $t_1 = 100^\circ\text{C}$  сжимается адиабатно так, что его объем уменьшается в 15 раз. Найти конечную температуру, конечное давление и работу сжатия.

Вариант 12

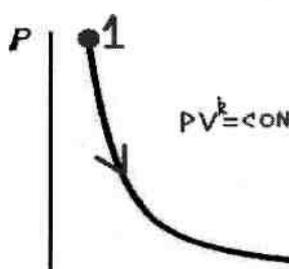
1. Показать графическую зависимость теплоемкости от показателя политропы «n».
2. Как можно рассчитать параметры состояния в адиабатном процессе?
3. Доказать, что изохора изображается в T - S диаграмме круче, чем изобара.
4. Значение цикла Карно.
5. Что называется вечным двигателем II рода?

Задача

Определить удельный объем и плотность кислорода при давлении 2 МПа температуре 300°C.

Вариант 13

1. Показать на T-S диаграмме все термодинамические процессы идеального газа.
2. Что называется параметрами состояния?
3. Написать аналитическое выражение II закона термодинамики для необратимых процессов.
4. Какой процесс называется равновесным?
5. Какая запись соответствует изображенному процессу?



- а)  $-q = -1$   
 б)  $\Delta u = q$   
 в)  $-\Delta u = 1$   
 г)  $-\Delta u = -1$   
 д)  $\Delta u = 1$

Задача

1 кг кислорода сжимается политропно от  $P_1 = 0,1$  МПа до  $P_2 = 0,7$  МПа. Начальная температура кислорода  $t_1 = 25^\circ\text{C}$ . Показатель политропы  $n = 1,25$ . Определить конечную температуру, изменение энтропии, количество отведенной теплоты и работу сжатия.

#### Вариант 14

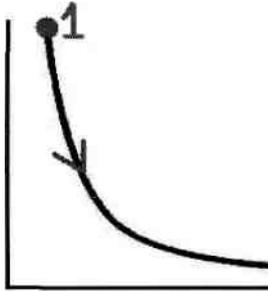
1. Доказать, что адиабата изображается в  $P - V$  диаграмме круче, чем изотерма.
2. Какой цикл называется обратимым?
3. Графическая интерпретация работы расширения (сжатия) для произвольного процесса 1-2.
4. Почему  $T - S$  диаграмму называют «тепловой»?
5. В каких единицах измеряется удельная массовая теплоемкость?  
а)  $\text{кДж} / \text{кг}$       б)  $\text{кДж} / \text{кмоль} \cdot \text{К}$       в)  $\text{кДж} / \text{К}$   
г)  $\text{кДж} / \text{кг} \cdot \text{К}$       д)  $\text{кДж} / \text{м}^3 \cdot \text{К}$

#### Задача

1 кг азота, находящийся при  $P_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 40^\circ\text{C}$ , подвергается адиабатному сжатию. Степень сжатия  $\varepsilon = 20$ . Определить конечные параметры азота, пользуясь таблицей С.Л.Ривкина «Термодинамические свойства газов».

#### Вариант 15

1. Графическая интерпретация полезной работы для произвольного процесса 1-2.
2. Написать закон Бойля - Мариотта.
3. Графическая интерпретация средней и истинной теплоемкости для произвольного процесса 1-2.



4. Какова теплоемкость изображенного процесса?
5. Физический смысл энтропии.

#### Задача

В закрытом сосуде емкостью  $V = 1,5 \text{ м}^3$  содержится азот при давлении  $P_1 = 0,2 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 22^\circ\text{C}$ . Определить конечную температуру после подвода к газу  $4000 \text{ кДж}$  тепла.

#### Вариант 16

1. Сформулировать закон Гей - Люссака.
2. Какой процесс называется необратимым?
3. Что значит вечный двигатель I рода?
4. Почему в политропных процессах II группы теплоемкость отрицательна?
5. Доказать, что в адиабатном процессе  $S = \text{const}$ . Изобразить процесс в  $T - S$  диаграмме (теоретический и действительный)

#### Задача

Какое количество тепла необходимо подвести к воздуху, заключенному в сосуде, объемом в  $20 \text{ м}^3$  при давлении в  $1 \text{ бар}$  и температуре  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ , чтобы поднять его температуру до  $t_2 = 600^\circ\text{C}$ ? При решении пользоваться таблицами.

#### Вариант 17

1. Какой газ называется идеальным?

2. Сформулировать I закон термодинамики.
3. Связь теплоемкости газа с внутренней энергией.
4. Почему в T - S диаграмме изохора изображается круче, чем изобара?
5. Чем отличается индикаторная диаграмма от P - V диаграммы?
- 6.

#### Задача

Найти изменение энтропии 2 кг воздуха:

- а) при нагревании его по изобаре от 10°C до 400°C
- б) при нагревании по изохоре от 40°C до 800°C.

#### Вариант 18

1. Что значит вечный двигатель II рода?
2. Сформулировать закон Шарля.
3. Что представляет собой показатель адиабаты «К»?
4. Провести политропный процесс расширения с показателем политропы  $n=0,8$  Какова теплоемкость этого процесса?
5. Формулировка I закона термодинамики (любая).

#### Задача

К 1м воздуха, находящемуся в цилиндре, подводится при постоянном давлении 335кДж теплоты. Объем воздуха при этом увеличивается до 1,5м . Начальная температура воздуха 15°C. Какая устанавливается в цилиндре температура и какова работа расширения?

#### Вариант 19

1. Что называется термодинамическим процессом?
2. Как изменяется энтропия в обратимых и необратимых процессах?
3. Какой цикл называется необратимым?
4. Какой знак (+) или (-) имеет теплоемкость в политропных процессах I группы?
5. Что называется термическим КПД цикла?

#### Задача

В процесс политропного расширения воздуха температура его уменьшилась от  $t_1=25^\circ\text{C}$  до  $t_2=-37^\circ\text{C}$ . Начальное давление воздуха  $P_1=0,4\text{МПа}$ , его количество  $m=2\text{кг}$ . Определить изменение энтропии в этом процессе, если известно, что количество подведенной к воздуху теплоты составляет 90 кДж.

#### Вариант 20

1. Что называется термодинамической системой?
2. Как определить с помощью T-S диаграммы теплоту, подведенную (отведенную) в произвольном процессе 1-2?
3. Какой знак (+) или (-) имеет теплоемкость в политропных процессах III группы?
4. Как определить эффективность цикла?
5. Как называется уравнение  $C_p - C_v = R$ ?

#### Задача

Азот массой 1 кг в начальном состоянии имеет параметры  $P_1=2,5\text{МПа}$  и  $t_1=700^\circ\text{C}$ . После политропного расширения его давление  $P_2=0,1\text{МПа}$ . Показатель политропы  $n=1,18$ . определить изменение внутренней энергии, количество теплоты, сообщенное азоту в процессе и работу расширения.

#### Вариант 21

1. Дать определение понятию «внутренняя энергия» системы.

2. Написать аналитическое выражение II закона термодинамики для обратимых процессов.
3. Написать уравнение изобарного процесса, изобразить процесс в P-V и T-S диаграммах.
4. Как определяется полезная работа во всех термодинамических процессах идеального газа?
5. Дать определение термодинамического цикла.
- 6.

#### Задача

1 кг воздуха при  $t_1=17^\circ\text{C}$  сжимается адиабатно до объема, составляющего 1/5 начального, а затем расширяется изотермически до первоначального объема. Определить работу, произведенную воздухом в результате обоих процессов. Изобразить процессы в P-V диаграмме.

#### Вариант 22

1. Какой процесс называется адиабатным. Написать уравнение адиабатного процесса, объяснить смысл показателя адиабаты «К».
2. Написать уравнение Майера для 1 кг газа; для 1 кмоль.
3. Дать определение удельной мольной теплоемкости, ее обозначение и размерность.
4. В каком соотношении находятся параметры состояния (P, V, T) идеального газа в политропном процессе?
5. Изобразить цикл Карно в P-V и T-S диаграммах.

#### Задача

Воздух при давлении  $P_1=0,1\text{МПа}$  и температуре  $t_1=27^\circ\text{C}$  сжимается в компрессоре до  $P_2=3,5\text{МПа}$ . Определить величину работы, затраченной на сжатие 100 кг воздуха, если воздух сжимается изотермически.

#### Вариант 23

1. Дать определение понятию «работа».
2. Чему равна теплоемкость в каждом из термодинамических процессов?
3. Написать уравнение изохорного процесса, изобразить его в P-V и T-S диаграммах.
4. Как определить удельную (индивидуальную) газовую постоянную для любого газа, ее размерность?
5. Написать формулу для расчета термического КПД цикла теплового двигателя.

#### Задача

Определить массу  $\text{CO}_2$ , содержащегося в баллоне емкостью 80 л, если давление газа по манометру равно 1,08 МПа, а показание ртутного барометра 99325 Па при  $t = 25^\circ\text{C}$ .

#### Вариант 24

1. Дать определение понятию «теплота».
2. Объяснить физический смысл удельной (индивидуальной) газовой постоянной.
3. Как связаны между собой параметры состояния в изохорном, изобарном, изотермическом процессах?
4. Написать формулу для расчета термического КПД цикла Карно.
5. Как узнать, теплота в процессе подводится или отводится?

#### Задача

В закрытом сосуде емкостью  $V=0,6\text{ м}^3$  содержится воздух при  $P=0,5\text{МПа}$  и  $t=20^\circ\text{C}$ . В результате охлаждения сосуда воздух, содержащийся в нем, теряет 165 кДж тепла. Какое давление и температура устанавливается после этого в сосуде, если теплоемкость воздуха равна  $0,725\text{ кДж / кг}\cdot\text{K}$ .

## Контрольная работа №2

### Вариант 1

1. Какой пар называется влажным насыщенным?
2. Изобразить T-S диаграмму водяного пара.
3. Что называется теплотой перегрева?
- 4.

#### Задача

Влажный пар имеет при давлении  $P=1,5$  МПа паросодержание  $x=0,85$ . Какое количество теплоты нужно сообщить 1 кг этого пара, чтобы довести его степень сухости при постоянном давлении до  $x=0,95$ . Решить задачу аналитически.

#### Задача

1 кг водяного пара адиабатно расширяется от начальных параметров  $P_1=10$  МПа,  $t_1=450$  °С до  $P_2=0,05$  МПа. Найти значения  $h_1, \vartheta_1, h_2, \vartheta_2, x_2, \ell_{расц}$ .

### Вариант 2

1. Какой пар называется сухим насыщенным?
2. Чем объясняется положительный наклон линий фазового перехода на P – T диаграмме для нормального вещества?
3. Изобразить процесс  $P = \text{const}$  для водяного пара на T – S диаграмме.
- 4.

#### Задача

Энтальпия влажного насыщенного пара при давлении  $P_1 = 1,4$  МПа составляет  $h_1 = 2705$  кДж/ кг. Как изменится степень сухости пара, если к 1 кг его будет подведено 40 кДж теплоты при постоянном давлении?

#### Задача

В сосуде объемом  $V= 0,035$  м<sup>3</sup> содержится 0,1 кг водяного пара при давлении  $P= 0,6$  МПа. Определить величину внутренней энергии пара.

### Вариант 3

1. Какой пар называется перегретым?
2. Изобразить изобарный процесс водяного пара на P–V, T–S и h–S диаграммах.
3. Какая точка называется «тройной»? Показать ее на P–V, T–S, h–S диаграммах.

#### Задача

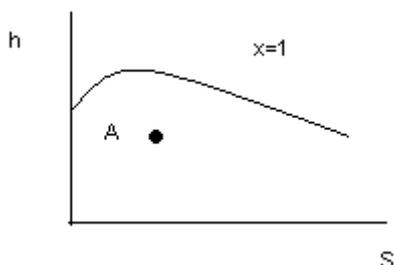
Влажный пар имеет при давлении  $P_1=1$  МПа степень сухости  $x=0,85$ . Какое количество теплоты нужно сообщить 1 кг этого пара, чтобы перевести его при постоянном давлении в сухой насыщенный пар?

#### Задача

1 кг пара расширяется адиабатно от начальных параметров  $P_1=9$  МПа и  $t_1=450$  °С до  $P_2=0,004$  МПа. Найти значения  $h_1, V_1, h_2, V_2, x_2$  и работу расширения.

### Вариант 4

1. Что называется степенью сухости водяного пара?
2. Изобразить изохорный процесс водяного пара на P–V, T–S и h–S диаграммах.
3. Как определить температуру т. А?



#### Задача

1 кг водяного пара при  $P = 1$  МПа и  $t_1 = 240$  °С нагревается при постоянном давлении до  $t_2 = 320$  °С. Определить затраченное количество теплоты, работу расширения и изменение внутренней энергии.

#### Задача

Найти массу  $12 \text{ м}^3$  пара давления  $P = 2$  МПа и степени сухости  $x = 0,75$ .

#### Вариант 5

1. Что называется степенью влажности?
2. Как рассчитать теплоту, подведенную или отведенную в изотермическом процессе водяного пара?
3. Что называется критической точкой?
- 4.

#### Задача

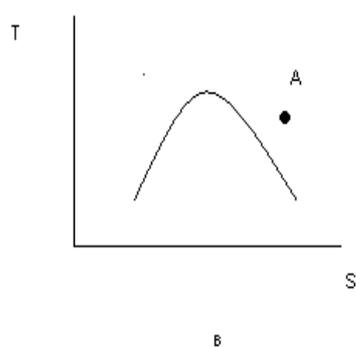
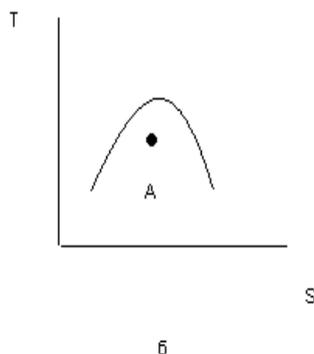
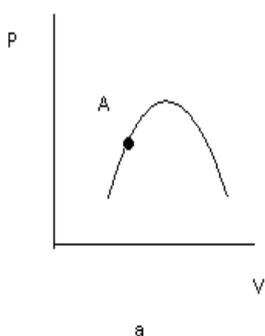
Пар, имеющий параметры  $P_1 = 3,4$  МПа и  $x_1 = 98\%$ , изоэнтропно сжимается до  $P_2 = 9,0$  МПа. Найти температуру и энтальпию пара в конечном состоянии. Определить величину работы сжатия и изменение внутренней энергии 1 кг пара. Задача решить, пользуясь таблицами. Проверить результаты по  $h$ - $S$  диаграмме.

#### Задача

Найти состояние водяного пара, если давление  $P = 1$  МПа, а энтропия  $S = 6,52$  кДж/кгхград.

#### Вариант 6

1. Что называется теплотой парообразования?
2. Можно ли с помощью таблиц воды и водяного пара определить параметры влажного насыщенного пара?
3. В каком случае состояние, изображенное т. А, соответствует понятию «влажный насыщенный пар»?



#### Задача

Энтальпия влажного насыщенного пара при  $P = 1,5$  МПа составляет  $h_x = 2700$  кДж/кг. Как изменится степень сухости пара, если к 1 кг его будет подведено 50 кДж тепла при постоянном давлении.

### Задача

Определить объем резервуара, заполненного влажным паром, имеющим степень сухости  $x = 0,95$ , если масса пара  $m = 160$  кг, а температура в резервуаре  $t = 280$  °С.

### Вариант 7

1. Что называется критической точкой?
2. Изобразить изобарный процесс водяного пара  $P - V$ ,  $T - S$  и  $h - S$  диаграммах.
3. Что называется теплотой парообразования?
  - а) количество теплоты, необходимое для превращения 1 кг кипящей жидкости в кг перегретого пара при данном давлении.
  - б) количество теплоты, необходимое для превращения  $1\text{ м}^3$  кипящей жидкости в 1 кг сухого насыщенного пара при данном давлении;
  - в) количество теплоты, необходимое для превращения 1 кг кипящей жидкости в 1 кг сухого насыщенного пара при данном давлении.
  - г) количество теплоты, необходимое для превращения жидкости в пар.
  - д) количество теплоты, необходимое для превращения 1 кг жидкости в 1 кг сухого насыщенного пара данным давлении.

### Задача

Сухой насыщенный водяной пар расширяется адиабатно от  $P_1 = 1$  МПа до  $P_2 = 0,05$  МПа. Определить степень сухости в конце расширения.

### Задача

Пар при давлении  $P_1 = 2,8$  МПа и температуре  $t_1 = 350$  °С расширяется адиабатно до  $P_2 = 0,008$  МПа. Найти степень сухости в конце процесса и давление, при котором пар в процессе расширения окажется сухим насыщенным.

### Вариант 8

1. Что называется тройной точкой?
2. Изобразить адиабатный процесс водяного пара  $P - V$ ,  $T - S$  и  $h - S$  диаграммах.
3. Для определения какого параметра используется в практике уравнение Клапейрона-Клаузиуса?
  - а)  $V'$
  - б)  $g$
  - в)  $T$
  - г)  $P$
  - д)  $V''$ .

### Задача

Влажный пар имеет при давлении  $P_1 = 1$  МПа степень сухости  $x = 0,95$ . Какое количество нужно сообщить 1 кг этого пара, чтобы перевести его при постоянном давлении в сухой насыщенный пар? Решить задачу с помощью  $h - S$  диаграммы.

### Задача

Состояние водяного пара задано параметрами: давление  $P = 0,2$  МПа, плотность  $\rho = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>. Определить  $t$ ,  $U$ ,  $h$ ,  $S$  для 1 кг этого пара.

### Вариант 9

1. Что называется фазой, фазовым переходом?
2. Как определить энтальпию влажного насыщенного водяного пара?
3. Что называется степенью сухости водяного пара? Какие значения она принимает?
- 4.

### Задача

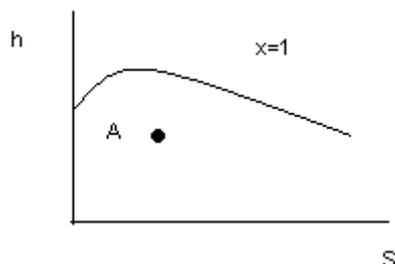
Пар, имеющий параметры  $P_1 = 3$  МПа и  $x_1 = 0,98$ , изоэнтропно сжимается до  $P_2 = 8$  МПа. Найти температуру и энтальпию пара в конечном состоянии. Определить величину работы сжатия и изменения внутренней энергии для 1 кг.

### Задача

1 кг пара при  $P_1 = 1,8$  МПа и  $x_1 = 0,7$  изотермически расширяется до  $P_2 = 0,8$  МПа. Определить конечные параметры, количество подведенной теплоты, изменение внутренней энергии и работу расширения.

### Вариант 10

1. Какие точки располагаются на верхней и нижней пограничных кривых?
2. Как определить с помощью  $h - S$  диаграммы температуру точки А?



3. Что называется теплотой парообразования?
- 4.

### Задача

1 кг водяного пара сжимается изотермически. Начальные параметры  $P_1 = 30$  бар,  $t_1 = 360$  °С, а конечные соответствуют состоянию кипящей жидкости. Определить параметры в конце процесса и количество отведенного тепла.

### Задача

Найти массу  $10 \text{ м}^3$  пара при давлении  $P = 1,5$  МПа и степени сухости  $x = 0,9$ .

### Вариант 11

1. Написать уравнение кривой фазового перехода.
2. Как определить теплоту, подведенную или отведенную в изобарном процессе водяного пара?
3. Какой пар называется влажным насыщенным? Показать область его нахождения на  $T - S$  диаграмме.

### Задача

Пользуясь диаграммой  $h - S$  водяного пара, определить энтальпию пара:

- сухого насыщенного при  $P = 1$  МПа;
- влажного насыщенного при  $P = 1$  МПа,  $x = 0,95$ ;
- перегретого при  $P = 1$  МПа,  $t = 300$  °С.

Сравнить полученные значения энтальпии с табличными.

### Задача

Найти по диаграмме  $h - S$  адиабатный перепад теплоты ( $\Delta h$ ) и конечное состояние пара при расширении от  $P_1 = 1,4$  МПа и  $t_1 = 300$  °С до  $P_2 = 0,006$  Мпа.

### Вариант 12

1. Что называется теплотой перегрева?
2. Как понимать, что степень сухости  $x = 1$ ?
3. Изобразить адиабатный процесс водяного пара на  $P - V$ ,  $T - S$  и  $h - S$  диаграммах.

### Задача

Пар при давлении  $P_1 = 8$  МПа и температуре и  $t_1 = 350$  °С расширяется адиабатно до конечного давления  $P_2 = 0,008$  МПа. Найти степень сухости в конце процесса и давление, при котором пар в процессе расширения окажется сухим насыщенным.

#### Задача

Найти массу  $8 \text{ м}^3$  пара при давлении  $P = 2 \text{ МПа}$  и степени сухости  $x = 0,8$ .

#### Вариант 13

1. В чем особенность расчета изотермического процесса водяного пара по сравнению с идеальным газом?
2. Какой пар называется сухим насыщенным?
3. Написать уравнение Клапейрона-Клаузиуса.

