

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»  
Институт нефти и газа им. М. С Гуцериева  
Кафедра разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений

**ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**  
**РАЗДЕЛ ТЕРМОДИНАМИКА**  
Практикум

Текстовое электронное издание



Ижевск  
2022

**ISBN 978-5-4312-0979-6**

© Макаров С.С., сост., 2022  
© ФГБОУ ВО «Удмуртский  
государственный университет»

УДК 536(075.8)  
ББК 31.311я73-5  
Т352

*Рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом УдГУ*

**Рецензент:** д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник Т. М. Махнева

**Составитель:** Макаров С. С.

Т352 Термодинамика и теплопередача. Раздел Термодинамика : практикум : [Электронный ресурс]. – Электронное (символьное) издание (2,4Мб) – Ижевск : Удмуртский университет, 2022. – 1 электрон. опт. диск (CD-R).

Практикум предназначен для изучения дисциплины «Термодинамика и теплопередача». Он содержит анализ основных тем изучаемой дисциплины по разделу «Теплопередача», методические указания, практические задания, вопросы для самопроверки.

Практикум рекомендован для студентов, обучающихся по направлению подготовки 21.03.01 Нефтегазовое дело, (программы бакалавриата 21.03.01.01 «Эксплуатация и обслуживание объектов добычи нефти», 21.03.01.02 «Бурение нефтяных и газовых скважин», 21.03.01.05 «Сооружение и ремонт объектов и систем трубопроводного транспорта»), преподавателей и студентов технических факультетов вузов, учебными планами которых предусмотрено преподавание дисциплины.

**Минимальные системные требования:**

Процессор x64 с тактовой частотой 1,5 ГГц и выше; 1 Гб ОЗУ; WindowsXP/7/8/10; Монитор с разрешением 1920x1080, Видеокарта дискретная (128 bit), или встроенная; привод DVDROM. Программное обеспечение: Adobe Acrobat Reader версии 9 и старше.

**Термодинамика и теплопередача. Раздел Термодинамика  
Практикум**

**ISBN 978-5-4312-0979-6**

© Макаров С.С., сост., 2022  
© ФГБОУ ВО «Удмуртский  
государственный университет», 2022

---

Подписано к использованию 01.03.2022  
Объем электронного издания 2,4 Мб на 1 CD.  
Издательский центр «Удмуртский университет»  
426034, г. Ижевск, ул. Ломоносова, д. 4Б, каб. 021  
Тел. : +7(3412)916-364 E-mail: editorial@udsu.ru

---

## СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ .....	4
1	ТЕМЫ ИЗУЧАЕМОГО РАЗДЕЛА «ТЕРМОДИНАМИКА» КУРСА «ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА».....	5
2	ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ.....	15
2.1.	Задание № 1. Газовые смеси и теплоемкости. Параметры состояния. Уравнение состояния. ....	15
2.2.	Задание № 2. Термодинамические процессы идеальных газов. Первый закон термодинамики.....	23
2.3.	Задание № 3. Максимальная работа. Эксергия. Второй закон термодинамики. ....	27
2.4.	Задание № 4. Термодинамический анализ процессов в компрессорах.....	30
2.5	Задание № 5. Газовый цикл.....	36
2.6	Задание № 6. Истечение газа из сопла Лаваля.....	41
3	ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ .....	47
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	47
	СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	47
	ПРИЛОЖЕНИЕ.....	48

## ВВЕДЕНИЕ

Целью освоения дисциплины «Термодинамика и теплопередача» является формирование у обучающихся компетенций, необходимых для эффективного ознакомления с основополагающими принципами теории и расчета термодинамических параметров и процессов теплопередачи в теплотехнических объектах и системах; приобретение навыков расчета параметров термодинамических процессов и циклов тепловых машин, теплофизических параметров теплообменных аппаратов.

Практикум соответствует цели и задачам изучения дисциплины «Термодинамика и теплопередача», содержит методические указания по основным темам раздела «Термодинамика», практические задания: Газовые смеси и теплоемкости. Параметры состояния. Уравнение состояния. Термодинамические процессы идеальных газов. Первый закон термодинамики. Максимальная работа. Эксергия. Второй закон термодинамики. Термодинамический анализ процессов в компрессорах. Циклы двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установок. Истечение газа из сопла Лаваля. Вопросы для самопроверки и список рекомендованной литературы.

При выполнении работ необходимо получаемые результаты сопровождать кратким пояснительным текстом, в котором указывать, какая величина определяется, и по какой формуле. Какие величины подставляются в формулу (из условия задачи, из справочника или были определены выше и т.д.).

# 1. ТЕМЫ ИЗУЧАЕМОГО РАЗДЕЛА «ТЕРМОДИНАМИКА» КУРСА «ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА»

## Тема 1. Основные понятия и определения

Предмет технической термодинамики и ее метод. Термодинамическая система и ее виды. Рабочее тело и внешняя среда. Теплота и работа как формы энергетического взаимодействия внешней среды и рабочего тела. Основные параметры состояния рабочего тела. Термодинамический процесс. Равновесный и неравновесный процессы. Обратимый и необратимый процессы. Графическое изображение обратимых процессов в термодинамических диаграммах. Понятие о круговом обратимом процессе.

Идеальный газ. Уравнение состояния идеального газа. Смеси идеальных газов. Способы задания газовых смесей. Определение средней молярной массы и удельной газовой постоянной смеси. Парциальные давления и объемы.

### Методические указания

Техническая термодинамика – наука, изучающая взаимопревращения теплоты и работы и условия, при которых эти превращения совершаются наиболее эффективно. Она устанавливает взаимосвязь между тепловыми и механическими процессами, которые совершаются в тепловых и холодильных машинах, изучает процессы, происходящие в газах и парах, а также свойства этих тел при различных физических условиях.

Теоретическим фундаментом, на котором базируются все выводы технической термодинамики, являются первый и второй законы термодинамики, представляющие собой обобщение опыта познания человеком природы. Основная особенность метода термодинамики – логически последовательное применение аналитических выражений первого и второго законов термодинамики совместно с уравнением состояния рабочего тела, без использования каких-либо гипотез о внутреннем его строении. Этот метод оказывается эффективным как при теоретических выводах формул, так и при анализе работы различных тепловых и холодильных машин и установок. При изучении темы студент должен внимательно разобрать такие понятия, как термодинамическая система, рабочее тело и внешняя среда, равновесное и неравновесное состояния рабочего тела, термодинамический процесс.

Понять, что равновесное состояние рабочего тела, так же как равновесный и обратимый процессы, является научной абстракцией, как некоторые идеализированные модели реальных состояний и процессов. Реальные состояния и процессы приближаются к идеализированным при условии очень малых изменений параметров состояния и когда время между последовательными изменениями состояния достаточно велико. Однако именно введение этих идеализированных понятий позволило построить стройный математический аппарат термодинамики, позволяющий получать результаты, достаточно близкие к практике.

Для усвоения последующего материала необходимо уяснить, что теплота и работа представляют собой определенные формы передачи энергии –

тепловую и механическую, причем работа может переходить в теплоту, а теплота в работу.

Работа всегда полностью превращается в теплоту, в то время как переход теплоты в работу имеет определенные ограничения даже в идеальном процессе. Взаимное превращение теплоты и работы в тепловой машине осуществляется с помощью рабочего тела, которое благодаря тепловому и механическому воздействию должно обладать способностью значительно изменять свой объем. Поэтому в качестве рабочего тела в тепловых машинах используется газ или пар. Физическое состояние рабочего тела в термодинамике определяется тремя параметрами: абсолютным давлением  $p$ , удельным объемом  $v$  и абсолютной температурой  $T$ . Эти три параметра называются основными и связаны между собой уравнением состояния  $F(p, v, T) = 0$ . Независимые, т. е. выбираемые произвольно, – два любых параметра, а третий определяют из уравнения состояния. Например, если  $p$  и  $v$  – независимые параметры, то  $T = \varphi(p, v)$ , где  $\varphi(p, v)$  – функция, определяемая при решении уравнения состояния относительно зависимого параметра  $T$ .

Для понимания физической сути изучаемых закономерностей термодинамики и принципов работы различных теплотехнических устройств нужно овладеть принципом графического изображения любых процессов, включая круговые (циклы) в термодинамических диаграммах. Необходимо уяснить, что графически можно изобразить только равновесные обратимые процессы и циклы, которые совершаются рабочим телом.