#### Задача

Найти по диаграмме  $h-S$  конечное состояние при расширении пара от  $P_1 = 1,4 \text{ МПа}$ ,  $t_1 = 300^\circ\text{C}$  до  $P_2 = 0,06 \text{ МПа}$ . Определить параметры в конечном состоянии. Процесс изоэнтропный.

#### Задача

Определить температуру, удельный объем, плотность, энтальпию сухого насыщенного водяного пара при давлении  $P = 2,5 \text{ МПа}$ .

#### Вариант 14

1. Как определить внутреннюю энергию водяного пара?
2. Изобразить изотермический процесс водяного пара на  $P-V$ ,  $T-S$  и  $h-S$  диаграммах.
3. Какой процесс называется сухим насыщенным?

#### Задача

Параметры начального состояния:  $P_1 = 2 \text{ МПа}$ ,  $t_1 = 300^\circ\text{C}$ . Давление в конденсаторе  $P_2 = 0,004 \text{ МПа}$ . Определить с помощью  $h-S$  диаграммы остальные параметры (процесс адиабатный).

#### Задача

Найти состояние водяного пара:

1. если давление его  $P = 2 \text{ МПа}$ , а удельный объем  $V = 0,079 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;
2. если давление  $P = 0,9 \text{ МПа}$ , а энтропия  $S = 6,52 \text{ кДж/кг}\cdot\text{град}$ .

#### Вариант 15

1. Написать уравнение Клапейрона-Клаузиуса.
2. Чем обязательно различаются состояния «сухой насыщенный пар» и «перегретый пар» при  $P = \text{const}$ ?
3. Какой линией изображается изотерма в области влажного насыщенного пара на диаграммах состояния?

#### Задача

Пар, имеющий параметры  $P_1 = 4 \text{ МПа}$  и  $x_1 = 0,98$ , изоэнтропно сжимается до  $P_2 = 9 \text{ МПа}$ . Найти температуру и энтальпию пара в конечном состоянии. Определить величину работы сжатия и изменения внутренней энергии для  $1 \text{ кг}$ .

#### Задача

В сосуде объемом  $V = 0,04 \text{ м}^3$  содержится  $0,2 \text{ кг}$  водяного пара при давлении  $P = 0,8 \text{ МПа}$ . Определить величину внутренней энергии пара.

#### Вариант 16

1. Написать уравнение состояния для водяного пара.
2. Как определить энтропию влажного насыщенного пара?
3. Какой пар называется перегретым?
- 4.

#### Задача

6 кг водяного пара при  $P = 1$  МПа и степени сухости  $x = 0,75$  расширяются изотермически так, что в конце расширения пар оказывается сухим насыщенным. Определить  $Q, \Delta U, L$ .

Задача

Найти массу  $15 \text{ м}^3$  пара при давлении  $P = 1,5$  МПа и степени сухости  $x = 0,95$ .

Вариант 17

1. Как рассчитать степень сухости водяного пара?
2. Какие параметры воды и водяного пара можно определить с помощью таблицы 3?
3. Что называется теплотой парообразования?

Задача

Определить температуру, удельный объем, плотность, энтальпию и энтропию сухого насыщенного водяного пара при давлении  $P = 1$  МПа.

Задача

1 кг водяного пара при  $P = 1,5$  МПа и  $t_1 = 300$  °С нагревается при постоянном давлении до  $t_2 = 450$  °С. Определить затраченное количество теплоты, работу расширения и изменение внутренней энергии.

Вариант 18

1. Изобразить фазовую  $P - T$  диаграмму для нормального и аномального вещества.
2. Какие параметры воды и водяного пара можно определить с помощью таблиц?
3. Какая точка называется тройной?

Задача

Из парового котла поступает в пароперегреватель  $2700$  кг/час пара  $P = 1,6$  МПа,  $x = 0,98$ . Температура пара после пароперегревателя  $400$  °С. Найти количество тепла, которое пар получает в пароперегревателе ( $P = \text{const}$ ).

Задача

Найти состояние водяного пара, если его давление  $P = 3$  МПа, а удельный объем  $V = 0,079$  м<sup>3</sup>/кг. Задачу решить с помощью таблицы.

Вариант 19

1. Как определить теплоту в изотермическом процессе водяного пара?
2. Как определить внутреннюю энергию водяного пара?
3. Что называется степенью влажности водяного пара?

Задача

Определить объем резервуара, заполненного влажным паром, имеющим степень сухости  $x = 0,95$  если масса пара  $m = 160$  кг, а температура в резервуаре  $t = 280$  °С.

Задача

Влажный пар имеет при давлении  $P_1 = 0,8$  МПа степень сухости  $x = 0,9$ . Какое количество теплоты нужно сообщить 1 кг этого пара, чтобы перевести его при постоянном давлении в перегретый с  $t_2 = 400$  °С?

Вариант 20

1. Чем отличаются таблицы 1 и 2 для воды и водяного пара?
2. Как рассчитать степень сухости водяного пара?
3. Как определить параметры влажного насыщенного пара?
- 4.

### Задача

Определить объем резервуара, заполненного влажным паром, имеющим степень сухости  $x=0,85$ , если масса пара  $m=160\text{кг}$ , а температура в резервуаре  $t=300^\circ\text{C}$ .

### Задача

Пар, имеющий параметры  $P_1 = 4\text{ МПа}$  и  $x_1 = 0,95$ , изоэнтропно сжимается до  $P_2 = 9\text{ МПа}$ . Найти  $t$  и  $h$  пара в конечном состоянии. Определить величину работы сжатия и изменения внутренней энергии для  $1\text{ кг}$ .

### 6.4. Задание на курсовую работу

Курсовая работа выполняется обучающимся самостоятельно под руководством преподавателя. При выполнении курсовой работы обучающийся должен показать свое умение работать с нормативным материалом и другими литературными источниками, а также возможность систематизировать и анализировать фактический материал и самостоятельно творчески его осмысливать.

В начале изучения дисциплины преподаватель предлагает обучающимся на выбор перечень тем курсовых работ. Обучающийся самостоятельно выбирает тему курсовой работы. Совпадение тем курсовых работ у студентов одной учебной группы не допускается. Утверждение тем курсовых работ проводится ежегодно на заседании кафедры.

После выбора темы преподаватель формулирует задание по курсовой работе и рекомендует перечень литературы для ее выполнения. Исключительно важным является использование информационных источников, а именно системы «Интернет», что даст возможность обучающимся более полно изложить материал по выбранной им теме.

В процессе написания курсовой работы обучающийся должен разобраться в теоретических вопросах избранной темы, самостоятельно проанализировать практический материал, разобрать и обосновать практические предложения.

Преподаватель, проверив работу, может вернуть ее для доработки вместе с письменными замечаниями. Студент должен устранить полученные замечания в установленный срок, после чего работа окончательно оценивается.

Курсовая работа должна быть оформлена в соответствии с СМК-О-СМГТУ-42-09 «Курсовой проект (работа): структура, содержание, общие правила выполнения и оформления». Примерный перечень тем курсовых работ представлен в разделе 7 «Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации».

№	Тема задач
1	Расчет горения доменного и коксового газов
2	Расчет горения природного газа
3	Расчет горения конвертерного газа
4	Расчет горения конвертированного газа
5	Сжатие доменного дутья
6	Сжатие воздуха для производства кислорода
7	Расчет обжига извести и нагрева металла
8	Расчет общего электро- и паропотребления
9	Эффективность паротурбинного цикла
10	Эффективность газотурбинного цикла
11	Эффективность парогазового цикла
12	Расчет производства на ПГ
13	Расчет производства на коксо-доменной смеси
14	Расчет производства на конвертерном газе
15	Расчет производства на конвертированном газе
16	Оформление и сдача на проверку

17	1-я Защита курсовой работы
18	2-я Защита курсовой работы

Методами технической термодинамики для предприятия черной металлургии заданной производительности (по варианту) определить потребность в природном газе и электроэнергии, минимальную мощность собственной электростанции

Годовое производство проката

Доля электростали

Доля электроприводов

Основные расходы ЭЭ на предприятии черной металлургии складываются из расходов

на сжатие доменного дутья: воздуха и кислорода

на сжатие воздуха для производства кислорода

на электросталеплавильное производство

на горячий и холодный прокат

Эти расходы определяют минимальную мощность промышленной тепловой электрической станции

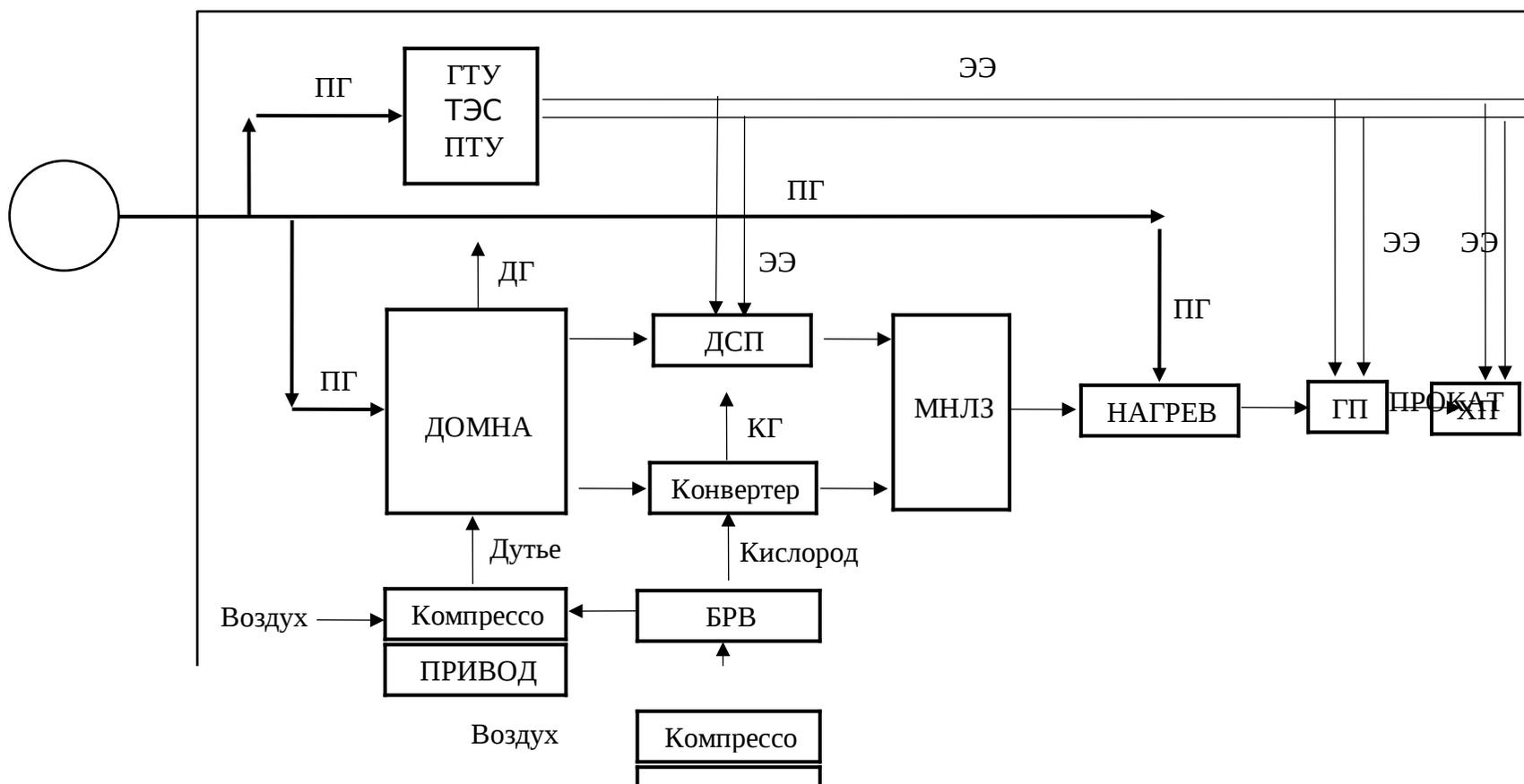
Электродуговые печи потребляют 300 – 800 кВт·ч / т стали.

Горячий прокат потребляет 80 – 120 кВт·ч / т

Холодный прокат потребляет 130 – 180 кВт·ч / т

**УПРОЩЕННАЯ СХЕМА ПРЕДПРИЯТИЯ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**  
К курсовой работе по технической термодинамике

ПГ – природный газ	ТЭС – тепловая электрическая станция	ГТУ – газотурбинная установка
ПТУ – паротурбинная установка	ЭЭ – электроэнергия	ДГ – доменный газ
ДСП – дуговая сталеплавильная печь	КГ – конвертерный газ	БРВ – блок разделения воздуха
МНЛЗ – машина непрерывного литья заготовок	ГП – горячий прокат	ХП – холодный прокат



## СЖИГАНИЕ ТОПЛИВ

Для промышленных топлив:

Природный газ, Доменный газ, Коксовый газ, Конвертерный газ, Конвертированный природный газ, смесь Доменного и коксового газов, 90/10%.

Рассчитать:

высшую теплоту сгорания  
расход воздуха на горение  
объем и состав продуктов сгорания  
точку росы продуктов сгорания  
низшую теплоту сгорания  
температуру горения

## РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ДОМЕННОГО И КОКСОВОГО ГАЗОВ

## РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Рассчитать:

высшую теплоту сгорания  
расход воздуха на горение  
объем и состав продуктов сгорания  
точку росы продуктов сгорания  
низшую теплоту сгорания  
температуру горения

## РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ КОНВЕРТЕРНОГО ГАЗА

Рассчитать:

высшую теплоту сгорания  
расход воздуха на горение  
объем и состав продуктов сгорания  
точку росы продуктов сгорания  
низшую теплоту сгорания  
температуру горения

## РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ КОНВЕРТИРОВАННОГО ГАЗА

Рассчитать:

высшую теплоту сгорания  
расход воздуха на горение  
объем и состав продуктов сгорания  
точку росы продуктов сгорания  
низшую теплоту сгорания  
температуру горения

## СЖАТИЕ ДОМЕННОГО ДУТЬЯ

## ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Для доменного производства чугуна требуется 1400 – 1700 м<sup>3</sup> воздуха с температурой 1000 – 1200 °С и давлением до 4 – 6 атм. Сжатие трехступенчатое.

Рассчитать затраты механической энергии на сжатие и тепловой энергии на нагрев доменного дутья с добавлением 100 – 180 м<sup>3</sup> кислорода.

Рассчитать количество теплоты, отведенной от промежуточных холодильников воздуха.

$$L_{сж} = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

Сжатие воздуха для доменного процесса осуществляется

Паровым приводом 9.0 Мпа и 535°С

И электрическим приводом с долей по заданию.

Определить расход пара и ЭЭ на привод.

## СЖАТИЕ ВОЗДУХА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КИСЛОРОДА

БРВ производство кислорода

Для доменного производства требуется 100 – 180 м<sup>3</sup> кислорода.

Для кислородно-конвертерного производства требуется 60 – 80 м<sup>3</sup> кислорода.

Кислород производится из воздуха давлением 4 – 6 атм. Сжатие трехступенчатое.

Рассчитать работу сжатия.

Рассчитать количество теплоты, отведенной от промежуточных холодильников воздуха.

$$L_{сж} = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

Сжатие воздуха для доменного процесса осуществляется

Паровым приводом 9.0 МПа и 535°С

И электрическим приводом с долей по заданию.

Определить расход пара и ЭЭ на привод.

### РАСЧЕТЫ ОБЖИГА ИЗВЕСТИ И НАГРЕВА МЕТАЛЛА

Для производства 1 т листового проката требуется 250 кг извести, которую получают обжигом известняка.

Рассчитать расходы топлив на обжиг известняка по начальной температуре горения.

Построить графики.

Рассчитать выход извести и СО<sub>2</sub> на 1 т проката.

Металл перед горячей прокаткой нагревается до 1200°С. Определить расходы топлива на этот нагрев.

### РАСЧЕТ ОБЩЕГО ЭЛЕКТРО- И ПАРПОТРЕБЛЕНИЯ

на сжатие доменного дутья: воздуха и кислорода

на сжатие воздуха для производства кислорода

на электросталеплавильное производство

на горячий и холодный прокат

Эти расходы определяют минимальную мощность промышленной тепловой электрической станции

Паропотребление складывается из затрат на:

на сжатие доменного дутья: воздуха и кислорода

на сжатие воздуха для производства кислорода

на конвертирование природного газа

Паровой привод имеет параметры

	P <sub>0</sub> , МПа	T <sub>0</sub> , °С
1.	3 – 5	435
2.	9,0	535

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАРОТУРБИННОГО ЦИКЛА

#### ЦИКЛЫ

#### ПТУ

Для 1 т у.т промышленного топлива:

Рассчитать количество производимого перегретого водяного пара в котле

Для паротурбинных циклов с начальными параметрами

	P <sub>0</sub> , МПа	T <sub>0</sub> , °С
3.	3 – 5	435
4.	9,0	535

5.	13,0	565
6.	24,0	560

Рассчитать эффективность цикла Ренкина с перегревом  
С регенеративным подогревом питательной воды  
Рассчитать расход промышленных топлив на производство 100 т пара  
Построить графики  
**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗОТУРБИННОГО ЦИКЛА**

ГТУ

Для газотурбинного цикла с начальной температурой 1200 – 1500°С  
Рассчитать  
4 базовые температуры цикла  
Удельную работу цикла  
К.п.д. цикла  
Расход топлив на цикл  
Построить графики

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАРОГАЗОВОГО ЦИКЛА**

ПГУ

Для бинарного цикла ГТУ-ПТУ с котлом-утилизатором рассчитать:  
4 базовые температуры цикла  
Удельную работу цикла  
К.п.д. цикла  
Расход топлив на цикл

**РАСЧЕТ ПРОИЗВОДСТВА НА ПГ**

Рассчитать расходы топлива на нужды предприятия:  
На производство электрической и тепловой энергии  
На обжиг извести и нагрев металла  
В Доменную печь

**РАСЧЕТ ПРОИЗВОДСТВА НА КОКСО-ДОМЕННОЙ СМЕСИ 10/90%**

Рассчитать расходы топлива на нужды предприятия:  
На производство электрической и тепловой энергии  
На обжиг извести и нагрев металла

**РАСЧЕТ ПРОИЗВОДСТВА НА КОНВЕРТЕРНОМ ГАЗЕ**

Рассчитать расходы топлива на нужды предприятия:  
На производство электрической и тепловой энергии  
На обжиг извести и нагрев металла

**РАСЧЕТ ПРОИЗВОДСТВА НА КОНВЕРТИРОВАННОМ ГАЗЕ**

Рассчитать расходы топлива на нужды предприятия:  
На производство электрической и тепловой энергии  
На обжиг извести и нагрев металла

Средняя теплоёмкость газов, кДж/м<sup>3</sup>·К

Т, К	Воздух	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O (пар)	CH <sub>4</sub>	t, °С
------	--------	----------------	----------------	----------------	----	-----------------	---------------------------	-----------------	-------

									0
273	1,296	1,305	1,294	1,276	1,298	1,599	1,493	1,549	
373	1,299	1,317	1,295	1,290	1,301	1,699	1,504	1,641	100
473	1,306	1,334	1,299	1,296	1,306	1,786	1,522	1,758	200
573	1,316	1,355	1,306	1,298	1,316	1,861	1,541	1,885	300
673	1,328	1,376	1,315	1,301	1,328	1,928	1,564	2,014	400
773	1,342	1,397	1,327	1,304	1,342	1,987	1,589	2,139	500
873	1,356	1,416	1,339	1,307	1,356	2,040	1,613	2,259	600
973	1,370	1,433	1,353	1,311	1,371	2,087	1,640	2,375	700
1073	1,383	1,449	1,366	1,316	1,385	2,130	1,667	2,492	800
1173	1,397	1,463	1,379	1,322	1,398	2,168	1,694	2,601	900
1273	1,409	1,476	1,391	1,328	1,412	2,202	1,722	2,697	1000
1373	1,420	1,488	1,402	1,335	1,424	2,233	1,749	2,784	1100
1473	1,432	1,499	1,413	1,342	1,435	2,262	1,776	2,861	1200
1573	1,442	1,509	1,424	1,350	1,445	2,288	1,802		1300
1673	1,452	1,519	1,434	1,358	1,456	2,312	1,822		1400
1773	1,461	1,528	1,443	1,366	1,465	2,334	1,851		1500
1873	1,470	1,537	1,452	1,374	1,474	2,354	1,875		1600
1973	1,478	1,545	1,460	1,382	1,481	2,373	1,898		1700
2073	1,486	1,553	1,468	1,391	1,489	2,390	1,920		1800
2173	1,493	1,561	1,475	1,399	1,496	2,406	1,941		1900
2273	1,500	1,568	1,481	1,407	1,503	2,420	1,961		2000
2373	1,506	1,575	1,488	1,414	1,509	2,434	1,981		2100
2473	1,512	1,582	1,494	1,422	1,515	2,447	1,999		2200
2573	1,518	1,589	1,500	1,429	1,520	2,459	2,017		2300
2673	1,524	1,595	1,505	1,436	1,526	2,469	2,035		2400
2773	1,529	1,602	1,510	1,444	1,531	2,479	2,031		2500

## 7 Оценочные средства проведения промежуточной аттестации (экзамена)

Промежуточная аттестация имеет целью определить степень достижения запланированных результатов обучения по дисциплине (модулю) – техническая термодинамика за 3 и 4 семестры обучения и проводится в форме экзамена, зачета и защиты курсовой работы.