Во всех теплотехнических установках, в которых в качестве рабочего тела используют газ, он считается идеальным, т. е. газом, состоящим из молекул – материальных точек, не имеющих размеров и между которыми отсутствуют силы взаимодействия (притяжения и отталкивания), кроме упругих соударений. Как известно из физики, такой газ подчиняется уравнению состояния Клапейрона, которое может быть записано для  $m$  кг газа  $pV = mRT$  и для 1 кг газа  $pv = RT$ , где  $v = V/m$  – удельный объем газа,  $\text{м}^3/\text{кг}$ .

Понятие идеального газа является научной абстракцией, моделью реального газа, дающей хорошую сходимость с практикой, когда состояние газа далеко от состояния сжижения. Применение этой модели позволяет построить достаточно простые аналитические зависимости термодинамики, применение которых к тепловым машинам дает, как правило, приемлемую сходимость с практикой.

Для насыщенного пара, т. е. для состояния, близкого к состоянию сжижения, модель идеального газа неприемлема. В этом случае приходится применять очень сложные модели и уравнения реальных газов, в которых учитывают собственные размеры молекул, а также силы взаимодействия между ними. Уясните получение уравнения состояния Клапейрона – Менделеева для 1 моля ( $\text{кмоль}$ ) идеального газа.

Важно понять различие между удельной газовой постоянной, принимающей определенное значение для каждого газа, и универсальной газовой постоянной, одинаковой для всех газов и равной

$R_{\mu} = 8,314$  кДж/(кмоль·К). Запомните связь между этими газовыми постоянными и уясните физический смысл каждой из них.

При изучении газовой смеси необходимо понять, что основным здесь является умение определять газовую постоянную смеси газов, заданной массовым и объемным составом. Знание газовой постоянной смеси позволяет при исследовании термодинамических процессов пользоваться уравнением Клапейрона так же, как и для отдельного газа. В этой теме раскрывается необходимый комплекс определений и понятий, на основе которых строится все дальнейшее изложение технической термодинамики.

**Литература:** [1], с. 5–20, 22–26, 28–32, 54–56.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Приведите определение термодинамической системы. 2. Что такое рабочее тело? 3. Какое число независимых параметров определяет состояние рабочего тела? Почему? 4. В чем состоит энергетическое воздействие внешней среды на рабочее тело? 5. Какой процесс называют термодинамическим? 6. Какие процессы называют обратимыми, а какие – необратимыми? 7. Какая разница между разомкнутым термодинамическим процессом и круговым (циклом)? 8. Какой газ называют идеальным? 9. Какие известны уравнения состояния идеального газа? 10. Что такое моль газа? Что называют нормальными физическими условиями? 11. Каково соотношение между удельной газовой постоянной и универсальной газовой постоянной и в каких единицах их выражают? 12. Как определяют газовую постоянную смеси идеальных газов, заданную массовыми долями? 13. Как определяют газовую постоянную смеси идеальных газов, заданную объемными долями?

### **Тема 2. Первый закон термодинамики**

Сущность первого закона термодинамики. Внутренняя энергия. Работа процесса. Графическое изображение работы в  $p$ - $v$ -диаграмме. Теплота процесса. Принцип эквивалентности теплоты и работы. Аналитическое выражение и формулировка первого закона термодинамики. Энтальпия. Теплоемкость газов. Средняя и истинная теплоемкости. Теплоемкость смеси идеальных газов. Применение первого закона термодинамики к идеальному газу. Теплоемкость идеального газа при постоянном давлении и постоянном объеме. Энтропия. Вычисление изменения энтропии идеальных газов.  $T$ - $s$ -диаграмма. Графическое изображение теплоты в диаграмме  $T$ - $s$ .

### **Методические указания**

Необходимо понять особенности применения в термодинамике общего закона сохранения и превращения энергии. Энергетические изменения, происходящие в термодинамической системе, определяют по изменению параметров рабочего тела, которое является объектом анализа.

Аналитическое выражение первого закона термодинамики имеет две формы:  $q = \Delta u + \int_{v_1}^{v_2} p dv$ ;  $q = \Delta i - \int_{p_1}^{p_2} v dp$ , где  $\Delta u, \Delta i$  - изменение внутренней энергии и энтальпии, соответственно.

Следует четко разобраться в разнице понятий «работа расширения» и «располагаемая работа» и уметь дать геометрическую интерпретацию их в  $pV$ -диаграмме.