а) Планируемые результаты обучения и оценочные средства для проведения промежуточной аттестации:

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства
<b>ОПК-2 Способностью демонстрировать базовые знания в области естественнонаучных дисциплин, готовностью выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности; применять для их разрешения основные законы естествознания</b>		
Знать	- основные термодинамические законы и зависимости, работу циклов, методы термодинамического анализа, направление повышение эффективности работы теплоэнергетических установок и процессов с точки зрения термодинамики	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сущность и формулировки первого закона термодинамики.</li> <li>2. Аналитическое выражение первого закона термодинамики.</li> <li>3. Показать на P – V диаграмме полезную работу и работу расширения (сжатия) для произвольного термодинамического процесса.</li> <li>4. Внутренняя энергия и энтальпия как функции состояния, их связь с теплоемкостью.</li> <li>5. Что называется полной теплоемкостью.</li> <li>6. Удельная теплоемкость – массовая, объемная и мольная, их обозначение и размерность.</li> <li>7. Какая теплоемкость больше – изобарная или изохорная и почему.</li> <li>8. Основные термодинамические процессы, их изображение на P–V и T–S диаграммах.</li> <li>9. Соотношение параметров для основных термодинамических процессов.</li> <li>10. Расчет адиабатного процесса с помощью функций <math>\kappa_0</math> и <math>\lambda_0</math>.</li> <li>11. Обратимые и необратимые процессы, основные причины необратимости.</li> <li>12. Изобразить на T – S диаграмме обратимый и необратимый адиабатный процесс расширения и сжатия.</li> <li>13. Сущность и формулировки второго закона термодинамики.</li> <li>14. Аналитическое выражение второго закона термодинамики для</li> </ol>

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства
		<p>обратимых и необратимых процессов.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>15. Энтропия как функция состояния, физический смысл энтропии.</li> <li>16. Что называется термодинамическим циклом.</li> <li>17. Прямые и обратные термодинамические циклы.</li> <li>18. Как оценить эффективность прямого и обратного цикла.</li> <li>19. Принципиальная схема теплового двигателя и холодильной установки.</li> <li>20. Прямой цикл Карно, его термический КПД, изображение на диаграммах состояния.</li> <li>21. Реальные газы, уравнение состояния Ван – дер – Ваальса.</li> <li>22. Фазовая P – T диаграмма для нормального и аномального вещества.</li> <li>23. Показать на T–S диаграмме затраченную на парообразование теплоту.</li> <li>24. Водяной пар – насыщенный (сухой и влажный) и перегретый – определения.</li> <li>25. Диаграммы состояния водяного пара P – V, T – S, h – S.</li> <li>26. Критическая и тройная точки.</li> <li>27. Термодинамические процессы водяного пара на диаграммах состояния.</li> <li>28. Уравнение первого закона термодинамики для потока рабочего тела.</li> <li>29. Как рассчитать скорость истечения и расход газа через сопло.</li> <li>30. Как определить профиль канала.</li> <li>31. Какое сопло необходимо для получения сверхзвуковой скорости.</li> <li>32. Какой процесс называется дросселированием.</li> <li>33. Изобразить процесс дросселирования на h – s диаграмме.</li> <li>34. Как изменяются параметры рабочего тела в процессе дросселирования.</li> <li>35. Какой из трех процессов сжатия в компрессоре (изотермический, адиабатный, политропный) является наиболее выгодным и почему.</li> <li>36. Многоступенчатое сжатие, его преимущества по сравнению с одноступенчатым компрессором.</li> <li>37. Циклы двигателей внутреннего сгорания, их сравнение.</li> <li>38. Циклы газотурбинных установок, их сравнение.</li> <li>39. Методы повышения эффективности газотурбинных установок.</li> <li>40. Цикл Карно для водяного пара.</li> </ol>

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства
		<p>41. Принципиальная схема паротурбинной установки.</p> <p>42. Цикл Ренкина с насыщенным паром, его термический КПД.</p> <p>43. Цикл Ренкина с перегретым паром, его термический КПД.</p> <p>44. Действительный цикл Ренкина, определение абсолютного внутреннего КПД.</p> <p>45. Влияние начальных и конечных параметров пара на термический КПД.</p> <p>46. Схема и цикл паротурбинной установки с промежуточным перегревом пара.</p> <p>47. Написать формулу термического КПД цикла с промежуточным перегревом.</p> <p>48. Какой цикл называется регенеративным.</p> <p>49. Схема и цикл паротурбинной установки с регенеративными отборами.</p> <p>50. Написать формулу термического КПД регенеративного цикла.</p> <p>51. Термодинамические основы теплофикации.</p> <p>52. Коэффициент использования теплоты (КИТ).</p> <p>53. Циклы атомных станций, перспективы использования атомной энергии.</p> <p>54. Бинарные циклы (паро – паровые и паро – газовые).</p> <p>55. Расчет термического КПД бинарных установок.</p> <p>56. Безмашинное (прямое) преобразование тепловой энергии в электрическую.</p> <p>57. Схема, цикл и термический КПД установки с МГД – генераторами.</p> <p>58. Холодильные установки – газовые и парокомпрессионные.</p> <p>59. Что называется тепловым насосом, как оценить его эффективность.</p> <p>60. Первый и второй законы термодинамики для химических систем.</p>
Уметь	- определять основные параметры процессов и установок, производить оценку их эффективности и разрабатывать мероприятия по повышению данной эффективности	<p style="text-align: center;">Задача 1</p> <p>К паровой турбине пар поступает с параметрами <math>P_1, t_1</math>. После адиабатного расширения пара в первой ступени до температуры <math>T_a</math>, он направляется в промежуточный подогреватель, где при постоянном давлении его температура повышается до <math>T_b</math>. Затем пар расширяется в последующих ступенях турбины до давления <math>P_2</math> в конденсаторе. Относительный внутренний КПД турбины <math>\eta_{oi}</math>, насоса <math>\eta_{oi}</math>. Определить:</p> <p>1. Параметры рабочего тела в характерных точках цикла (свести в таблицу);</p>

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства																																																																																																													
		<p>2. Теоретические и действительные работы турбины, насоса и цикла в целом;</p> <p>3. Термический и абсолютный внутренний КПД цикла с вторичным перегревом и без него (цикла Ренкина);</p> <p>4. На сколько уменьшится влажность пара на выходе из турбины по сравнению с циклом Ренкина;</p> <p>5. Каковы среднеинтегральные температуры подвода и отвода теплоты в цикле с вторичным перегревом и без него;</p> <p>Построить на <math>P - v</math>, <math>T - s</math>, <math>h - s</math> диаграммах (в масштабе) идеальный и действительный цикл с промежуточным перегревом и без него.</p> <p style="text-align: center;">Исходные данные:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2" style="text-align: left;">Параметры</th> <th colspan="10" style="text-align: center;">Вариант</th> </tr> <tr> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> <th>8</th> <th>9</th> <th>10</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Давление пара перед турбиной, <math>P_1</math>, МПа</td> <td>17</td> <td>15</td> <td>13</td> <td>11</td> <td>10</td> <td>12</td> <td>9</td> <td>13</td> <td>14</td> <td>9</td> </tr> <tr> <td>Температура пара перед турбиной, <math>t_1</math>, °С</td> <td>550</td> <td>560</td> <td>540</td> <td>570</td> <td>560</td> <td>510</td> <td>540</td> <td>550</td> <td>560</td> <td>520</td> </tr> <tr> <td>Температура пара перед промежуточным перегревом, <math>t_a</math>, °С</td> <td>300</td> <td>320</td> <td>370</td> <td>380</td> <td>350</td> <td>420</td> <td>310</td> <td>320</td> <td>340</td> <td>330</td> </tr> <tr> <td>Температура пара перед второй ступенью турбины, <math>t_b</math>, °С</td> <td>530</td> <td>540</td> <td>520</td> <td>550</td> <td>580</td> <td>560</td> <td>530</td> <td>540</td> <td>530</td> <td>520</td> </tr> <tr> <td>Давление пара на выходе из турбины <math>P_2</math>, МПа</td> <td></td> <td>0,003</td> <td></td> <td></td> <td>0,0035</td> <td></td> <td></td> <td>0,004</td> <td></td> <td>0,003</td> </tr> <tr> <td>Относительный внутренний КПД:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>турбины <math>\eta_{oi}^T</math></td> <td>0,86</td> <td>0,88</td> <td>0,90</td> <td>0,87</td> <td>0,86</td> <td>0,85</td> <td>0,91</td> <td>0,94</td> <td>0,95</td> <td>0,92</td> </tr> <tr> <td>насоса <math>\eta_{oi}^H</math></td> <td>0,82</td> <td>0,85</td> <td>0,86</td> <td>0,84</td> <td>0,83</td> <td>0,82</td> <td>0,88</td> <td>0,87</td> <td>0,90</td> <td>0,84</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;"><b>Задача 2</b></p> <p style="text-align: center;">В паровую турбину поступает пар с параметрами <math>P_1, t_1</math>.</p>	Параметры	Вариант										1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Давление пара перед турбиной, $P_1$ , МПа	17	15	13	11	10	12	9	13	14	9	Температура пара перед турбиной, $t_1$ , °С	550	560	540	570	560	510	540	550	560	520	Температура пара перед промежуточным перегревом, $t_a$ , °С	300	320	370	380	350	420	310	320	340	330	Температура пара перед второй ступенью турбины, $t_b$ , °С	530	540	520	550	580	560	530	540	530	520	Давление пара на выходе из турбины $P_2$ , МПа		0,003			0,0035			0,004		0,003	Относительный внутренний КПД:											турбины $\eta_{oi}^T$	0,86	0,88	0,90	0,87	0,86	0,85	0,91	0,94	0,95	0,92	насоса $\eta_{oi}^H$	0,82	0,85	0,86	0,84	0,83	0,82	0,88	0,87	0,90	0,84
Параметры	Вариант																																																																																																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																																																																																																					
Давление пара перед турбиной, $P_1$ , МПа	17	15	13	11	10	12	9	13	14	9																																																																																																					
Температура пара перед турбиной, $t_1$ , °С	550	560	540	570	560	510	540	550	560	520																																																																																																					
Температура пара перед промежуточным перегревом, $t_a$ , °С	300	320	370	380	350	420	310	320	340	330																																																																																																					
Температура пара перед второй ступенью турбины, $t_b$ , °С	530	540	520	550	580	560	530	540	530	520																																																																																																					
Давление пара на выходе из турбины $P_2$ , МПа		0,003			0,0035			0,004		0,003																																																																																																					
Относительный внутренний КПД:																																																																																																															
турбины $\eta_{oi}^T$	0,86	0,88	0,90	0,87	0,86	0,85	0,91	0,94	0,95	0,92																																																																																																					
насоса $\eta_{oi}^H$	0,82	0,85	0,86	0,84	0,83	0,82	0,88	0,87	0,90	0,84																																																																																																					

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства																																																																																							
		<p>Турбина имеет два регенеративных отбора в подогреватели поверхностного типа с каскадным сбросом конденсата греющего пара. Давление отборов <math>P_{01}</math> и <math>P_{02}</math>. Давление в конденсаторе <math>P_2</math>. Относительный внутренний КПД турбины <math>\eta_{oi}</math>.</p> <p>Определить:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Параметры рабочего тела в характерных точках цикла (свести в таблицу);</li> <li>2. Теоретическую и действительную работу турбины (цикла);</li> <li>3. Термический и абсолютный внутренний КПД цикла с регенерацией и без нее (цикл Ренкина);</li> <li>4. Экономию за счет введения регенеративного подогрева;</li> <li>5. Каковы среднеинтегральные температуры подвода и отвода теплоты в цикле с регенерацией и без нее;</li> </ol> <p>Построить на <math>P - v</math>, <math>T - s</math>, <math>h - s</math> диаграммах (в масштабе) идеальный и действительный циклы ПТУ с регенерацией.</p> <p style="text-align: center;">Исходные данные:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2" style="text-align: left;">Параметры</th> <th colspan="10" style="text-align: center;">Вариант</th> </tr> <tr> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> <th>8</th> <th>9</th> <th>10</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Давление пара перед турбиной <math>P_1</math>, МПа</td> <td>15</td> <td>17</td> <td>10</td> <td>8</td> <td>12</td> <td>9</td> <td>12</td> <td>10</td> <td>11</td> <td>9</td> </tr> <tr> <td>Температура пара перед турбиной <math>t_1</math>, °С</td> <td>520</td> <td>560</td> <td>500</td> <td>450</td> <td>510</td> <td>480</td> <td>530</td> <td>540</td> <td>550</td> <td>490</td> </tr> <tr> <td>Давление пара в первом отборе <math>P_{01}</math>, МПа</td> <td>0,7</td> <td>0,5</td> <td>0,6</td> <td>0,8</td> <td>0,4</td> <td>0,5</td> <td>0,6</td> <td>0,9</td> <td>0,7</td> <td>1,2</td> </tr> <tr> <td>Давление пара во втором отборе <math>P_{02}</math>, МПа</td> <td>0,12</td> <td>0,14</td> <td>0,15</td> <td>0,11</td> <td>0,15</td> <td>0,13</td> <td>0,10</td> <td>0,20</td> <td>0,16</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td>Давление пара на выходе из турбины <math>P_2</math>, МПа</td> <td colspan="2">0,003</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">0,0035</td> <td colspan="2">0,004</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Относительный внутренний КПД турбины <math>\eta_{oi}</math></td> <td>0,87</td> <td>0,85</td> <td>0,89</td> <td>0,91</td> <td>0,90</td> <td>0,94</td> <td>0,88</td> <td>0,93</td> <td>0,92</td> <td>0,92</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Задача 3</p>	Параметры	Вариант										1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Давление пара перед турбиной $P_1$ , МПа	15	17	10	8	12	9	12	10	11	9	Температура пара перед турбиной $t_1$ , °С	520	560	500	450	510	480	530	540	550	490	Давление пара в первом отборе $P_{01}$ , МПа	0,7	0,5	0,6	0,8	0,4	0,5	0,6	0,9	0,7	1,2	Давление пара во втором отборе $P_{02}$ , МПа	0,12	0,14	0,15	0,11	0,15	0,13	0,10	0,20	0,16	0,3	Давление пара на выходе из турбины $P_2$ , МПа	0,003				0,0035		0,004				Относительный внутренний КПД турбины $\eta_{oi}$	0,87	0,85	0,89	0,91	0,90	0,94	0,88	0,93	0,92	0,92
Параметры	Вариант																																																																																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																																																																															
Давление пара перед турбиной $P_1$ , МПа	15	17	10	8	12	9	12	10	11	9																																																																															
Температура пара перед турбиной $t_1$ , °С	520	560	500	450	510	480	530	540	550	490																																																																															
Давление пара в первом отборе $P_{01}$ , МПа	0,7	0,5	0,6	0,8	0,4	0,5	0,6	0,9	0,7	1,2																																																																															
Давление пара во втором отборе $P_{02}$ , МПа	0,12	0,14	0,15	0,11	0,15	0,13	0,10	0,20	0,16	0,3																																																																															
Давление пара на выходе из турбины $P_2$ , МПа	0,003				0,0035		0,004																																																																																		
Относительный внутренний КПД турбины $\eta_{oi}$	0,87	0,85	0,89	0,91	0,90	0,94	0,88	0,93	0,92	0,92																																																																															

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства																																																																																							
		<p>На ТЭЦ установлена турбина, в которой работает пар с начальными параметрами <math>P_1, t_1</math>. Турбина имеет два отбора. Первый – производственный при давлении <math>P_{01}</math>, расход пара – <math>D_{01}</math>. Второй - теплофикационный при давлении <math>P_{02}</math>, расход пара <math>D_{02}</math>. Давление в конденсаторе <math>P_2</math>. Мощность турбины <math>N</math>,  Температура питательной воды <math>t_{п.в.}</math>. Относительный внутренний КПД турбины <math>\eta_{oi}</math>.</p> <p>Определить:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Параметры рабочего тела в характерных точках цикла (свести в таблицу);</li> <li>2. Теоретическую и действительную работу турбины (цикла);</li> <li>3. Расход пара в конденсаторе;</li> <li>4. Количество теплоты на производственные и теплофикационные нужды;</li> <li>5. Теоретический и действительный коэффициент использования теплоты;</li> </ol> <p>Построить на <math>P - v, T - s, h - s</math> диаграммах (в масштабе) идеальный и действительный цикл ТЭЦ.</p> <p style="text-align: center;">Исходные данные:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2" style="text-align: left;">Параметры</th> <th colspan="10" style="text-align: center;">Вариант</th> </tr> <tr> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> <th>8</th> <th>9</th> <th>10</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Давление пара перед турбиной <math>P_1</math>, МПа</td> <td>5</td> <td>7</td> <td>10</td> <td>12</td> <td>15</td> <td>18</td> <td>9</td> <td>11</td> <td>14</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>Температура пара перед турбиной <math>t_1</math>, °С</td> <td>470</td> <td>510</td> <td>540</td> <td>550</td> <td>560</td> <td>570</td> <td>520</td> <td>530</td> <td>550</td> <td>560</td> </tr> <tr> <td>Давление пара в первом отборе <math>P_{01}</math>, МПа</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>1,5</td> <td>2</td> <td>2,5</td> <td>2,5</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>2,5</td> <td>1,8</td> </tr> <tr> <td>Давление пара во втором отборе <math>P_{02}</math>, МПа</td> <td>0,15</td> <td>0,18</td> <td>0,20</td> <td>0,25</td> <td>0,20</td> <td>0,30</td> <td>0,15</td> <td>0,17</td> <td>0,20</td> <td>0,5</td> </tr> <tr> <td>Расход пара в первом отборе <math>D_{01}</math>, т / ч</td> <td>20</td> <td>15</td> <td>18</td> <td>25</td> <td>30</td> <td>35</td> <td>16</td> <td>14</td> <td>10</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>Расход пара во втором отборе <math>D_{02}</math>, т / ч</td> <td>45</td> <td>40</td> <td>35</td> <td>15</td> <td>20</td> <td>25</td> <td>30</td> <td>36</td> <td>24</td> <td>25</td> </tr> </tbody> </table>	Параметры	Вариант										1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Давление пара перед турбиной $P_1$ , МПа	5	7	10	12	15	18	9	11	14	6	Температура пара перед турбиной $t_1$ , °С	470	510	540	550	560	570	520	530	550	560	Давление пара в первом отборе $P_{01}$ , МПа	1	2	1,5	2	2,5	2,5	1	2	2,5	1,8	Давление пара во втором отборе $P_{02}$ , МПа	0,15	0,18	0,20	0,25	0,20	0,30	0,15	0,17	0,20	0,5	Расход пара в первом отборе $D_{01}$ , т / ч	20	15	18	25	30	35	16	14	10	20	Расход пара во втором отборе $D_{02}$ , т / ч	45	40	35	15	20	25	30	36	24	25
Параметры	Вариант																																																																																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																																																																															
Давление пара перед турбиной $P_1$ , МПа	5	7	10	12	15	18	9	11	14	6																																																																															
Температура пара перед турбиной $t_1$ , °С	470	510	540	550	560	570	520	530	550	560																																																																															
Давление пара в первом отборе $P_{01}$ , МПа	1	2	1,5	2	2,5	2,5	1	2	2,5	1,8																																																																															
Давление пара во втором отборе $P_{02}$ , МПа	0,15	0,18	0,20	0,25	0,20	0,30	0,15	0,17	0,20	0,5																																																																															
Расход пара в первом отборе $D_{01}$ , т / ч	20	15	18	25	30	35	16	14	10	20																																																																															
Расход пара во втором отборе $D_{02}$ , т / ч	45	40	35	15	20	25	30	36	24	25																																																																															

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства																																												
		<table border="1"> <tr> <td>Давление пара на выходе из турбины <math>P_2</math>, МПа</td> <td>0,003</td> <td>0,0035</td> <td>0,004</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Мощность турбины <math>N_3</math>, МВт</td> <td>15</td> <td>25</td> <td>30</td> <td>35</td> <td>45</td> <td>40</td> <td>35</td> <td>30</td> <td>40</td> <td>18</td> </tr> <tr> <td>Температура питательной воды, С</td> <td>130</td> <td>125</td> <td>140</td> <td>130</td> <td>150</td> <td>125</td> <td>130</td> <td>145</td> <td>135</td> <td>120</td> </tr> <tr> <td>Относительный внутренний КПД турбины</td> <td>0,85</td> <td>0,86</td> <td>0,82</td> <td>0,84</td> <td>0,88</td> <td>0,83</td> <td>0,90</td> <td>0,92</td> <td>0,89</td> <td>0,93</td> </tr> </table> <p><b>Практические задания</b></p>	Давление пара на выходе из турбины $P_2$ , МПа	0,003	0,0035	0,004								Мощность турбины $N_3$ , МВт	15	25	30	35	45	40	35	30	40	18	Температура питательной воды, С	130	125	140	130	150	125	130	145	135	120	Относительный внутренний КПД турбины	0,85	0,86	0,82	0,84	0,88	0,83	0,90	0,92	0,89	0,93
Давление пара на выходе из турбины $P_2$ , МПа	0,003	0,0035	0,004																																											
Мощность турбины $N_3$ , МВт	15	25	30	35	45	40	35	30	40	18																																				
Температура питательной воды, С	130	125	140	130	150	125	130	145	135	120																																				
Относительный внутренний КПД турбины	0,85	0,86	0,82	0,84	0,88	0,83	0,90	0,92	0,89	0,93																																				
Владеть	- основными законами и зависимостями технической термодинамики, методами термодинамического анализа, способами совершенствования профессиональных знаний, способами демонстрации и умения анализировать ситуацию	<p>Примерный перечень курсовых работ:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Применение термодинамических методов к оценке эффективности необратимых циклов</li> <li>2. Применение термодинамических методов к оценке процессов смешения</li> <li>3. Применение термодинамических методов к оценке сжатия в компрессоре</li> <li>4. Применение термодинамических методов к оценке циклов ДВС</li> <li>5. Применение термодинамических методов к оценке реактивных циклов</li> <li>6. Применение термодинамических методов к оценке циклов тепловых насосов</li> <li>7. Применение термодинамических методов к оценке процессов течения газов и жидкостей</li> <li>8. Применение термодинамических методов к оценке прямого преобразования теплоты в электроэнергию</li> <li>9. Применение термодинамических методов к оценке циклов газотурбинных установок</li> <li>10. Применение термодинамических методов к оценке циклов парогазовых установок</li> <li>11. Применение термодинамических методов к оценке расчетам энтропии веществ</li> </ol>																																												

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства
		12. Энтропийный метод оценки эффективности циклов
<b>ПК-4 способностью к проведению экспериментов по заданной методике, обработке и анализу полученных результатов с привлечением соответствующего математического аппарата</b>		
Знать	- принцип действия основных измерительных приборов, алгоритм выполнения эксперимента, методов обработки полученных результатов исходя из заявленной цели, метод постановки цели эксперимента и разработка хода его выполнения	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сущность и формулировки первого закона термодинамики.</li> <li>2. Аналитическое выражение первого закона термодинамики.</li> <li>3. Показать на <math>P - V</math> диаграмме полезную работу и работу расширения (сжатия) для произвольного термодинамического процесса.</li> <li>4. Внутренняя энергия и энтальпия как функции состояния, их связь с теплоемкостью.</li> <li>5. Что называется полной теплоемкостью.</li> <li>6. Удельная теплоемкость – массовая, объемная и мольная, их обозначение и размерность.</li> <li>7. Какая теплоемкость больше – изобарная или изохорная и почему.</li> <li>8. Основные термодинамические процессы, их изображение на <math>P-V</math> и <math>T-S</math> диаграммах.</li> <li>9. Соотношение параметров для основных термодинамических процессов.</li> <li>10. Расчет адиабатного процесса с помощью функций <math>\mu_0</math> и <math>\nu_0</math>.</li> <li>11. Обратимые и необратимые процессы, основные причины необратимости.</li> <li>12. Изобразить на <math>T - S</math> диаграмме обратимый и необратимый адиабатный процесс расширения и сжатия.</li> <li>13. Сущность и формулировки второго закона термодинамики.</li> <li>14. Аналитическое выражение второго закона термодинамики для обратимых и необратимых процессов.</li> <li>15. Энтропия как функция состояния, физический смысл энтропии.</li> <li>16. Что называется термодинамическим циклом.</li> <li>17. Прямые и обратные термодинамические циклы.</li> <li>18. Как оценить эффективность прямого и обратного цикла.</li> <li>19. Принципиальная схема теплового двигателя и холодильной установки.</li> </ol>

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства
		<p>20. Прямой цикл Карно, его термический КПД, изображение на диаграммах состояния.</p> <p>21. Реальные газы, уравнение состояния Ван – дер – Ваальса.</p> <p>22. Фазовая P – T диаграмма для нормального и аномального вещества.</p> <p>23. Показать на T–S диаграмме затраченную на парообразование теплоту.</p> <p>24. Водяной пар – насыщенный (сухой и влажный) и перегретый – определения.</p> <p>25. Диаграммы состояния водяного пара P – V, T – S, h – S.</p> <p>26. Критическая и тройная точки.</p> <p>27. Термодинамические процессы водяного пара на диаграммах состояния.</p> <p>28. Уравнение первого закона термодинамики для потока рабочего тела.</p> <p>29. Как рассчитать скорость истечения и расход газа через сопло.</p> <p>30. Как определить профиль канала.</p> <p>31. Какое сопло необходимо для получения сверхзвуковой скорости.</p> <p>32. Какой процесс называется дросселированием.</p> <p>33. Изобразить процесс дросселирования на h – s диаграмме.</p> <p>34. Как изменяются параметры рабочего тела в процессе дросселирования.</p> <p>35. Какой из трех процессов сжатия в компрессоре (изотермический, адиабатный, политропный) является наиболее выгодным и почему.</p> <p>36. Многоступенчатое сжатие, его преимущества по сравнению с одноступенчатым компрессором.</p> <p>37. Циклы двигателей внутреннего сгорания, их сравнение.</p> <p>38. Циклы газотурбинных установок, их сравнение.</p> <p>39. Методы повышения эффективности газотурбинных установок.</p> <p>40. Цикл Карно для водяного пара.</p> <p>41. Принципиальная схема паротурбинной установки.</p> <p>42. Цикл Ренкина с насыщенным паром, его термический КПД.</p> <p>43. Цикл Ренкина с перегретым паром, его термический КПД.</p> <p>44. Действительный цикл Ренкина, определение абсолютного внутреннего КПД.</p> <p>45. Влияние начальных и конечных параметров пара на термический КПД.</p>

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства
		<p>46. Схема и цикл паротурбинной установки с промежуточным перегревом пара.  47. Написать формулу термического КПД цикла с промежуточным перегревом.  48. Какой цикл называется регенеративным.  49. Схема и цикл паротурбинной установки с регенеративными отборами.  50. Написать формулу термического КПД регенеративного цикла.  51. Термодинамические основы теплофикации.  52. Коэффициент использования теплоты (КИТ).  53. Циклы атомных станций, перспективы использования атомной энергии.  54. Бинарные циклы (паро – паровые и паро – газовые ).  55. Расчет термического КПД бинарных установок.  56. Безмашинное (прямое) преобразование тепловой энергии в электрическую.  57. Схема, цикл и термический КПД установки с МГД – генераторами.  58. Холодильные установки – газовые и парокомпрессионные.  59. Что называется тепловым насосом, как оценить его эффективность.  60. Первый и второй законы термодинамики для химических систем.</p>
Уметь	- определять параметры системы с помощью измерительных приборов, обрабатывать полученные результаты и делать на основе них выводы, в соответствии с поставленной целью, ставить цель и разрабатывать порядок проведения эксперимента	<p>1. Написать уравнение I закона термодинамики через энтальпию.  2. При исследовании какого термодинамического процесса используются функции?  3. Как определяется работа расширения во всех термодинамических процессах идеального газа?  4. Сущность II закона термодинамики.  5. Для какого количества вещества справедливо выражение <math>Pv=RT</math>?  а). для 1 кг; г). для произвольного количества вещества;  б). для 1 м; д). для любого постоянного количества.  в). Для 1 моля;  Задача</p> <p>В процессе политропного расширения азота температура его уменьшилась от <math>t_1=20^{\circ}\text{C}</math> до <math>t_2=-40^{\circ}\text{C}</math>. Начальное давление азота <math>P_1=0,5\text{МПа}</math>, количество его <math>m=2\text{кг}</math>. Определить изменение энтропии в этом процессе, если известно, что количество подведенной теплоты составляет <math>90\text{кДж}</math>.</p>

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства
		<p>В регенеративном подогревателе газовой турбины воздух нагревается при постоянном давлении от <math>t_1=120^\circ\text{C}</math> до <math>t_2=450^\circ\text{C}</math>. Определить количество теплоты, сообщенной воздуху в единицу времени, если его расход составляет 200кг/час.</p> <p>Определить изменение энтропии 1кг двуокиси углерода в изохорном процессе. Начальные параметры углекислоты: <math>t_1=40^\circ\text{C}</math>, <math>P_1=0,2\text{МПа}</math>, конечные: <math>t_2=253^\circ\text{C}</math>, <math>P_2=4,5\text{Мпа}</math>.</p>
Владеть	-методиками постановки эксперимента, определения параметров системы измерительными приборами и обработки полученных результатов	<p><b>Примерный перечень курсовых работ:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Применение термодинамических методов к оценке эффективности паросиловых циклов</li> <li>2. Применение термодинамических методов к оценке теплосиловых газовых циклов</li> <li>3. Применение термодинамических методов к оценке холодильных циклов</li> <li>4. Применение термодинамических методов к оценке циклов ДВС</li> <li>5. Применение термодинамических методов к оценке реактивных циклов</li> <li>6. Применение термодинамических методов к оценке циклов тепловых насосов</li> <li>7. Применение термодинамических методов к оценке процессов течения газов и жидкостей</li> <li>8. Применение термодинамических методов к оценке прямого преобразования теплоты в электроэнергию</li> <li>9. Применение термодинамических методов к оценке циклов газотурбинных установок</li> <li>10. Применение термодинамических методов к оценке циклов парогазовых установок</li> <li>11. Применение термодинамических методов к оценке расчетам энтропии</li> </ol>

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства
		веществ 12. Применение термодинамических методов к оценке термических к.п.д. обратимых циклов

б) Порядок проведения промежуточной аттестации, показатели и критерии оценивания.

Критерии оценки (в соответствии с формируемыми компетенциями и планируемыми результатами обучения):

– на оценку «отлично» – студент должен показать базовые знания по изучаемой дисциплине на уровне воспроизведения и объяснения информации, показать интеллектуальные навыки решения простых задач, свободное владение и понимание материала в пределах экзаменационного билета, а также углубленные знания по изучаемой дисциплине, в ходе ответов на дополнительные вопросы;

на оценку «хорошо» – студент должен показать базовые знания по изучаемой дисциплине на уровне воспроизведения и объяснения информации, показать интеллектуальные навыки решения простых задач, свободное владение и понимание материала в пределах экзаменационного билета;

– на оценку «удовлетворительно» – студент должен показать базовые знания по изучаемой дисциплине на уровне воспроизведения и объяснения информации, показать интеллектуальные навыки решения простых задач;

– на оценку «неудовлетворительно» – студент не может показать знания на уровне воспроизведения и объяснения информации, не может показать интеллектуальные навыки решения простых задач.

Показатели и критерии оценивания курсовой работы:

– на оценку «отлично» (5 баллов) – работа выполнена в соответствии с заданием, обучающийся показывает высокий уровень знаний не только на уровне воспроизведения и объяснения информации, но и интеллектуальные навыки решения проблем и задач, нахождения уникальных ответов к проблемам, оценки и вынесения критических суждений;

– на оценку «хорошо» (4 балла) – работа выполнена в соответствии с заданием, обучающийся показывает знания не только на уровне воспроизведения и объяснения информации, но и интеллектуальные навыки решения проблем и задач, нахождения уникальных ответов к проблемам;

– на оценку «удовлетворительно» (3 балла) – работа выполнена в соответствии с заданием, обучающийся показывает знания на уровне воспроизведения и объяснения информации, интеллектуальные навыки решения простых задач;

– на оценку «неудовлетворительно» (2 балла) – задание преподавателя выполнено частично, в процессе защиты работы обучающийся допускает существенные ошибки, не может показать интеллектуальные навыки решения поставленной задачи.

– на оценку «неудовлетворительно» (1 балл) – задание преподавателя выполнено частично, обучающийся не может воспроизвести и объяснить содержание, не может показать интеллектуальные навыки решения поставленной задачи.

Показатели и критерии оценивания зачета:

- «зачтено» - обучающийся справился с решением комплексных задач и защитил курсовую работу.
- «незачтено» - обучающийся не справился с решением комплексных задач и с выполнением курсовой работы.

## 8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

### а) Основная литература:

1. Барилевич, В. А. Основы технической термодинамики и теории тепло- и массообмена: Учеб. пособие. / В.А. Барилевич, Ю.А. Смирнов - М.: ИНФРА-М, 2019. - 432 с. - (Высшее образование: Бакалавриат). - [www.dx.doi.org/10.12737/3292](http://www.dx.doi.org/10.12737/3292). - ISBN 978-5-16-005771-2. - Текст : электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/1003418> - Режим доступа: по подписке. Термодинамика и молекулярная физика
2. Кириллин В.А., Техническая термодинамика : учебник для вузов / Кириллин В.А. - М. : Издательский дом МЭИ, 2019. - ISBN 978-5-383-01156-0 - Текст : электронный // ЭБС "Консультант студента" : [сайт]. - URL : <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383011560.html> - Режим доступа : по подписке.

### б) Дополнительная литература:

1. Мирам А.О., ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА. ТЕПЛОМАССОБМЕН / А.О. Мирам, В.А. Павленко - М. : Издательство АСВ, 2017. - 352 с. - ISBN 978-5-93093-841-8 - Текст : электронный // ЭБС "Консультант студента" : [сайт]. - URL : <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785930938418.html> - Режим доступа : по подписке.
2. Белов, Г. В. Техническая термодинамика : учебное пособие для вузов / Г. В. Белов. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 252 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-05091-2. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/451532>
3. Пинтя, Т. Н. Техническая термодинамика: конспект лекций : учебное пособие / Т. Н. Пинтя. - Магнитогорск : МГТУ, 2012. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - Загл. с титул. экрана. - URL: <https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=1015.pdf&show=dcatalogues/1/1119268/1015.pdf&view=true> - Макрообъект. - Текст : электронный. - Сведения доступны также на CD-ROM.

### в) методические указания:

1. Пинтя, Т. Н. Экспериментальное исследование процессов термодинамики. Лабораторный практикум : учебное пособие / Т. Н. Пинтя ; МГТУ. - Магнитогорск : МГТУ, 2013. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - Загл. с титул. экрана. - URL: <https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=1242.pdf&show=dcatalogues/1/1123323/1242.pdf&view=true> - Макрообъект. - Текст : электронный. - Сведения доступны также на CD-ROM.
2. Пособие к выполнению курсовой работы приведено в приложении к РПД.

### г) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

Наименование ПО	№ договора	Срок действия лицензии
Стандартные		
Microsoft Windows 7	Д-1227 от 08.10.2018	11.10.2021
Microsoft Office 2007	№135 от 17.09.2007	Бессрочно
7Zip	Свободно распространяемое	бессрочно
FAR Manager	Свободно распространяемое	бессрочно
Дополнительные		
Microsoft Windows 10 Pro	Д-1227 от 8.10.2018	11.10.2021

1. Федеральный институт промышленной собственности : сайт РОСПАТЕНТА / ФИПС. – Москва : ФИПС, 2009 – . – URL: <http://www1.fips.ru/> (дата обращения: 18.09.2020). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
2. Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) : национальная библиографическая база данных научного цитирования. – Текст: электронный // eLIBRARY.RU : научная электронная библиотека : сайт. – Москва, 2000 – . – URL: [https://elibrary.ru/project\\_risc.asp](https://elibrary.ru/project_risc.asp) (дата обращения: 18.09.2020). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.
3. Академия Google (Google Scholar) : поисковая система : сайт. – URL: <https://scholar.google.ru/> (дата обращения: 18.09.2020). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст: электронный.
4. Единое окно доступа к информационным ресурсам : электронная библиотека : сайт / ФГАУ ГНИИ ИТТ "ИНФОРМИКА". – Москва, 2005. – . – URL: <http://window.edu.ru/> (дата обращения: 18.09.2020). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
5. East View Information Services : Электронная база периодических изданий / ООО «ИВИС. – URL: <https://dlib.eastview.com/> (дата обращения: 18.09.2020). – Режим доступа: по подписке. – Текст: электронный.
6. Российская Государственная библиотека. Каталоги : сайт / Российская государственная библиотека. – Москва : РГБ, 2003 – . URL: <https://www.rsl.ru/ru/4readers/catalogues/> (дата обращения: 18.09.2020). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
7. Электронная библиотека МГТУ им. Г. И. Носова. – URL: <http://magtu.ru:8085/marcweb2/Default.asp> (дата обращения: 18.09.2020). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей (вход с внешней сети по логину и паролю). – Текст: электронный.
8. Университетская информационная система РОССИЯ : научная электронная библиотека : сайт / НИВЦ ; Экономический факультет МГУ. – Москва : НИВЦ, 1997 – . – URL: <https://uisrussia.msu.ru> (дата обращения: 18.09.2020). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
9. Web of science : Международная наукометрическая реферативная и полнотекстовая база данных научных изданий : сайт. – URL: <http://webofscience.com> (дата обращения: 18.09.2020). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей (вход по IP-адресам вуза). – Текст: электронный.
10. Scopus : Международная реферативная и полнотекстовая справочная база данных научных изданий : сайт. – URL: <http://scopus.com> (дата обращения: 18.09.2020). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей (вход по IP-адресам вуза). – Текст: электронный.
11. Springer Journals : Международная база полнотекстовых журналов : сайт. – URL: <http://link.springer.com/> (дата обращения: 18.09.2020). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей (вход по IP-адресам вуза). – Текст: электронный.
12. Springer Protocols : Международная коллекция научных протоколов по различным отраслям знаний : сайт. – URL: <http://www.springerprotocols.com/> (дата обращения: 18.09.2020). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей (вход по IP-адресам вуза). – Текст: электронный.
13. SpringerMaterials : Международная база научных материалов в области физических наук и инжиниринга : сайт. – URL: <http://materials.springer.com/> (дата обращения: 18.09.2020). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей (вход по IP-адресам вуза). – Текст: электронный.
14. Springer Reference : Международная база справочных изданий по всем отраслям знаний: сайт. – URL: <http://www.springer.com/references> (дата обращения: 18.09.2020). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей (вход по IP-адресам вуза). – Текст: электронный.

15. zbMATH : Международная реферативная база данных по чистой и прикладной математике : сайт. – URL: <http://zbmath.org/> (дата обращения: 18.09.2020). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей (вход по IP-адресам вуза). – Текст: электронный.
16. Springer Nature : Международная реферативная и полнотекстовая справочная база данных научных изданий : сайт. – URL: <https://www.nature.com/siteindex> (дата обращения: 18.09.2020). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст: электронный.
17. Архив научных журналов : сайт / Национальный электронно-информационный консорциум. – Москва : НЭИКОН, 2013 – . – URL: <https://archive.neicon.ru/xmlui/> (дата обращения: 18.09.2020). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей (вход по IP-адресам вуза). – Текст: электронный.
18. eLIBRARY.RU : научная электронная библиотека : сайт. – Москва, 2000 – . – URL: <https://elibrary.ru> (дата обращения: 09.01.2018). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст: электронный.
19. РУКОНТ : национальный цифровой ресурс : межотраслевая электронная библиотека : сайт / консорциум «КОТЕКСТУМ». – Сколково, 2010 – . – URL: <https://rucont.ru> – Режим доступа: для авториз. пользователей. – Текст: электронный.
20. Расчетный сервер НИУ МЭИ. Режим доступа: [http://tw.t.mpei.ac.ru/ochkov/VPU\\_Book\\_New/mas/index.html](http://tw.t.mpei.ac.ru/ochkov/VPU_Book_New/mas/index.html)

### 9. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

В соответствии с учебным планом по дисциплине «Техническая термодинамика» предусмотрены следующие виды занятий: лекционные, практические занятия, самостоятельная работа, консультации (столбец ВНКР), зачет, экзамен, курсовая работа.

Заполним таблицу в разделе 9:

Тип и название аудитории	Оснащение аудитории
Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа	Мультимедийные средства хранения, передачи и представления информации.
Учебная аудитория для проведения лабораторных работ: лаборатория термодинамики	Комплекс лабораторных установок по технической термодинамике, ЛАТР, ротационные насосы.
Учебные аудитории для проведения практических занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации	Доска, мел.
Учебные аудитории для выполнения курсового проектирования, помещения для самостоятельной работы обучающихся	Персональные компьютеры с пакетом MS Office, выходом в Интернет и с доступом в электронную информационно-образовательную среду университета
Помещение для хранения и профилактического обслуживания учебного оборудования	Стеллажи, сейфы для хранения учебного оборудования Инструменты для ремонта лабораторного оборудования

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Пособие для выполнения курсовой работы.

## Расчет горения доменного газа

Состав доменного газа выглядит следующим образом табл.1.