Уясните принципиальную разницу между внутренней энергией, однозначно определяемой данным состоянием рабочего тела, а также работой и теплотой, которые появляются лишь при наличии процесса перехода рабочего тела из одного состояния в другое и, следовательно, зависят от характера этого процесса. Следует понять разницу между функцией состояния и функцией процесса.

При изучении темы вводится еще одна функция (параметр) состояния, которая называется энтропией. Этот параметр служит лишь для упрощения термодинамических расчетов, а главное, позволяет графически изобразить теплоту, участвующую в процессе, в  $Ts$ -диаграмме. Уясните, как из выражения  $ds=dq/T$  можно установить знак теплоты, участвующей в процессе. Знание этого вопроса поможет при пользовании  $Ts$ -диаграммой, на которой теплота  $q$  - это площадь под кривой процесса. В диаграмме  $Ts$  эта площадь определяет в масштабе количество теплоты, подведенной к рабочему телу (+) ( $ds>0$ ) или отведенной от него ( $-$ ) ( $ds<0$ ).

Уясните, почему для всех процессов, в которых рабочим телом является идеальный газ, всегда  $du=c_v dT$ ,  $adi=c_p dT$ .

**Литература:** [1], с. 45–78.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Что такое внутренняя энергия рабочего тела? 2. Что такое теплота и работа процесса? 3. В чем сущность первого закона термодинамики? 4. Что такое энтальпия и энтропия? В чем они выражаются? 5. В чем разница между функцией состояния и функцией процесса? 6. Как доказать на примере идеального газа, что энтальпия и энтропия являются функциями состояния? 7. Как графически изобразить работу и теплоту процесса? 8. Что такое теплоемкость? Какие существуют теплоемкости? 9. В чем разница между средней и истинной теплоемкостями? 10. Как вычислить теплоемкость смеси идеальных газов? 11. Каков физический смысл удельной газовой постоянной? В чем физический смысл уравнения Майера? 12. Как вычислить изменение энтропии идеального газа?

### **Тема 3. Второй закон термодинамики**

Круговые термодинамические процессы (циклы). Прямой и обратный (обратимый) циклы Карно. Обобщенный (регенеративный) цикл Карно. Сущность второго закона термодинамики и его основные формулировки. Аналитическое выражение второго закона термодинамики. Изменение энтропии изолированной термодинамической системы. Максимальная работа и понятие об эксергии.

### **Методические указания**

Непрерывное получение работы за счет подведения теплоты возможно только в цикле и невозможно в разомкнутом процессе. Поэтому тщательно изучите все вопросы, относящиеся к циклам, особенно к циклу Карно, который имеет большое значение в термодинамике. С его помощью выводят все

аналитические зависимости. Формула для к.п.д. цикла Карно, по существу, также является техническим выражением существа второго закона термодинамики в применении к тепловым машинам. Обратимый цикл Карно при выбранных температурах  $T_{max}$  горячего источника теплоты и  $T_{min}$  холодильника имеет наивысший термический к.п.д. среди любых других обратимых циклов. Первый закон термодинамики не устанавливает условий, при которых теплота в машине превращается в работу. Это легко уяснить из следующих рассуждений. Если применить уравнение первого закона термодинамики к циклу и проинтегрировать его по замкнутому контуру цикла, то получим  $q_u = \oint dq = \oint du + \oint dl_u = 0 + l_u = l_u$ , поскольку  $u$  – функция состояния. Отсюда следует, что теплота, подведенная к рабочему телу в цикле  $q_u$ , равна работе, полученной в результате совершения цикла  $l_u$ . Последнее может привести к неверному выводу о полном превращении теплоты в работу цикла, что равносильно возможности создания вечного двигателя второго рода. Это противоречие легко устранить с помощью понятия энтропии как функции состояния. Проинтегрировав выражение  $ds = dq/T$  по замкнутому контуру цикла, получим  $\oint ds = \oint dq/T = 0$ , так как  $s$  – функция состояния. Учитывая, что абсолютная температура  $T$  не может быть отрицательной, приходим к выводу, что интеграл  $\oint dq/T$  может быть равен нулю только в том случае, если на отдельных участках цикла будет неравенство  $dq < 0$ , т. е. будет осуществляться отвод теплоты. Следовательно, при совершении цикла наряду с подводом теплоты к рабочему телу ( $dq > 0$ ) обязательно должны быть процессы с отводом теплоты ( $dq < 0$ ). Именно это и означает, что подведенную к рабочему телу теплоту в цикле нельзя полностью превратить в работу.

Несмотря на наличие в литературе большого количества формулировок второго закона термодинамики, сущность этого закона сводится к двум положениям: теплота не может самопроизвольно переходить от холодного тела к горячему без затраты работы; для превращения теплоты в работу в периодически действующей машине необходимо наличие не менее двух источников теплоты: теплоотдатчика (горячего) и теплоприемника (холодного). При этом только часть теплоты, переданной телу от горячего источника, может быть превращена в работу, остальная часть должна быть отдана холодному источнику.

В отличие от первого закона термодинамики, являющегося абсолютным законом природы, справедливым как для макромира, так и для микромира, второй закон термодинамики таковым не является. Объясняется это тем, что он получен из наблюдений над объектами, имеющими конечные размеры в окружающих нас земных условиях, и не может произвольно распространяться как на бесконечную вселенную, так и на бесконечный микромир.

Если рассматривается изолированная система, состоящая из теплоотдатчика, рабочего тела, совершающего обратимый цикл Карно, и теплоприемника, то: а) в случае обратимых процессов передачи теплоты (т. е. при бесконечно малой разнице температур) от теплоотдатчика рабочему телу и от него теплоприемнику энтропия системы остается постоянной  $\Delta s_c = 0$ ; б) в случае, если один из процессов, например теплоотдача от источника к рабочему телу, протекает при конечной разнице температур, энтропия системы возрастает  $\Delta s_c > 0$ .

Независимо от обратимости процесса энтропия рабочего тела в цикле (как функция состояния) всегда остается неизменной  $\Delta s_{p,m} = 0$ .

Все реальные процессы являются необратимыми, поэтому энтропия изолированной системы, в которой протекают такие процессы, всегда возрастает ( $\Delta s_c > 0$ ). Возрастание энтропии в необратимых процессах само по себе ни о чем не говорит. Однако возрастание энтропии приводит к уменьшению работоспособности изолированной системы. Для количественной оценки потери работоспособности системы вводится понятие удельной эксергии, под которой понимают максимальную удельную работу, совершаемую системой при ее переходе от данного состояния до равновесия с окружающей средой. Следует понимать, почему потеря эксергии, ведущая к уменьшению работоспособности системы из-за необратимости процесса, определяется произведением наименьшей температуры системы на приращение энтропии.

**Литература:** [1], с. 96–123.

#### **Вопросы для самопроверки**

1. Что такое термодинамический цикл? 2. В чем состоит термическая и механическая необратимости процессов? 3. Что такое прямой и обратный (обратимые) циклы Карно? 4. Что называют термическим к.п.д. и холодильным коэффициентом произвольного цикла, чему они равны для цикла Карно? 5. Почему обратимый цикл Карно является самым эффективным среди других циклов, осуществляемых в заданном интервале температур? 6. В чем сущность второго закона термодинамики? Приведите основные формулировки этого закона. 7. Приведите аналитическое выражение второго закона термодинамики для обратимых и необратимых процессов. 8. Как изменяется энтропия изолированной системы при протекании в ней обратимых и необратимых процессов? 9. Что такое эксергия? 10. Чем определяется уменьшение работоспособности изолированной системы?

#### **Тема 4. Термодинамические процессы**

Общие вопросы исследования процессов изменения состояния любых рабочих тел. Термодинамические процессы идеальных газов. Политропные процессы. Уравнение политропы. Определение показателя политропы и теплоемкости политропного процесса. Основные термодинамические процессы: изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный как частные случаи политропного процесса. Изображение политропных процессов в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах. Отличие реального газа от идеального.

## Методические указания

В термодинамике переход рабочего тела из одного равновесного состояния в другое совершается в обратимом термодинамическом процессе. Задание начального и конечного состояний рабочего тела означает полное знание всех термодинамических параметров состояния начальной и конечной точек процесса. Основная задача исследования термодинамического процесса – определение теплоты  $q_{1-2}$ , участвующей в процессе, и работы изменения объема рабочего тела  $l_{1-2}$ . Такие величины, как изменение внутренней энергии  $\Delta u_{1-2}$ , энтальпии  $\Delta i_{1-2}$  и энтропии  $\Delta s_{1-2}$ , являются вспомогательными, служащими для решения основной задачи.