Таблица 1

CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
22.9%	18.1%	6.2%	52%

Запишем реакции горения доменного газа:



По теплоте образования исходных и конечных веществ при стандартных условиях найдем теплоту, которая выделяется при протекании реакций (1) и (2) соответственно:

$$Q(1) = \dot{q}$$

$$Q_1 = \frac{|Q(1)|}{0.0224} = 10796.429 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}, \quad (3)$$

$$Q(2) = \dot{q},$$

$$Q_2 = \frac{|Q(2)|}{0.0224} = 12634.375 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}, \quad (4)$$

где  $\dot{q}$  - соответственно теплота образования водяного пара – минус 241,814 кДж/моль, диоксида углерода – минус 393,54 кДж/моль, оксида углерода – минус 110,53 кДж/моль, водорода – ноль, кислорода – ноль.

Подставляя значения из уравнений (3), (4) найдем низшую теплоту сгорания:

$$Q_n = Q_1 * 0.062 + Q_2 * 0.229 = 3562.344 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \quad (5)$$

Для нахождения высшей теплоты сгорания найдем теплоту, которая выделяется при протекании реакции (1):

$$Q'(1) = \dot{q},$$

$$Q'_1 = \frac{|Q'(1)|}{0.0224} = 12760.246 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}, \quad (6)$$

где  $\dot{q}$  - теплота образования капельной воды – минус 285,83 кДж/моль.

Подставляя значения из уравнений (4), (6) найдем высшую теплоту сгорания:

$$Q_g = Q'_1 * 0.062 + Q_2 * 0.229 = 3684.1 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \quad (7)$$

Количество воздуха, необходимого для осуществления процесса горения, найдем по формуле:

$$V_B = \frac{0.5 * H_2 + 0.5 * CO}{0.21} \quad (8)$$

где H<sub>2</sub>, CO – процентные содержания водорода и оксида углерода соответственно. Подставляя эти значения получим:

$$V_B = \frac{0.5 * 0.062 + 0.5 * 0.229}{0.21} = 0.693 \text{ м}^3 \quad (9)$$

Количество кислорода необходимого для протекания процесса горения найдем по формуле:

$$O_2 = 0.5 * 0.5 * H_2 + 0.5 * CO = 0.13 \text{ м}^3 \quad (10)$$

Объем азота, содержащийся в воздухе, необходимом для горения, равен:

$$N_2 = V_B - O_2 = 0.563 \text{ м}^3 \quad (11)$$

Состав и объём продуктов сгорания найдем из уравнений (12) – (15):

$$H_2O = 1 * H_2 = 0.062 \text{ м}^3 \quad (12)$$

$$C O_2 = 1 * CO + C O_2 = 0.41 \text{ м}^3 \quad (13)$$

$$N_2 = 1.88 * CO + H_2 * 1.88 + N_2 = 1.067 \text{ м}^3 \quad (14)$$

$$V_{\text{ПСГ}} = H_2 + C O_2 + N_2 = 1.539 \text{ м}^3 \quad (15)$$

Температура горения доменного газа находится через полиномы по уравнениям (17) – (19):

$$C_{CO_2}(T) = 1.655 + 6.854 * 10^{-4} * T - 1.476 * 10^{-7} * T^2 \quad (17)$$

$$C_{N_2}(T) = 1.276 + 1.277 * 10^{-4} * T - 1.277 * 10^{-8} * T^2 \quad (18)$$

$$C_{H_2O}(T) = 1.467 + 2.741 * 10^{-4} * T - 1.525 * 10^{-8} * T^2 \quad (19)$$

$$N_2 * C_{N_2}(T) * T + CO_2 * C_{CO_2}(T) * T + H_2O * C_{H_2O}(T) = Q_6 \quad (20)$$

Решая уравнение (20) находим температуру горения доменного газа, которая равна 1419,062°C

Найдём точку росы: Это температура, при которой начинается выпадение влаги из продуктов сгорания. Определяется по парциальному давлению водяных паров.

Парциальное давление водяных паров:

$$p = \frac{V_{H_2O} * 101.325}{V_{n.c.g.}} = \frac{0,062 * 101,325}{0,838} = 7,49 \text{ кПа}; \text{ С помощью программы Water Steam}$$

Pro определим температуру при данном парциальном давлении. Водяной пар становится насыщенным над плоскостью поверхности воды при температуре: 40,28°C

### Расчет горения коксового газа

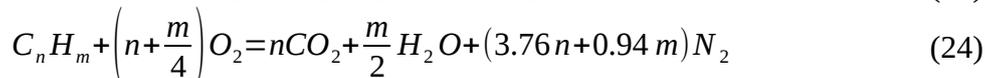
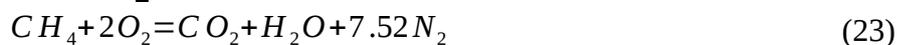
Произведем расчет горения коксового газа. Коэффициент избытка окислителя  $\alpha = 1,0$ , в качестве окислителя возьмем воздух, который состоит из 21%  $O_2$  и 79%  $N_2$ .

Состав коксового газа выглядит следующим образом табл.2.

Таблица 2

$H_2$	$CH_4$	$CO$	$CO_2$	$N_2$	$O_2$	$C_nH_m$
60%	26%	6%	2,6%	2,7%	0,5%	2,2%

Запишем реакции горения коксового газа:



По теплоте образования исходных и конечных веществ при стандартных условиях найдем теплоту, которая выделяется при протекании реакций (21) - (24) соответственно:

$$Q(21) = \dot{q},$$

$$Q_1 = \frac{|Q(21)|}{0.0224} = 10796.429 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}, \quad (25)$$

$$Q(22) = \dot{q},$$

$$Q_2 = \frac{|Q(22)|}{0.0224} = 12634.375 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}, \quad (26)$$

$$Q(23) = \dot{q},$$

$$Q_3 = \frac{|Q(23)|}{0.0224} = 35820,536 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}, \quad (27)$$

$$Q(24) = \dot{i},$$

$$Q_4 = \frac{|Q(24)|}{0.0224} = 63741.518 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}, \quad (28)$$

где  $\dot{i}$

$\dot{i}$  - соответственно теплота образования водяного пара – минус 241,814 кДж/моль, диоксида углерода – минус 393,54 кДж/моль, оксида углерода – минус 110,53 кДж/моль, водорода – ноль, кислорода – ноль, метана – минус 74,9 кДж/моль, этана – минус 84,73 кДж/моль.

Подставляя значения из уравнений (25) - (28) найдем низшую теплоту сгорания:

$$Q_H = Q_1 * 0.6 + Q_2 * 0.06 + Q_3 * 0.26 + Q_4 * 0.022 = 17951,492 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \quad (29)$$

Для нахождения высшей теплоты сгорания найдем теплоту, которая выделяется при протекании реакции (1):

$$Q'(21) = \dot{i},$$

$$Q'_1 = \frac{|Q'(1)|}{0.0224} = 12760.246 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}, \quad (30)$$

$$Q'(23) = \dot{i},$$

$$Q'_3 = \frac{|Q'(23)|}{0.0224} = 39748,214 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}, \quad (31)$$

$$Q'(24) = \dot{i},$$

$$Q'_4 = \frac{|Q'(24)|}{0.0224} = 69632,946 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}, \quad (32)$$

где  $\dot{i}$  - теплота образования капельной воды – минус 285,83 кДж/моль.

Подставляя значения из уравнений (26), (30) – (32) найдем высшую теплоту сгорания:

$$Q_G = Q'_1 * 0.6 + Q'_2 * 0.06 + Q'_3 * 0.26 + Q'_4 * 0.022 = 20280.579 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \quad (33)$$

Количество воздуха, необходимого для осуществления процесса горения, найдем по формуле:

$$V_B = \frac{0.5 * H_2 + 0.5 * CO + 2 * C H_4 + 3.5 * C_n H_m}{0.21} \quad (34)$$

где  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $C_nH_m$  – процентные содержания водорода, оксида углерода, метана и его гомологов соответственно. Подставляя эти значения получим:

$$V_B = \frac{0.5 * 0.6 + 0.5 * 0.06 + 2 * 0.26 + 3.5 * 0.022}{0.21} = 4.41 \text{ м}^3 \quad (35)$$

Количество кислорода необходимого для протекания процесса горения найдем по формуле:

$$O_2 = V_B * 0.21 = 0.927 \text{ м}^3 \quad (36)$$

Объем азота, содержащийся в воздухе, необходимом для горения, равен:

$$N_2 = V_B - O_2 = 3.487 \text{ м}^3 \quad (37)$$

Состав и объём продуктов сгорания найдем из уравнений (38) – (41):

$$H_2O = 1 * H_2 + 2 * C H_4 + 3 * C_n H_m = 1.186 \text{ м}^3 \quad (38)$$

$$CO_2 = 1 * CO + 1 * C H_4 + 2 * C_n H_m + C O_2 = 0.39 \text{ м}^3 \quad (39)$$

$$N_2 = 1.88 * CO + H_2 * 1.88 + 7.52 * C H_4 + 13.16 * C_n H_m + N_2 = 1.067 \text{ м}^3 \quad (40)$$

$$V_{\text{псг}} = H_2 + C O_2 + N_2 = 5.09 \text{ м}^3 \quad (41)$$

Парциальное давление найдем по формуле:

$$p = \frac{V_{H_2O} * 101.325}{V_{n.c.z.}} = \frac{1,186 * 101,325}{4,913} = 24,458 \text{ кПа} \quad (42)$$

С помощью программы Water Steam Pro определим температуру при данном парциальном давлении. Водяной пар становится насыщенным над плоскостью поверхности воды при температуре 64,47°C. Температура горения коксового газа находится через полиномы по уравнениям (17) – (19), (43):

$$C_{O_2}(T) = 1.301 + 2.061 * 10^{-4} * T - 3.54 * 10^{-8} * T^2 \quad (43)$$

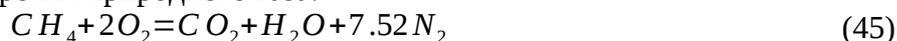
$$N_2 * C_{N_2}(T) * T + CO_2 * C_{CO_2}(T) * T + H_2O * C_{H_2O}(T) * T + O_2 * C_{O_2}(T) * T = Q_6 \quad (44)$$

Решая уравнение (44) находим температуру горения коксового газа, которая равна 2326,104°C.

### Расчет горения природного газа

Примем, что природный газ состоит только из метана – CH<sub>4</sub>.

Запишем реакции горения природного газа:



По теплоте образования исходных и конечных веществ при стандартных условиях найдем теплоту, которая выделяется при протекании реакций (низшую теплоту сгорания) (45):

$$Q(45) = \dot{i},$$

$$Q_n = \frac{|Q(45)|}{0.0224} = 35820.536 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}, \quad (46)$$

где  $\dot{i}$  - соответственно теплота образования водяного пара – минус 241,814 кДж/моль, диоксида углерода – минус 393,54 кДж/моль, кислорода – ноль, метана – минус 74,9 кДж/моль.

Для нахождения высшей теплоты сгорания найдем теплоту, которая выделяется при протекании реакции (45):

$$Q'(45) = \dot{i},$$

$$Q'_6 = \frac{|Q'(45)|}{0.0224} = 39748.17 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}, \quad (47)$$

где  $\dot{i}$  - теплота образования капельной воды – минус 285,83 кДж/моль.

Количество воздуха, необходимого для осуществления процесса горения, найдем по формуле:

$$V_B = \frac{2 * CH_4}{0.21} \quad (48)$$

где CH<sub>4</sub> – процентное содержание метана. Подставляя это значение получим:

$$V_B = \frac{2 * 1}{0.21} = 9.524 \text{ м}^3 \quad (49)$$

Количество кислорода необходимого для протекания процесса горения найдем по формуле:

$$O_2 = V_B * 0,21 = 2 \text{ м}^3 \quad (50)$$

Объем азота, содержащийся в воздухе, необходимом для горения, равен:

$$N_2 = V_B - O_2 = 7.524 \text{ м}^3 \quad (51)$$

Состав и объём продуктов сгорания найдем из уравнения (45):

$$H_2O = 2 * CH_4 = 2 \text{ м}^3 \quad (52)$$

$$CO_2 = 1 * CH_4 = 1 \text{ м}^3 \quad (53)$$

$$V_{псг} = H_2 + CO_2 + N_2 = 10.524 \text{ м}^3 \quad (54)$$

Парциальное давление найдем по формуле:

$$p = \frac{V_{H_2O} * 101.325}{V_{н.с.г.}} = \frac{2 * 101,325}{10,52} = 19,263 \text{ кПа} \quad (55)$$

С помощью программы Water Steam Pro определим температуру при данном парциальном давлении. Водяной пар становится насыщенным над плоскостью поверхности воды при температуре 59,24°C. Температура горения природного газа находится через полиномы по уравнениям (17) – (19):

$$N_2 * C_{N_2}(T) * T + CO_2 * C_{CO_2}(T) * T + H_2O * C_{H_2O}(T) * T = Q_г \quad (56)$$

Решая уравнение (56) находим температуру горения природного газа, которая равна 2043,535°C.

### Расчет горения конвертерного газа

Состав конвертерного газа выглядит следующим образом табл.3.

Таблица 3

CO	CO <sub>2</sub>
90%	10%

Запишем реакции горения конвертерного газа:



По теплоте образования исходных и конечных веществ при стандартных условиях найдем теплоту, которая выделяется при протекании реакции (57):

$$Q = \frac{|Q(57)|}{0.0224} = 12633.033 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}, \quad Q(57) = \dot{q}, \quad (58)$$

где  $\dot{q}$  - соответственно теплота образования диоксида углерода – минус 393,54 кДж/моль, оксида углерода – минус 110,53 кДж/моль, кислорода – ноль.

Количество воздуха, необходимого для осуществления процесса горения, найдем по формуле:

$$V_B = \frac{0.5 * CO}{0.21} \quad (59)$$

где H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> – процентные содержания водорода, оксида углерода, метана и его гомологов соответственно. Подставляя эти значения получим:

$$V_B = \frac{0.5 * 0.9}{0.21} = 2.143 \text{ м}^3 \quad (60)$$

Количество кислорода необходимого для протекания процесса горения найдем по формуле:

$$O_2 = V_B * 0,21 = 0,45 \text{ м}^3 \quad (61)$$

Объем азота, содержащийся в воздухе, необходимом для горения, равен:

$$N_2 = V_B - O_2 = 1.693 \text{ м}^3 \quad (62)$$

Состав и объём продуктов сгорания найдем из уравнения (57):

$$CO_2 = 1 * CO + C O_2 = 0.41 \text{ м}^3 \quad (63)$$

$$V_{псг} = CO_2 + N_2 = 2.693 \text{ м}^3 \quad (64)$$

Температура горения конвертерного газа находится через полиномы по уравнениям (17) и (18):

$$N_2 * C_{N_2}(T) * T + CO_2 * C_{CO_2}(T) * T = Q \quad (65)$$

Решая уравнение (65) находим температуру горения конвертерного газа, которая равна 2520,318°C.

## Расчет горения конвертированного газа

### Газ углекислотной конверсии природного газа.

Произведем расчет газа углекислотной конверсии. Коэффициент избытка окислителя  $\alpha=1,0$ . В качестве окислителя возьмем воздух, который состоит из 21%  $O_2$  и 79%  $N_2$ .

Состав газа выглядит следующим образом табл.4.

Таблица 4

CO	$H_2$
50%	50%

Запишем уравнение реакции пароводяной конверсии:



По теплоте образования исходных и конечных веществ при стандартных условиях найдем теплоту, которая выделяется при протекании реакций (67) и (68) соответственно:

$$Q(67) = \dot{i},$$

$$Q_1 = \frac{|Q(67)|}{0.0224} = 10796.429 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}, \quad (69)$$

$$Q(68) = \dot{i},$$

$$Q_2 = \frac{|Q(68)|}{0.0224} = 12633.033 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}, \quad (70)$$

где  $\dot{i}$  - соответственно теплота образования водяного пара – минус 241,814 кДж/моль, диоксида углерода – минус 393,54 кДж/моль, оксида углерода – минус 110,53 кДж/моль, водорода – ноль, кислорода – ноль.

Подставляя значения из уравнений (69) - (70) найдем низшую теплоту сгорания:

$$Q_H = \frac{Q_1 * 1 + Q_2 * 3}{0,0224 * 4} = 12173.884 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \quad (71)$$

Для нахождения высшей теплоты сгорания найдем теплоту, которая выделяется при протекании реакций (67):

$$Q'(67) = \dot{i},$$

$$Q'_1 = \frac{|Q'(67)|}{0.0224} = 12760.246 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}, \quad (72)$$

где  $\dot{i}$  - теплота образования капельной воды – минус 285,83 кДж/моль.

Подставляя значения из уравнений (70) и (72) найдем высшую теплоту сгорания:

$$Q_e = \frac{1 * Q'_1 + Q_2 * 3}{0,0224 * 4} = 12664.833 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \quad (73)$$

Количество воздуха, необходимого для осуществления процесса горения, найдем по формуле:

$$V_B = \frac{0.5 * H_2 + 0.5 * CO}{0.21} \quad (74)$$

где  $H_2$ ,  $CO$  – процентные содержания водорода, оксида углерода, метана и его гомологов соответственно. Подставляя эти значения получим:

$$V_B = \frac{0.5 * 0.5 + 0.5 * 0.5}{0.21} = 2.381 \text{ м}^3 \quad (75)$$

Количество кислорода необходимого для протекания процесса горения найдем по формуле:

$$O_2 = V_e * 0,21 = 0.5 \text{ м}^3 \quad (76)$$

Объем азота, содержащийся в воздухе, необходимом для горения, равен:

$$N_2 = V_B - O_2 = 1.881 \text{ м}^3 \quad (77)$$

Состав и объём продуктов сгорания найдем из уравнений (78) – (81):

$$H_2O = 1 * H_2 = 0.5 \text{ м}^3 \quad (78)$$

$$CO_2 = 1 * CO = 0.5 \text{ м}^3 \quad (79)$$

$$N_2 = 1.88 * CO + H_2 * 1.88 = 1.88 \text{ м}^3 \quad (80)$$

$$V_{\text{псг}} = H_2 + CO_2 + N_2 = 2.88 \text{ м}^3 \quad (81)$$

Парциальное давление найдем по формуле:

$$P_{H_2O} = \frac{V_{H_2O} * 101.325}{V_{\text{н.с.г.}}} = 17591,146 \text{ Па} \quad (82)$$

С помощью программы Water Steam Pro определим температуру при данном парциальном давлении. Водяной пар становится насыщенным над плоскостью поверхности воды при температуре 57,31°C. Температура горения газа находится через полиномы по уравнениям (17) – (19):

$$N_2 * C_{N_2}(T) * T + CO_2 * C_{CO_2}(T) * T + H_2O * C_{H_2O}(T) * T = Q_6 \quad (83)$$

Решая уравнение (83) находим температуру горения коксового газа, которая равна 2484,256°C.

### Газ пароводяной конверсии природного газа.

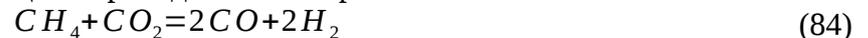
Произведем расчет газа пароводяной конверсии. Коэффициент избытка окислителя  $\alpha=1,0$ . В качестве окислителя возьмем воздух, который состоит из 21%  $O_2$  и 79%  $N_2$ .

Состав газа выглядит следующим образом табл.5.

Таблица 5

CO	$H_2$
25%	75%

Запишем уравнение реакции пароводяной конверсии:



По теплоте образования исходных и конечных веществ при стандартных условиях найдем теплоту, которая выделяется при протекании реакций (85) и (86) соответственно:

$$Q(85) = \dot{i},$$

$$Q_1 = \frac{|Q(85)|}{0.0224} = 10796.429 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}, \quad (87)$$

$$Q(86) = \dot{i},$$

$$Q_2 = \frac{|Q(86)|}{0.0224} = 12633.033 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}, \quad (88)$$

где  $\dot{i}$ - соответственно теплота образования водяного пара – минус 241,814 кДж/моль, диоксида углерода – минус 393,54 кДж/моль, оксида углерода – минус 110,53 кДж/моль, водорода – ноль, кислорода – ноль.

Подставляя значения из уравнений (87) - (88) найдем низшую теплоту сгорания:

$$Q_{\text{н}} = \frac{Q_1 * 1 + Q_2 * 3}{0,0224 * 4} = 12173.884 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \quad (89)$$

Для нахождения высшей теплоты сгорания найдем теплоту, которая выделяется при протекании реакций (85):

$$Q'(85) = \dot{i},$$

$$Q_1' = \frac{|Q'(85)|}{0.0224} = 12760.246 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}, \quad (90)$$

где  $i$  - теплота образования капельной воды – минус 285,83 кДж/моль.

Подставляя значения из уравнений (70) и (72) найдем высшую теплоту сгорания:

$$Q_6 = \frac{1*Q_1' + Q_2*3}{0,0224*4} = 12664.833 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \quad (91)$$

Количество воздуха, необходимого для осуществления процесса горения, найдем по формуле:

$$V_B = \frac{0.5*H_2 + 0.5*CO}{0.21} \quad (92)$$

где  $H_2$ ,  $CO$  – процентные содержания водорода, оксида углерода, метана и его гомологов соответственно. Подставляя эти значения получим:

$$V_B = \frac{0.5*0.25 + 0.5*0.75}{0.21} = 2.381 \text{ м}^3 \quad (93)$$

Количество кислорода необходимого для протекания процесса горения найдем по формуле:

$$O_2 = V_B * 0,21 = 0.5 \text{ м}^3 \quad (94)$$

Объем азота, содержащийся в воздухе, необходимом для горения, равен:

$$N_2 = V_B - O_2 = 1.881 \text{ м}^3 \quad (95)$$

Состав и объём продуктов сгорания найдем из уравнений (96) – (99):

$$H_2O = 1*H_2 = 0.75 \text{ м}^3 \quad (96)$$

$$CO_2 = 1*CO = 0.25 \text{ м}^3 \quad (97)$$

$$N_2 = 1.88 * CO + H_2 * 1.88 = 1.88 \text{ м}^3 \quad (98)$$

$$V_{\text{псг}} = H_2 + CO_2 + N_2 = 2.88 \text{ м}^3 \quad (99)$$

Парциальное давление найдем по формуле:

$$P_{H_2O} = \frac{V_{H_2O} * 101.325}{V_{\text{п.с.г.}}} = 26385.03 \text{ Па} \quad (100)$$

С помощью программы Water Steam Pro определим температуру при данном парциальном давлении. Водяной пар становится насыщенным над плоскостью поверхности воды при температуре 66,17°C. Температура горения газа находится через полиномы по уравнениям (17) – (19):

$$N_2 * C_{N_2}(T) * T + CO_2 * C_{CO_2}(T) * T + H_2O * C_{H_2O}(T) * T = Q_6 \quad (101)$$

Решая уравнение (83) находим температуру горения коксового газа, которая равна 2261,107°C.

## Сжатие доменного дутья

### ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Для доменного производства чугуна требуется 1400 – 1700 м<sup>3</sup> воздуха с температурой 1000 – 1200 °С и давлением до 4 – 6 атм. Сжатие трехступенчатое.

Рассчитать затраты механической энергии на сжатие и тепловой энергии на нагрев доменного дутья с добавлением 100 – 180 м<sup>3</sup> кислорода.

Рассчитать количество теплоты, отведенной от промежуточных холодильников воздуха.

$$L_{\text{сжс}} = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

Сжатие воздуха для доменного процесса осуществляется

Паровым приводом 9.0 Мпа и 535°С

И электрическим приводом с долей по заданию.

Определить расход пара и ЭЭ на привод.

При работе компрессора, в процессе сжатия газов, резко возрастает его температура. Последнее обстоятельство неприятно не только тем, что повышение температуры влечет значительные дополнительные затраты работы на сжатие. При этом также возрастают термические нагрузки на подвижные детали компрессора, что затрудняет смазку трущихся деталей. Степень повышения давления должна быть менее восьми, так как при больших происходит возгорание смазывающего масла.

Для повышения давления сжимаемого газа и экономичности компрессоров обычно применяют не одноступенчатое, а многоступенчатое сжатие с промежуточным охлаждением сжимаемого газа между ступенями.

Схематично 3-х ступенчатый поршневой компрессор представляет собой систему из 3-х поршней различного диаметра, жестко сидящих на одном валу и движущихся каждый в своем цилиндре (рис. 1).

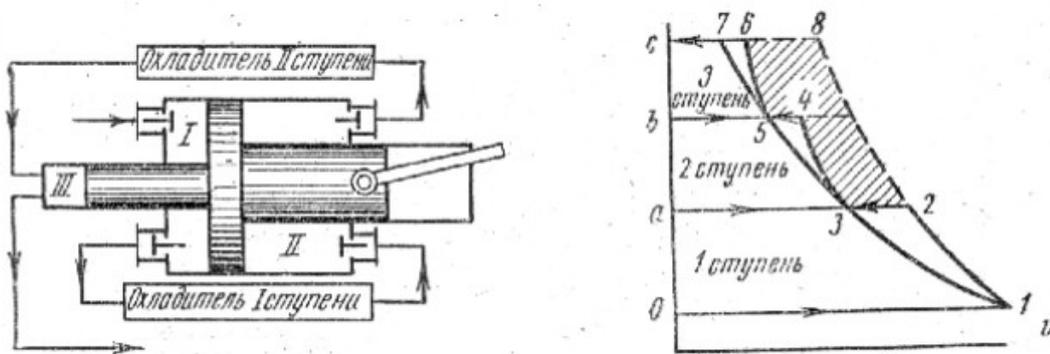


Рисунок 1 Схема работы и цикл трехступенчатого компрессора

В данном компрессоре между цилиндрами устанавливаются поверхностные водяные холодильники, проходя через которые газ, не снижая своего давления, уменьшает свою температуру до значения, близкого к t°С охлаждающей среды.

Сжатие воздуха в трехступенчатом компрессоре состоит из следующих процессов:

0–1 – всасывание воздуха из атмосферы;

1–2 – сжатие воздуха в ступени низкого давления I;

2–3 – охлаждение (изобарное) в охладителе воздуха I ступени;

3–4 – сжатие воздуха в ступени среднего давления II;

4–5 – охлаждение в охладителе воздуха II ступени;

5–6 – сжатие воздуха в ступени высокого давления III;

6–7 – выталкивание воздуха потребителю.

Процесс 1–8 показывает адиабатное сжатие воздуха без промежуточного охлаждения.

Так как площади в p-v координатах определяют работу, штриховкой показана работа, сэкономленная при работе трехступенчатого компрессора при охлаждении сжатого воздуха

после 2 и 3 ступенями (т.е. площадь 0187 показывает работу сжатия трехступенчатого компрессора без промежуточного охлаждения воздуха, а площадь 01234567 показывает работу сжатия компрессора с промежуточным охлаждением).

$$L_{сж} = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

Дано: Начальные параметры воздуха:  $t_1=0$  °С;  $p_1=100\ 000$  Па; Кислород  $t_{02}=0$  °С;  $v_{02}=100$  м<sup>3</sup>;  
 Параметры дутья:  $T_k=1000$  °С;  $p_2= 446\ 000$  Па;  $v_k=1500$  м<sup>3</sup>;  $v=0,775$  м<sup>3</sup> – удельный объём воздуха  
 Показатель политропы  $n=1.5$  Число ступеней  $m=3$

Распределение перепада давления между ступенями, должно быть таким чтобы суммарная техническая работа цикла всего компрессора была минимальной. Для компрессора с числом ступеней  $m$  этому условию отвечает отношение давлений на ступени:

$$f = \frac{p_{вых.ст}}{p_{вх.ст}} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$f = \left( \frac{446\ 000}{100\ 000} \right)^{\frac{1}{3}} = 1.646$$

Давление после 1 ступени:

$$p_{вых.1ст} = p_{вх.1ст} \cdot f$$

$$p_{вых.1ст} = 100000 \cdot 1.646$$

$$p_{вых.1ст} = 164600 \text{ Па}$$

Рассчитаем работу, которая затрачивается на сжатие газа для 1 ступени:

$$L_{сж} = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \cdot \left[ \left( \frac{p_{вых.ст}}{p_{вх.ст}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$$L_{сж1} = \frac{1,5}{1,5-1} \cdot 0,775 \cdot 1500 \cdot \left[ \left( \frac{446\ 000}{100\ 000} \right)^{\frac{1,5}{1,5-1}} - 1 \right]$$

$$L_{сж1} = 42020 \text{ Дж}$$

Температура в конце сжатия после 1 ступени:

$$T_1 = t_{02} + 273$$

$$T_1 = 273$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{p_{вых.1ст}}{p_{вх.1ст}} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$T_2 = 273 \cdot \left( \frac{446\ 000}{100\ 000} \right)^{\frac{1,5-1}{1,5}}$$

$$T_2 = 322,338 \text{ К}$$

$$t_2 = 322,338 - 273 = 49,338 \text{ °С}$$

Между ступенями компрессора установлены промежуточные холодильники, в котором воздух охлаждается.

Теплоёмкость воздуха при  $T_2$  равна  $C_v = 1,296$  кДж/м<sup>3</sup>·К

Показатель изэнтропы для воздуха  $k=1,4$ .

Рассчитаем количество теплоты, подводимой к системе (или отводимой от нее) в политропной процессе:

$$q_{1-2} = -C_v T_1 \frac{k-n}{n-1} \left[ \left( \frac{p_{\text{вых.см}}}{p_{\text{вх.см}}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$$q_{1-2} = -1.296 \cdot 273 \cdot \frac{1.4-1.5}{1.5-1} \left[ \left( \frac{446\,000}{100\,000} \right)^{\frac{1.5-1}{1.5}} - 1 \right]$$

$$q_{1-2} = 12.788 \text{ кДж/м}^3$$

Тепло отводимое с водой теряется в системах охлаждения.

## 2 ступень.

Давление после 2 ступени:

$$p_{\text{вх.2см}} = p_{\text{вых.1см}} \cdot f$$

$$p_{\text{вых.1см}} = 271000 \text{ Па}$$

$$p_{\text{вх.2см}} = 3,089 \cdot 10^5$$

$$v_{\text{вх.2см}} = v_{\text{вх.1см}} \cdot \left( \frac{p_{\text{вых.1см}}}{p_{\text{вх.1см}}} \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$v_{\text{вх.2см}} = 1,08 \text{ м}^3$$

Рассчитаем работу, которая затрачивается на сжатие газа для 2 ступени:

$$L_{\text{сж2}} = \frac{1.5}{1.5-1} \cdot 1,129 \cdot 164600 \cdot \left[ \left( \frac{446\,000}{100\,000} \right)^{\frac{1.5}{1.5-1}} - 1 \right]$$

$$L_{\text{сж2}} = 96420 \text{ Дж}$$

Температура в конце сжатия после 2 ступени:

$$T_1 = t_{02} + 273$$

$$T_1 = 273$$

$$T_3 = T_1 \cdot \left( \frac{p_{\text{вых.2см}}}{p_{\text{вх.2см}}} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$T_3 = 273 \cdot \left( \frac{446\,000}{100\,000} \right)^{\frac{1.5-1}{1.5}}$$

$$T_3 = T_2 = 322,338 \text{ К}$$

$$t_3 = 322,338 - 273 = 49,338 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Между ступенями компрессора установлены промежуточные холодильники, в котором воздух охлаждается.

Теплоёмкость воздуха при  $T_3$  равна  $C_v = 1,294 \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{К}$

Показатель изоэнтропы для воздуха  $k=1,4$ .

Рассчитаем количество теплоты, подводимой к системе ( или отводимой от нее) в политропной процессе:

$$q_{2-3} = -C_v T_1 \frac{k-n}{n-1} \left[ \left( \frac{p_{\text{вых.1см}}}{p_{\text{вх.1см}}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$$q_{2-3} = -1.294 \cdot 273 \cdot \frac{1.4-1.5}{1.5-1} \left[ \left( \frac{446\,000}{100\,000} \right)^{\frac{1.5-1}{1.5}} - 1 \right]$$

$$q_{2-3} = 15.099 \text{ кДж/м}^3$$

### 3 ступень.

Давление после 3 ступени:

$$P_{вх.3cm} = P_{вых.2cm} \cdot f$$

$$P_{вых.1cm} = 164600 \text{ Па}$$

$$V_{вх.3cm} = V_{вх.2cm} \cdot \left( \frac{P_{вых.1cm}}{P_{вх.1cm}} \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$V_{вх.3cm} = 1,506 \text{ м}^3$$

Рассчитаем работу, которая затрачивается на сжатие газа для 3 ступени:

$$L_{сж3} = \frac{1,5}{1,5-1} \cdot 1,506 \cdot 164600 \cdot \left[ \left( \frac{446000}{100000} \right)^{\frac{1,5}{1,5-1}} - 1 \right]$$

$$L_{сж2} = 2,751 \cdot 10^5 \text{ Дж}$$

Температура в конце сжатия после 2 ступени:

$$T_1 = t_{02} + 273$$

$$T_1 = 273$$

$$T_4 = T_1 \cdot \left( \frac{P_{вых.1cm}}{P_{вх.1cm}} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$T_4 = 273 \cdot \left( \frac{446000}{100000} \right)^{\frac{1,5-1}{1,5}}$$

$$T_4 = 322,338 \text{ К}$$

$$t_4 = 322,338 - 273 = 49,338 \text{ }^\circ\text{C}$$

Между ступенями компрессора установлены промежуточные холодильники, в котором воздух охлаждается.

Теплоёмкость воздуха при  $T_4$  равна  $C_v = 1,409 \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{К}$

Показатель изоэнтропы для воздуха  $k=1,4$ .

Рассчитаем общее количество теплоты, подводимой к системе (или отводимой от нее) в политропной процессе:

$$q_{общ} = q_1 + q_2 + q_3$$

$$q_{общ} = 27,888 \text{ кДж/м}^3$$

Рассчитаем общую работу сжатия:

$$L_{сж} = L_{сж1} + L_{сж2} + L_{сж3}$$

$$L_{сж} = 3,597 \cdot 10^5 \text{ Дж}$$

Далее воздух поступает в каупер для нагрева  $1000-1200 \text{ }^\circ\text{C}$  Теплота необходимая для нагрева воздуха.

Теплоёмкость воздуха при температуре входа в каупер  $C_{v1} = 1,296 \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{К}$  и на выходе  $C_{v2} = 1,409 \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{К}$ .

$$Q_{кауп} = v_k \cdot (C_{v2} \cdot t_k - C_{v1} \cdot t_4)$$

$$Q_{кауп} = 1500 \cdot (1,409 \cdot 1000 - 1,296 \cdot 49,338)$$

$$Q_{\text{кауп}} = 2,018 \cdot 10^6 \text{ кДж}$$

Сжатие воздуха для доменного процесса осуществляется паровым приводом 9.0 МПа и 535<sup>0</sup>С и электрическим приводом с долей по вариантам. Например, по варианту 12 доля электроприводов 28%.

Рассчитаем расход электроэнергии на привод:

$$L_{\text{ээ}} = \frac{28}{100} \cdot L_{\text{сжс}}$$

$$L_{\text{ээ}} = 1.007 \cdot 10^5 \text{ Дж}$$

Паровой привод:

$$L_{\text{пн}} = L_{\text{сжс}} - L_{\text{ээ}}$$

$$L_{\text{пн}} = 259000 \text{ Дж}$$

По адиабатному расширению пара с заданными начальными параметрами пара 9.0 МПа и 535<sup>0</sup>С.

Энтальпия по программе свойства воды и водяного пара равна  $h_1 = 3475$  кДж/кг, энтропия 6,7708 Дж/К.

При одинаковой энтропии находим конечные параметры пара.

Конечное давление в конденсаторе 4 кПа (по линии насыщения),  $h_2 = 2039$  кДж/кг,  $t = 29$  <sup>0</sup>С.

Рассчитаем работу 1 кг пара:

$$L_n = h_1 - h_2$$

$$L_n = 3475 - 2039$$

$$L_n = 1436 \text{ Дж}$$

Тогда расход пара будет:

$$D = \frac{L_{\text{пн}}}{L_n}$$

$$D = \frac{259000}{1436}$$

$$D = 180,356 \text{ кг}$$

Работа сжатия на общий объем:

$$L_{\text{сжс}} = L_{\text{сжс1}} + L_{\text{сжс2}} + L_{\text{сжс3}} \cdot 1500$$

$$L_{\text{сжс}} = 5,396 \cdot 10^8 \text{ Дж}$$

Рассчитаем расход электропривода на общий объем:

$$L_{\text{эн}} = L_{\text{ээ}} \cdot 1500$$

$$L_{\text{эн}} = 1.511 \cdot 10^8 \text{ Дж}$$

$$L_{эн} = L_{ээ} \cdot 1500$$

$$\frac{L_{эн} \cdot 10^{-3}}{3600} = 41.996 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

### Сжатие воздуха для производства кислорода

Сжатие воздуха для доменного процесса осуществляется

Паровым приводом 9.0 М па и 535°C

И электрическим приводом с долей по заданию .

Определить расход пара и ЭЭ на привод .

$$p_1 = 10^5 \text{ Па}$$

$$p_2 = 446 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

$$V_{вд} = 100 \text{ м}^3$$

$$V_{вкис} = 70 \text{ м}^3$$

$$V_{o_2} = \frac{V_{вд}}{0.21} = 476.19 \text{ м}^3$$

$$V_K = V_{вкис} + V_{вд} = 170 \text{ м}^3$$

$$V_o = \frac{V_K}{0.21} = 809.524 \text{ м}^3$$

$$F = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{3}} = 1.758$$

$$m = V_o \cdot 1.29 = 1.044 \cdot 10^3 \text{ кг}$$

1 ступень

$$P_{вых1ст} = 10^5 \cdot 1.74 = 1.74 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$n = 1.5$$

$V_1 = 0.775$  удельный объем воздуха

$$L_{сж1} = \left( \frac{n}{n-1} \right) \cdot P_1 \cdot V_1 \cdot \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = 1.762 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$L_{сж1o} = L_{сж1} \cdot m = 1.84 \cdot 10^8 \text{ Дж}$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{P_{вых1ст}}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 328.357 \text{ К}$$

$$C_v = 1.296$$

$$k = 1.4$$

$$q_{12} = -C_v \cdot T_1 \cdot \left( \left( k - n \right) \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) = 53.613 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$$

$$q_{12} = q_{12} \cdot V_o = 4.34 \cdot 10^4$$

2 ступень

$$P_{вых2ст} = P_{вых1ст} \cdot F = 3.058 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$V_{вх2ст} = V_1 \cdot \left( \frac{P_{вых1ст}}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}} = 1.121 \text{ м}^3$$

$$L_{сж2} = \left( \frac{n}{n-1} \right) * p_{вых1cm} * V_1 * \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = 4.434 * 10^5 \frac{Дж}{кг}$$

$$L_{сж2o} = L_{сж2} * m = 4.631 * 10^8 Дж$$

$$T_3 = T_1 * \left( \frac{p_{вых2cm}}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 329.463 K$$

$$T_1 = 273$$

$$q_{23} = -C_v * T_1 * \left( \left( k - n \right) \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) = 53.613 \frac{кДж}{м^3}$$

$$q_{12} = q_{12} * V_o = 4.34 * 10^4 м^3$$

3 ступень

$$P_{вых3cm} = P_{вых2cm} * F = 5.375 * 10^5 Па$$

$$V_{вх3cm} = v_2 * \left( \frac{P_{вых2cm}}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}} = 1.633 м^3$$

$$L_{сж3} = \left( \frac{n}{n-1} \right) * p_{вых2cm} * V_{вых2cm} * \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = 1.135 * 10^6 \frac{Дж}{кг}$$

$$L_{сж3o} = L_{сж3} * m = 1.185 * 10^9 Дж$$

$$T_4 = T_1 * \left( \frac{p_{вых2cm}}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 329.463 K$$

$$q_{общ} = q_{12} + q_{23} = 107.226 \frac{кДж}{м^3}$$

$$x = 21$$

$$L_o = L_{сж3o} + L_{сж2o} + L_{сж1o} = 1.832 * 10^9 Дж$$

$$L_{ээ} = \left( \frac{x}{100} \right) * (L_{сж1} + L_{сж2} + L_{сж3}) - L_{ээ} = 1.386 * 10^9 Дж$$

$$L_{ээ1} = L_{общ} * 0.21 = 3.848 * 10^8 кВт * ч$$

$$\frac{L_{ээ1} * 10^{-3}}{3600} = 106.888 кВт * ч$$

$$q_{23} = -C_v * T_1 * \left( \left( k - n \right) \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) = 53.613 \frac{кДж}{м^3}$$

$$q_{12} = q_{12} * V_o = 4.34 * 10^4 м^3$$

### Расчет обжига извести и нагрева металла

Для производства 1 т листового проката требуется 250 кг извести, которую получают обжигом известняка.

Рассчитать расходы топлив на обжиг известняка по начальной температуре горения.

Построить графики.

Рассчитать выход извести и CO<sub>2</sub> на 1 т проката.

Металл перед горячей прокаткой нагревается до 1200°C. Определить расходы топлива на этот нагрев.

Исходные данные

Расчет производим на доменный газ

$$Q_{пр} = 3562 \frac{кДж}{м^3}$$

$t_0=0\text{ }^\circ\text{C}$ - начальная температура нагрева известняка

$t_1=900\text{ }^\circ\text{C}$ - температура плавления известняка

$t_2=900\text{ }^\circ\text{C}$

$t_3=1200\text{ }^\circ\text{C}$

$t_4=1419\text{ }^\circ\text{C}$  -Температура горения доменного газа

$\text{CaO}=250\text{ кг}$  (известь)

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CaO}}{56} \cdot 44 = 196.429\text{ кг}$$

где 56 г/моль молярная масса  $\text{CaO}$  , 44 г/моль молярная масса  $\text{CO}_2$

$\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$

$$\text{CaCO}_3 = 250 + 196.429 = 446.429\text{ кг}$$

446.429 кг известняка требуется для получения 250 кг извести

Построим график зависимости температуры от теплоты (на 1 кг)

Процесс нагрева  $\text{CaCO}_3$ (известняк)

$$Q_1 = c \cdot m \cdot (t_1 - t_0)$$

Где  $Q_1$ -теплота необходимая для нагрева в кДж,  $c$  - удельная теплоемкость,  $c = 1.12 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$ ,  $m$ -масса известняка  $m = 446.429\text{ кг}$ ,  $t_1$ -начальная температура известняка  $t_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_1$ -

температура плавления известняка  $t_2 = 900\text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_1 = 1.12 \cdot 446.429 \cdot (900 - 0) = 4.496 \cdot 10^5\text{ кДж}$$

Процесс разложения  $\text{CaCO}_3$

$$Q_2 = Q_1 + 1781.87 \cdot m$$

$$Q_2 = 1008 + 1781.87 = 1.244 \cdot 10^6\text{ кДж}$$

Где  $Q_2$ -теплота разложения в кДж

Процесс перегрева  $\text{CaO}$

$$c_2 = 0.9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}, t_2 = 900\text{ }^\circ\text{C}, t_3 = 1200\text{ }^\circ\text{C}, m_1 = 250\text{ кг}$$

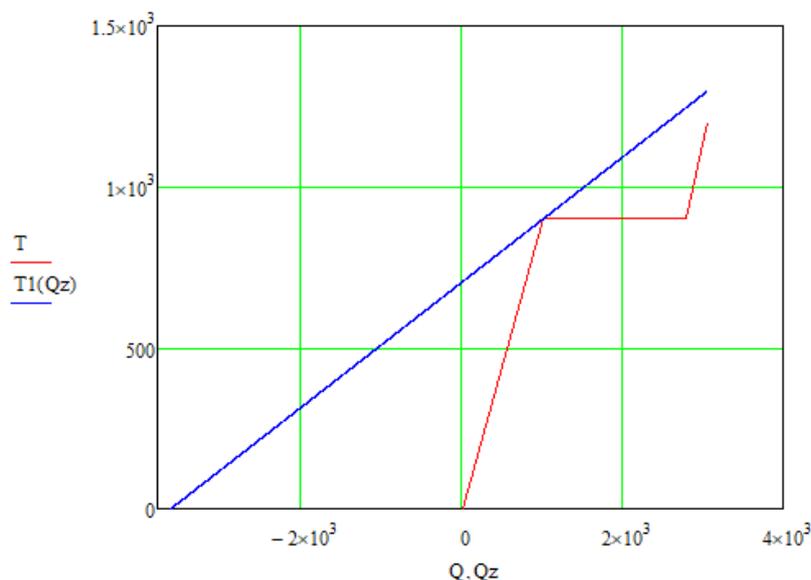
$$Q_3 = Q_2 + c_2 \cdot m_1 \cdot (t_3 - t_2)$$

$$Q_3 = 2789.87 + 0.9 \cdot 250 \cdot (1200 - 900) = 1.311 \cdot 10^6\text{ кДж}$$

Строим график зависимости температуры от теплоты

$$Q_0 = 0, Q_1 = 4.496 \cdot 10^5\text{ кДж}, Q_2 = 1.244 \cdot 10^6\text{ кДж}, Q_3 = 1.311 \cdot 10^6\text{ кДж}$$

$$t_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}, t_1 = 900\text{ }^\circ\text{C}, t_2 = 900\text{ }^\circ\text{C}, t_3 = 1200\text{ }^\circ\text{C}$$



По графику определили :

температуру уходящих газов  $T_{\text{уход}} = 595.728 \text{ }^\circ\text{C}$

Количество теплоты необходимое для обжига 1 кг известняка

$$Q_{\text{обж}} = 3631 + 3068 = 6.699 \cdot 10^3 \text{ кДж}$$

Где 3631 кДж – потери теплоты

Расход доменного газа на обжиг 1 кг известняка

$$V_{\text{дз}} = \frac{Q_{\text{обж}}}{Q_{\text{нр}}}$$

$$V_{\text{дз}} = \frac{6699}{3562} = 1.881 \text{ м}^3$$

Производим расчет на потребление доменного газа при обжиге известняка массой  $m = 446.429 \text{ кг}$

$$D_{\text{дз}} = V_{\text{дз}} \cdot m$$

$$D_{\text{дз}} = 1.881 \cdot 446.429 = 839.592 \text{ м}^3$$

Теплота на нагрев металла

$$Q_{\text{ме}} = c \cdot m \cdot \Delta t$$

Где  $c = 0.7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ,  $m = 1000 \text{ кг}$ ,  $\Delta t = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_{\text{ме}} = 0.7 \cdot 1000 \cdot 1200 = 8.4 \cdot 10^5 \text{ кДж}$$

Расход доменного газа на нагрев металла

$$V_{\text{ме}} = \frac{Q_{\text{ме}}}{Q_{\text{нр}}}$$

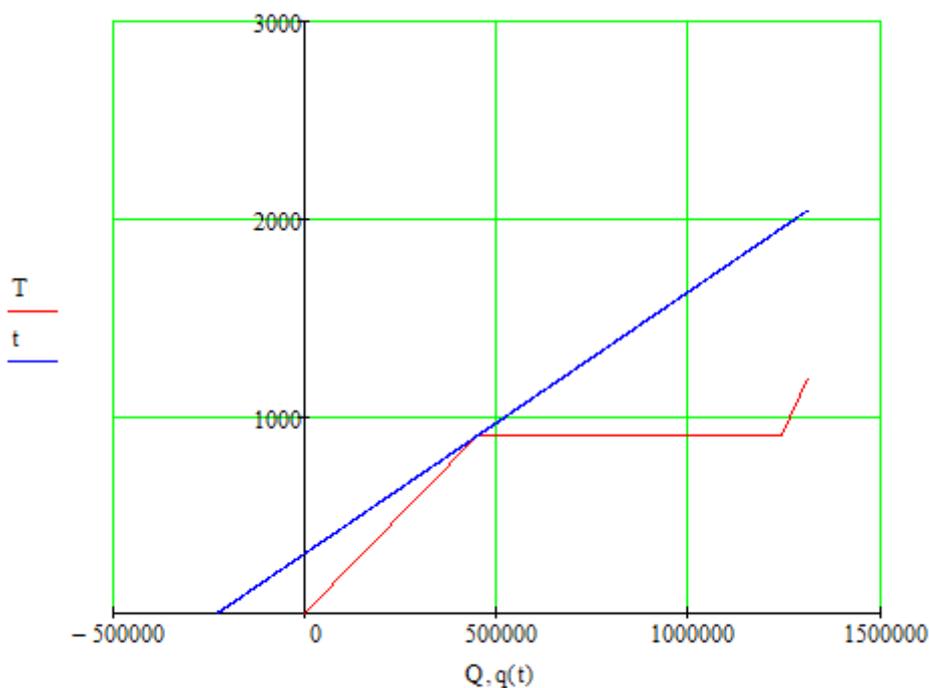
$$V_{\text{ме}} = \frac{8.4 \cdot 10^5}{3562} = 235.823 \text{ м}^3$$

Расчет производим на природный газ

$t_4 = 2043 \text{ }^\circ\text{C}$  Температура горения природного газа

$$Q_{\text{нр}} = 35820 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$$

Строим график зависимости температуры от теплоты



По графику определили :

температуру уходящих газов  $T_{\text{уход}} = 303.759^\circ\text{C}$

Количество теплоты необходимое для обжига известняка массой  $m = 446.429 \text{ кг}$

$$Q_{\text{обж}} = 2.29 \cdot 10^5 + 1.31 \cdot 10^6 = 1.69 \cdot 10^6 \text{ кДж}$$

Где 3631 кДж – потери теплоты

Расход природного газа на обжиг известняка массой  $m = 446.429 \text{ кг}$

$$V_{\text{дз}} = \frac{Q_{\text{обж}}}{Q_{\text{нр}}}$$

$$V_{\text{дз}} = \frac{1.69 \cdot 10^6}{35820} = 47.18 \text{ м}^3$$

Теплота на нагрев металла с помощью природного газ

$$Q_{\text{ме}} = c \cdot m \cdot \Delta t$$

Где  $c = 0.7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ,  $m = 1000 \text{ кг}$ ,  $\Delta t = 1200^\circ\text{C}$

$$Q_{\text{ме}} = 0.7 \cdot 1000 \cdot 1200 = 8.4 \cdot 10^5 \text{ кДж}$$

Расход природного газа на нагрев металла

$$V_{\text{ме}} = \frac{Q_{\text{ме}}}{Q_{\text{нр}}}$$

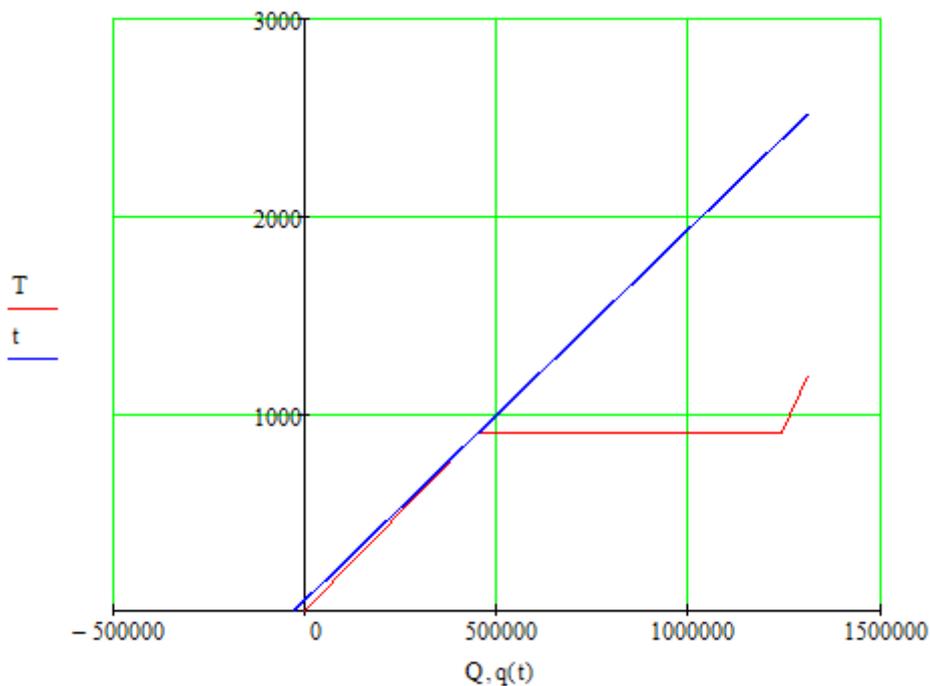
$$V_{\text{ме}} = \frac{8.4 \cdot 10^5}{35820} = 23.451 \text{ м}^3$$

Расчет производим на конверторный газ

$t_4 = 2520^\circ\text{C}$  Температура горения конверторного газа

$$Q_{\text{нр}} = 12633 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$$

Строим график зависимости температуры от теплоты



По графику определили :

температуру уходящих газов  $T_{\text{уход}} = 54.934^\circ\text{C}$

Количество теплоты необходимое для обжига известняка массой  $m = 446.429 \text{ кг}$

$$Q_{\text{обж}} = 2.922 \cdot 10^4 + 1.31 \cdot 10^6 = 1.192 \cdot 10^6 \text{ кДж}$$

Где  $2.922 \cdot 10^4$  кДжс – потери теплоты

Расход конверторного газа на обжиг известняка массой  $m = 446.429$  кг

$$V_{\text{дз}} = \frac{Q_{\text{обж}}}{Q_{\text{нр}}}$$

$$V_{\text{дз}} = \frac{1.192 \cdot 10^6}{12633} = 94.371 \text{ м}^3$$

Теплота на нагрев металла с помощью конверторного газа

$$Q_{\text{ме}} = c \cdot m \cdot \Delta t$$

Где  $c = 0.7 \frac{\text{кДжс}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ,  $m = 1000$  кг,  $\Delta t = 1200$  °С

$$Q_{\text{ме}} = 0.7 \cdot 1000 \cdot 1200 = 8.4 \cdot 10^5 \text{ кДжс}$$

Расход конвертерного газа на нагрев металла

$$V_{\text{ме}} = \frac{Q_{\text{ме}}}{Q_{\text{нр}}}$$

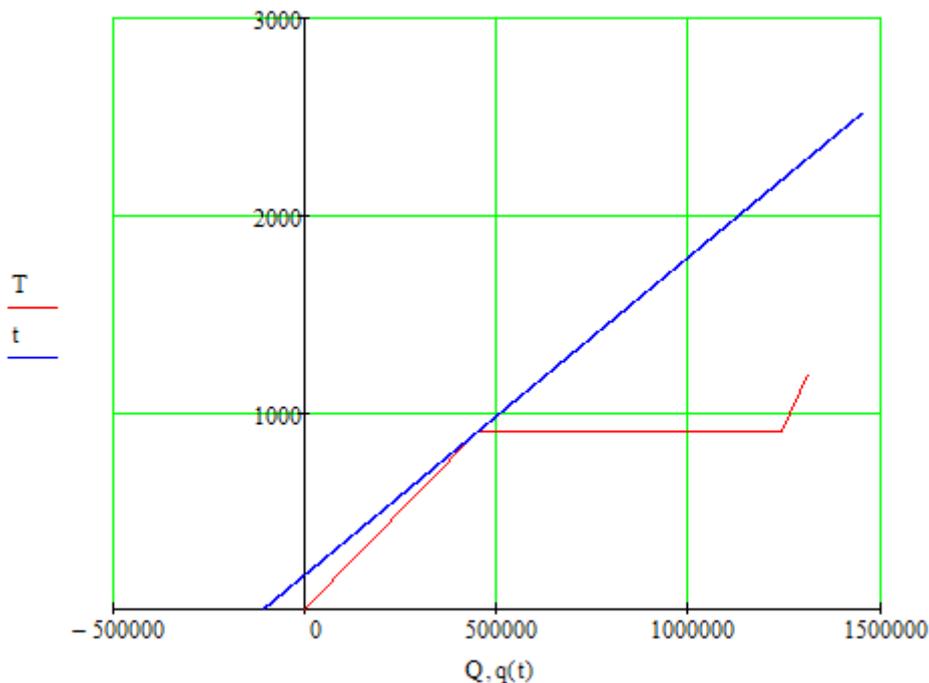
$$V_{\text{ме}} = \frac{8.4 \cdot 10^5}{12633} = 66.493 \text{ м}^3$$

Расчет производим на конвертированный газ (пароводяная конверсия природного газа)

$t_4 = 2290$  °С Температура горения конвертированный газа

$$Q_{\text{нр}} = 12173 \cdot 4 = 48690 \frac{\text{кДжс}}{\text{м}^3}$$

Строим график зависимости температуры от теплоты



По графику определили :

температуру уходящих газов  $T_{\text{уход}} = 174.912$  °С

Количество теплоты необходимое для обжига известняка массой  $m = 446.429$  кг

$$Q_{\text{обж}} = 1.084 \cdot 10^5 + 1.31 \cdot 10^6 = 1.42 \cdot 10^6 \text{ кДжс}$$

Где  $1.084 \cdot 10^5$  кДжс – потери теплоты

Расход конвертированного газа на обжиг известняка массой  $m = 446.429$  кг

$$V_{\text{дз}} = \frac{Q_{\text{обж}}}{Q_{\text{нр}}}$$

$$V_{\text{дз}} = \frac{1.42 \cdot 10^6}{48690} = 29.164 \text{ м}^3$$

Теплота на нагрев металла с помощью конвертированного газа

$$Q_{\text{ме}} = c \cdot m \cdot \Delta t$$

Где  $c = 0.7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ,  $m = 1000 \text{ кг}$ ,  $\Delta t = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_{\text{ме}} = 0.7 \cdot 1000 \cdot 1200 = 8.4 \cdot 10^5 \text{ кДж}$$

Расход конвертированного газа на нагрев металла

$$V_{\text{ме}} = \frac{Q_{\text{ме}}}{Q_{\text{нр}}}$$

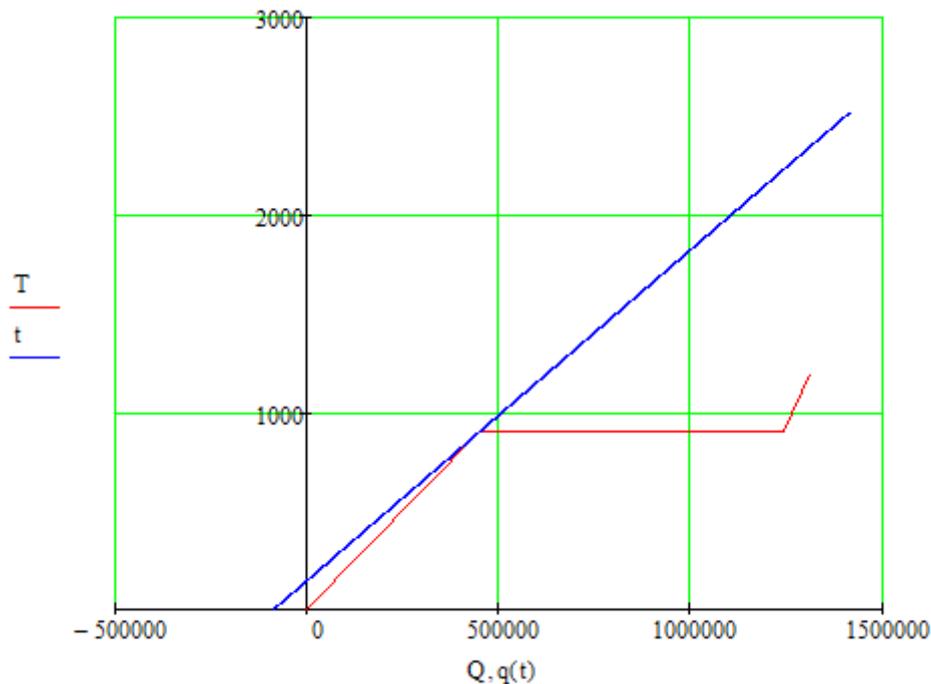
$$V_{\text{ме}} = \frac{8.4 \cdot 10^5}{48690} = 17.252 \text{ м}^3$$

Расчет производим на коксовый газ

$t_4 = 2345 \text{ }^\circ\text{C}$  Температура горения коксового газа

$$Q_{\text{нр}} = 17951 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$$

Строим график зависимости температуры от теплоты



По графику определили:

температуру уходящих газов  $T_{\text{уход}} = 146.222 \text{ }^\circ\text{C}$

Количество теплоты необходимое для обжига известняка массой  $m = 446.429 \text{ кг}$

$$Q_{\text{обж}} = 8.721 \cdot 10^5 + 1.31 \cdot 10^6 = 1.399 \cdot 10^6 \text{ кДж}$$

Где  $8.721 \cdot 10^5 \text{ кДж}$  – потери теплоты

Расход коксового газа на обжиг известняка массой  $m = 446.429 \text{ кг}$

$$V_{\text{дз}} = \frac{Q_{\text{обж}}}{Q_{\text{нр}}}$$

$$V_{\text{дз}} = \frac{1.399 \cdot 10^6}{17951} = 77.912 \text{ м}^3$$

Теплота на нагрев металла с помощью коксового газа

$$Q_{me} = c \cdot m \cdot \Delta t$$

Где  $c = 0.7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ,  $m = 1000 \text{ кг}$ ,  $\Delta t = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_{me} = 0.7 \cdot 1000 \cdot 1200 = 8.4 \cdot 10^5 \text{ кДж}$$

Расход коксового газа на нагрев металла

$$V_{me} = \frac{Q_{me}}{Q_{np}}$$

$$V_{me} = \frac{8.4 \cdot 10^5}{17951} = 46.794 \text{ м}^3$$

### Расчет общего электро- и паропотребления

Рассчитаем расход электроэнергии на привод (доменное дутье):

$$L_{\text{эз}} = 1.007 \cdot 10^5 \text{ Дж}$$

$$L_{\text{дом}} = \frac{L_{\text{эз}} \cdot 10^{-3}}{3600} = 0,028 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Рассчитаем расход электроэнергии на привод (производство кислорода):

$$L_{\text{эз2}} = 240000 \text{ Дж}$$

$$L_{\text{кис}} = \frac{L_{\text{эз2}} \cdot 10^{-3}}{3600} = 0,067 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

На электросталеплавильное производство:

Электродуговые печи потребляют  $700 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{т}$  стали

$$L_{\text{печей}} = 700 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{т} \text{ стали}$$

$\beta = 0,24$  – доля электростали

$$L_3 = L_{\text{печей}} \cdot \beta = 168 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{т}$$

На горячий и холодный прокат:

$$L_{\text{гор}} = 120 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{т}$$

$$L_{\text{хол}} = 150 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{т}$$

$$L_{\text{общ}} = L_{\text{гор}} + L_{\text{хол}} = 270 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{т}$$

Суммарные затраты электропотребления:

$$\sum \text{ЭЛ} = L_{\text{общ}} + L_3 + L_{\text{дом}} + L_{\text{кис}} = 438,095 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{т}$$

### Эффективность паротурбинного цикла

Дано:  $P_1 = 3 \text{ МПа}$

$P_2 = 9 \text{ МПа}$

$P_3 = 13 \text{ МПа}$

$P_4 = 23 \text{ МПа}$

$P_k = 4 \text{ МПа}$

$T_1 = 465$

$T_2 = 535$

$T_3 = 565$

$T_4 = 560$

$T_k = 28.96$  определена с помощью WaterSteamPro

С помощью WaterSteamPro определим энтальпии параметров 1-4

$H_1 = 3296.28 \text{ кДж/кг}$

$H_2 = 3474.86 \text{ кДж/кг}$

$$H_3 = 3519.53 \text{ кДж/кг}$$

$$H_4 = 3382.33 \text{ кДж/кг}$$

$$H_k = 2410 \text{ кДж/кг}$$

$$H_{k1} = 123.605 \text{ кДж/кг}$$

1 тут это 1000кг условного топлива по 29.309 МДж

Количество производимого перегретого водяного пара в котле:

$$m_1 = \frac{E}{H_1} = 8.892 \text{ кг}$$

$$m_2 = \frac{E}{H_2} = 8.435 \text{ кг}$$

$$m_3 = \frac{E}{H_3} = 8.328 \text{ кг}$$

$$m_4 = \frac{E}{H_4} = 8.665 \text{ кг}$$

$$m_k = \frac{E}{H_k} = 12.161 \text{ кг}$$

Эффективность цикла Ренкина

$$\eta = \frac{H_3 - 2004.6}{H_3 - H_k} = 0.466$$

Расход промышленных топлив на производство пара

$$c = 1.05 * 1.29 = 1.355$$

$$v = 1$$

$$T_1 - T_k = 406.04$$

$$Q_{необ} = c * v * (T_1 - T_k) = 549.981 \text{ кДж}$$

Для доменного газа

$$Q = 3562.344 \text{ кДж/м}^3$$

Расход

$$D = \frac{Q_{необ}}{Q_n} = \frac{549.981}{3562.344} = 0.154 \text{ м}^3$$

Для коксового газа

$$Q = 17951.492 \text{ кДж/м}^3$$

Расход

$$D = \frac{Q_{необ}}{Q_{нкс}} = \frac{549.981}{17951.492} = 0.031 \text{ м}^3$$

Для природного газа

$$Q = 35820.536 \text{ кДж/м}^3$$

Расход

$$D = \frac{Q_{необ}}{Q_{нп}} = \frac{549.981}{35820.536} = 0.015 \text{ м}^3$$

Для конвертерного газа

$$Q = 12633.036 \text{ кДж/м}^3$$

Расход

$$D = \frac{Q_{необ}}{Q_k} = \frac{549.981}{12633.036} = 0.044 \text{ м}^3$$

Для конвертированного газа

$$Q = 12173.536 \text{ кДж/м}^3$$

Расход

$$D = \frac{Q_{\text{необ}}}{Q_{\text{к}}} = \frac{549.981}{12173.536} = 0.045 \text{ м}^3$$

### Эффективность газотурбинного цикла

Для бинарного цикла ГТУ-ПТУ с котлом-утилизатором рассчитать:

4 базовые температуры цикла

удельную работу цикла

К.П.Д. цикла

Температура, данная по вариантам 1407

$$T_3 = 1407 + 273 = 1.68 * 10^3 \text{ К}$$

$$T_1 = 0 + 273 = 273 \text{ К}$$

$$T_1 = \sqrt{\frac{T_3}{T_1}} = 2.481 \text{ К}$$

$$T_2 = t_1 * T_1 = 677.23 \text{ К}$$

$$t_2 = T_2 - 273 = 404.23 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_4 = \frac{t_1 * t_3}{T_2} = 677.23 \text{ К}$$

$$t_4 = T_4 - 273 = 404.23 \text{ }^\circ\text{C}$$

Расход топлива на цикл

$$c = 1.05 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 * \text{К}}$$

$$Q_{\text{нд}} = 3533 \text{ кДж/м}^3$$

$$Q_1 = c * 1 * (t_3 - t_2) = 1.34 * 10^3 \text{ кДж}$$

$$D_{\text{д}} = \frac{Q_1}{Q_{\text{нд}}} = \frac{1.34 * 10^3}{3533} = 0.379 \text{ м}^3$$

КПД цикла

$$C_{\text{возд}}(t_1) = 1.281 + 1.453 * 10^{-4} * t - 1.798 * 10^{-8} * t^2 = 1.319$$

$$C_{\text{возд}}(T_2) = 1.281 + 1.453 * 10^{-4} * t - 1.798 * 10^{-8} * t^2 = 1.371$$

$$C_{\text{возд}}(t_3) = 1.281 + 1.453 * 10^{-4} * t - 1.798 * 10^{-8} * t^2 = 1.474$$

$$C_{\text{возд}}(t_4) = 1.281 + 1.453 * 10^{-4} * t - 1.798 * 10^{-8} * t^2 = 1.337$$

$$\eta = \frac{[(C_{\text{возд}}(t_3) * T_3 - C_{\text{возд}}(t_4) * t_4) - (C_{\text{возд}}(T_2) * T_2 - C_{\text{возд}}(t_1) * t_1)] * 100}{C_{\text{возд}}(t_3) * T_3 - C_{\text{возд}}(t_1) * t_1} = 46.55 \%$$

Работа цикла

$$\tau = \frac{T_2}{t_1} = 2.481$$

$$\theta = \frac{t_3}{t_1} = 6.154$$

$$L_{\text{гту}} = C_{\text{возд}}(t_1) * t_1 \frac{[(\tau - 1) * (\theta - \tau)]}{\tau} = 789.671 \text{ кДж}$$

### Эффективность парогазового цикла

ПГУ

Для бинарного цикла ГТУ-ПТУ с котлом-утилизатором рассчитать:

4 базовые температуры цикла

удельную работу цикла

К.П.Д. цикла

Температура данная по вариантам 1407

$$T_3 = 1407 + 273 = 1.68 \cdot 10^3 \text{ K}$$

$P = 4 \text{ МПа}$

$$T_1 = 0 + 273 = 273 \text{ K}$$

$$T_1 = \sqrt{\frac{T_3}{T_1}} = 2.481 \text{ K}$$

$$T_2 = t_1 * T_1 = 683.25 \text{ K}$$

$$T_4 = T_2 - 273 = 410.25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_4 = \frac{T_1 * T_3}{T_2} = 683.25 \text{ K}$$

Удельная работа цикла

$$L_{ггУ} = 664.281 \text{ кДж}$$

$$L_{нпу} = (3238.5 - 2004.6) * 0.166 = 204.827 \text{ кДж}$$

$$L_{неу} = L_{ггУ} + L_{нпу} = 869.108 \text{ кДж}$$

Расход топлива на цикл

$$c = 1.05 * 1.29 = 1.355 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 * \text{K}}$$

$$Q_1 = c * 1 * (T_3 - T_2) = 1390.733 \text{ кДж}$$

Для доменного газа

$$Q_{нд} = 3562.344 \text{ кДж/м}^3$$

Расход

$$D_{\delta} = \frac{Q_1}{Q_{нд}} = \frac{1390.733}{3562.344} = 0.39 \text{ м}^3$$

$$D_{\delta 1} = D_{\delta} * 438,095 = 170.857 \frac{\text{м}^3 * \text{кВт} * \text{ч}}{\text{т}}$$

Для коксового газа

$$Q_{нкс} = 17951.492 \text{ кДж/м}^3$$

Расход

$$D_{кс} = \frac{Q_1}{Q_{нкс}} = \frac{1390.733}{17951.492} = 0.077 \text{ м}^3$$

$$D_{кокс} = D_{кс} * 438,095 = 33,733 \frac{\text{м}^3 * \text{кВт} * \text{ч}}{\text{т}}$$

Для природного газа

$$Q_{нп} = 35820.536 \text{ кДж/м}^3$$

Расход

$$D_n = \frac{Q_1}{Q_{нп}} = \frac{1390.733}{35820.53} = 0.039 \text{ м}^3$$

$$D_{n1} = D_n * 438,095 = 17.086 \frac{\text{м}^3 * \text{кВт} * \text{ч}}{\text{т}}$$

Для конвертерного газа

$$Q_k = 12633.036 \text{ кДж/м}^3$$

Расход

$$D_k = \frac{Q_1}{Q_k} = \frac{1390.733}{12633.036} = 0.11 \text{ м}^3$$

$$D_{к1} = D_{к} * 438,095 = 48.19 \frac{M^3 * кВт * ч}{т}$$

Для конвертированного газа

$$Q_{нко} = 4.87 * 10^4 \text{ кДж/м}^3$$

Расход

$$D_{кв} = \frac{Q_1}{Q_{нко}} = \frac{1390.733}{4.87 * 10^4} = 0.029 M^3$$

$$D_{кон} = D_{кв} * 438,095 = 12.705 \frac{M^3 * кВт * ч}{т}$$

КПД цикла

$$\eta = \frac{L_{пг}}{Q_1} = 62,5 \%$$

### Расчет производства на ПГ

Рассчитать расходы топлива на нужды предприятия:  
 На производство электрической и тепловой энергии  
 На обжиг извести и нагрев металла

$$Q_{пр} = 35820.536 = 3,58205363 * 10^4 \text{ кДж/м}^3$$

Расход природного газа на производство электрической энергии в цикле ГТУ:

ГТУ=0,43

$$D_{гту} = \frac{L_{эп}}{Q_{н} * \eta_{гту}} = \frac{438,095 * 3600}{Q_{н} * 0,43} = 102,393 M^3$$

Расход природного газа смеси на производство электрической энергии в цикле ПТУ:

ПТУ=0,446

$$D_{пту} = \frac{L_{эп}}{Q_{н} * \eta_{пту}} = \frac{438,095 * 3600}{Q_{н} * 0,446} = 98.72 M^3$$

Расход природного газа смеси на производство электрической энергии в цикле ПГУ:

ПГУ=0,612

$$D_{пгу} = \frac{L_{эп}}{Q_{н} * \eta_{пгу}} = \frac{438,095 * 3600}{Q_{н} * 0,612} = 71.943 M^3$$

На нагрев 1000 кг стали перед горячей прокаткой:

$$D_{нагрев} = 21.133 M^3$$

Количество природного газа, которое потребуется для 446 кг обжига:

$$V_1 = 47.18 M^3$$

На Доменную печь:

$$D_{дом} = 100 M^3$$

На паровой привод:

$$V_{пг4} = \frac{744098022,748 * 10^{-3}}{35820} = 20,773 M^3$$

Общий расход природного газа на электрической и тепловой энергии:

$$D = D_{пгу} + D_{нагрев} + V_{пг4} + V_1 + D_{дом} = 260,989 M^3$$

### Расчет производства на коксо-доменной смеси

Расчет производства на коксо-доменной смеси 10/90%

Рассчитать расходы топлива на нужды предприятия:  
 На производство электрической и тепловой энергии  
 На обжиг извести и нагрев металла

$$Q_{н} = Q_{пгкок} * 0.1 + Q_{пгдо} = 17951.492 * 0.1 + 3562.344 * 0.9 = 5001 \text{ кДж/м}^3$$

Расход коксо- доменной смеси на производство электрической энергии в цикле ГТУ:  
ГТУ=0,43

$$D_{згт} = \frac{L_{эп}}{Q_n \cdot \eta_{згт}} = \frac{438,095 \cdot 3600}{Q_n \cdot 0,43} = 733,407 \text{ м}^3$$

Расход коксо- доменной смеси на производство электрической энергии в цикле ПТУ:  
ПТУ=0,446

$$D_{пт} = \frac{L_{эп}}{Q_n \cdot \eta_{пт}} = \frac{438,095 \cdot 3600}{Q_n \cdot 0,446} = 707,097 \text{ м}^3$$

Расход коксо- доменной смеси на производство электрической энергии в цикле ПГУ:  
ПГУ=0,612

$$D_{пг} = \frac{L_{эп}}{Q_n \cdot \eta_{пг}} = \frac{438,095 \cdot 3600}{Q_n \cdot 0,612} = 515,302 \text{ м}^3$$

На нагрев 1000 кг стали перед горячей прокаткой:

$$D_{нагр} = 216,92 \text{ м}^3$$

Количество коксо-доменного газа которое потребуется для 446 кг обжига:

$$V_1 = 762,825 \text{ м}^3$$

На Доменную печь:

$$D_{дом} = 100 \text{ м}^3$$

На паровой привод:

$$V_{пз4} = \frac{744098022,748 \cdot 10^{-3}}{5001} = 148,79 \text{ м}^3$$

Общий расход коксо-доменного газа на электрической и тепловой энергии:

$$D = D_{пг} + D_{нагр} + V_{пз4} + V_1 + D_{дом} = 1744 \text{ м}^3$$

### Расчет производства на конвертерном газе

На	Производство	расходы	топлива	на	нужды	предприятия:
На	обжиг		электрической	и	тепловой	энергии
			извести	и	нагрев	металла

$$Q_{пр} = 12633,036 = 1,263 \cdot 10^4 \text{ кДж/м}^3$$

Расход конвертерного газа на производство электрической энергии в цикле ГТУ:  
ГТУ=0,43

$$D_{згт} = \frac{L_{эп}}{Q_n \cdot \eta_{згт}} = \frac{438,095 \cdot 3600}{Q_n \cdot 0,43} = 290,332 \text{ м}^3$$

Расход конвертерного газа смеси на производство электрической энергии в цикле ПТУ:  
ПТУ=0,446

$$D_{пт} = \frac{L_{эп}}{Q_n \cdot \eta_{пт}} = \frac{438,095 \cdot 3600}{Q_n \cdot 0,446} = 279,916 \text{ м}^3$$

Расход конвертерного газа смеси на производство электрической энергии в цикле ПГУ:  
ПГУ=0,612

$$D_{пг} = \frac{L_{эп}}{Q_n \cdot \eta_{пг}} = \frac{438,095 \cdot 3600}{Q_n \cdot 0,612} = 203,991 \text{ м}^3$$

На нагрев 1000 кг стали перед горячей прокаткой:

$$D_{нагр} = 66,493 \text{ м}^3$$

Количество конвертерного газа, которое потребуется для 446 кг обжига:

$$V_1 = 94,371 \text{ м}^3$$

На Доменную печь:

$$D_{дом} = 100 \text{ м}^3$$

На паровой привод:

$$V_{пз4} = \frac{744098022,748 \cdot 10^{-3}}{12633} = 58,901 \text{ м}^3$$

Общий расход конвертерного газа на электрической и тепловой энергии:

$$D = D_{пзу} + D_{нагрев} + V_{пз4} + V_1 + D_{дом} = 523,756 \text{ м}^3$$

### Расчет производства на конвертированном газе

Рассчитать расходы топлива на нужды предприятия:  
 На производство электрической и тепловой энергии  
 На обжиг извести и нагрев металла

$$Q_{пр} \cdot 12173 \cdot 4 = 48690 \text{ кДж/м}^3$$

Расход конвертированного газа (пароводяная конверсия) на производство электрической энергии в цикле ГТУ:

$$\text{ГТУ} = 0,43$$

$$D_{гту} = \frac{L_{эн}}{Q_n \cdot \eta_{гту}} = \frac{438,095 \cdot 3600}{Q_n \cdot 0,43} = 75,329 \text{ м}^3$$

Расход конвертированного газа (пароводяная конверсия) смеси на производство электрической энергии в цикле ПГУ:

$$\text{ПГУ} = 0,446$$

$$D_{пгу} = \frac{L_{эн}}{Q_n \cdot \eta_{пгу}} = \frac{438,095 \cdot 3600}{Q_n \cdot 0,446} = 72,627 \text{ м}^3$$

Расход конвертированного газа (пароводяная конверсия) смеси на производство электрической энергии в цикле ПГУ:

$$\text{ПГУ} = 0,612$$

$$D_{пзу} = \frac{L_{эн}}{Q_n \cdot \eta_{пзу}} = \frac{438,095 \cdot 3600}{Q_n \cdot 0,612} = 52,927 \text{ м}^3$$

На нагрев 1000 кг стали перед горячей прокаткой:

$$D_{нагрев} = 17,252 \text{ м}^3$$

Количество конвертированного газа (пароводяная конверсия), которое потребуется для 446 кг обжига:

$$V_1 = 29,164 \text{ м}^3$$

На Доменную печь:  
 $D_{дом} = 100 \text{ м}^3$

На паровой привод:

$$V_{пз4} = \frac{744098022,748 \cdot 10^{-3}}{48690} = 15,282 \text{ м}^3$$

Общий расход конвертированного газа (пароводяная конверсия) на электрической и тепловой энергии:

$$D = D_{пзу} + D_{нагрев} + V_{пз4} + V_1 + D_{дом} = 214,625 \text{ м}^3$$

### Таблица с результатами расчетов

**Минимальная мощность ТЭС:** 
$$\frac{438,095 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}} \cdot 7,4 \cdot 10^6 \text{ т}}{8760 \text{ ч}} = 370,1 \text{ МВт}$$

Природного газа всего:

$$(102.3937.4) + (98.727.4) + (71.9437.4) + (21.1337.4) + (47.187.4) + (7.4 \cdot 100) + (20.737.4) = 3.42 \times 10^6 \text{ млн м}^3$$

Доменным газом (100-180 м<sup>3</sup>) можно погасить затраты:

$$\left(\frac{100-24}{100}\right) * 150 * 7,4 * 10^6 = 843,6 \text{ млн м}^3$$

Конвертерным газом (60-80 м<sup>3</sup>) можно погасить затраты:

$$\left(\frac{100-24}{100}\right) * 60 * 7,4 * 10^6 = 337,44 \text{ млн м}^3$$

Таким образом, природного газа потребуется 3420 млн м<sup>3</sup>, но можно сэкономить его, используя другие газы:

$$3420 - 843,6 - 337,44 = 2238,99 \text{ млн м}^3$$

	Высшая теплота сгорания, $\frac{Q_{ДЖ}}{M^3}$	Расход воздуха на горение, $M^3$	Точка росы продуктов сгорания, °C	Низшая теплота сгорания, $\frac{Q_{ДЖ}}{M^3}$	Температура горения, °C	расходы топлив на обжиг известняка, $M^3$	выход известия и $CO_2$ на 1 т проката, кг	Р эффективно сть цикла Ренкина с перегревом, %	расход промышленных топлив на производство 100 т пара, $M^3$	.кп.д . цикл а, %	Расход топлив на цикл, $M^3$	Расход на производство тепловой и электрической энергии, $M^3$	Количество газа, которое потребуется для 446 кг обжига $M^3$	Расход топлива в доменную печь, $M^3$	
Природный газ	39748,17	9,524	59,24	35820,536	2043,535	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Доменный газ	3648,1	0,693	40,28	3562,344	1419,062	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Коксовый газ	20280,579	4,41	64,47	17951,492	2326,104	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Конвертерный газ	12774,85	2,143	65,88	12633,033	2520,318	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Конвертированный газ	12664,833	2,381	57,31	12173,884	2484,256	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
РАСЧЕТЫ ОБЖИГА ИЗВЕСТИ НАГРЕВА МЕТАЛЛА И	-	-	-	-	-	Природный газ на 446,424 кг – 47,18 $M^3$ ; конвертерный на 446,424 кг – 94,371 $M^3$ ; конвертированный(пароводяная конверсия) на 446,424 кг – 24,164 $M^3$	CaO-250 кг, CO <sub>2</sub> -196,424	-	-	-	-	-	-	-	-
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАРОТУРБИННОГО ЦИКЛА	-	-	-	-	-	-	-	46,6	Доменный газ – 0,154 $M^3$ ; Коксовый – 0,31 $M^3$ ; Природный – 0,015 $M^3$ ; Конвертерный – 0,044 $M^3$ ; Конвертированный – 0,045 $M^3$	-	-	-	-	-	
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАРОГАЗОВОГО ЦИКЛА	-	-	-	-	-	-	-	-	-	62,5	Доменный газ – 0,39 $M^3$ ; Коксовый – 0,077 $M^3$ ; Природный – 0,039 $M^3$ ; Конвертерный – 0,11 $M^3$ ; Конвертированный – 0,029 $M^3$	-	-	-	
РАСЧЕТ ПРОИЗВОДСТВА НА ПГ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	260,989 $M^3$	47,18 $M^3$	100 $M^3$	
РАСЧЕТ ПРОИЗВОДСТВА НА КОКСО-ДОМЕННОЙ СМЕСИ 10/90%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1744 $M^3$	762,825 $M^3$	100 $M^3$	
РАСЧЕТ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	523,756 $M^3$	94,371 $M^3$	100 $M^3$	

ПРОИЗВОДСТВА НА КОНВЕРТЕРНОМ ГАЗЕ														
РАСЧЕТ ПРОИЗВОДСТВА НА КОНВЕРТИРОВАН НОМ ГАЗЕ (пароводяная конверсия)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	214,625 м <sup>3</sup>	29,164 м <sup>3</sup>	100 м <sup>3</sup>