Общий метод исследования термодинамических процессов является универсальным, не зависящим от природы тела. Метод базируется на применении уравнения первого закона термодинамики, записанного в двух

$$\text{равнозначных формах: } q_{1-2} = \Delta u_{1-2} + \int_{v_1}^{v_2} p dv = \Delta i_{1-2} - \int_{p_1}^{p_2} v dp.$$

Решение основной задачи для идеального газа опирается на аналитические зависимости. Например, в случае изотермического процесса изменения  $1\text{кг}$  рабочего тела общими формулами будут:

$$\begin{aligned} q_{1-2} &= T\Delta s_{1-2} = T(s_2 - s_1), & l_{1-2} &= q_{1-2} - \Delta u_{1-2}. \\ \Delta s_{1-2} &= R \ln v_2 / v_1 = R \ln p_2 / p_1, & \Delta u_{1-2} &= 0, \\ q_{1-2} &= RT \ln v_2 / v_1 = RT \ln p_2 / p_1 = l_{1-2}, & . \end{aligned}$$

Уясните понятие политропного процесса, под которым понимается любой термодинамический процесс идеального газа с постоянной теплоемкостью (или показателем политропы  $n$  в этом процессе, общность политропного процесса, выраженного уравнением  $p v^n = \text{const}$ , получая из него уравнение известных основных процессов (изохорного, изобарного, изотермического и адиабатного). Разберитесь в определении показателя политропы и теплоемкости политропного процесса идеального газа как обобщающих величин, из которых получают частные значения для основных процессов. Научитесь изображать графически в  $p v$ - и  $T s$ -диаграммах как основные, так и общие политропные процессы.

**Литература:** [1], с. 33–35, 80–92, 162–178.

## Вопросы для самопроверки

1. Какие термодинамические процессы рабочего тела называют основными? 2. Изобразите в  $p v$ - и  $T s$ -диаграммах основные процессы идеального газа и приведите характеристику каждому из них. 3. Чему равен показатель политропы в основных процессах идеального газа? 4. Чему равна теплоемкость политропного процесса? 5. Какие группы политропных процессов вы знаете? Покажите их на  $p v$ - и  $T s$ -диаграммах. 6. В чем физический смысл отрицательной теплоемкости? 7. В чем принципиальное различие между

идеальным и реальным газами? 8. Изобразить процесс парообразования в  $p\nu$  - и  $Ts$ -диаграммах. 9. В чем сущность исследования термодинамических процессов любого рабочего тела? 10. Как определяют теплоту и работу изменения объема для основных термодинамических процессов идеального газа?

### **Тема 5. Термодинамический анализ процессов в компрессорах**

Назначение и классификация компрессоров. Техническая работа в компрессоре. Работа, затрачиваемая на привод компрессора. Изотермическое и политропное сжатие. Индикаторная диаграмма. Отличие индикаторной диаграммы действительного цикла от теоретического. Понятие о многоступенчатом сжатии. Изображение в  $p\nu$ - и  $Ts$ -диаграммах процессов в компрессорах для одно- и многоступенчатого сжатия. Определение эффективной мощности, затрачиваемой на привод компрессора, и понятие о внутреннем относительном к.п.д.

#### **Методические указания**

Из-за широкого распространения в промышленности компрессоров термодинамический анализ их работы имеет большое значение. Ознакомившись с конструктивной схемой и работой поршневых компрессоров, обратите внимание на то, что процессы всасывания и выталкивания, изображенные на индикаторной диаграмме горизонтальными линиями, нельзя рассматривать как изобарные, так как в этих процессах не происходит изменения состояния, а происходит изменение количества всасываемого или выталкиваемого рабочего тела. Уделите внимание изображению термодинамических процессов в  $p\nu$ - и  $Ts$ -диаграммах. Сравните изотермическое, адиабатное и политропное сжатие рабочего тела. В связи с применением высокого давления в некоторых технологических аппаратах разберите принципы работы многоступенчатых компрессоров.

**Литература:** [1], с. 217-228.

#### **Вопросы для самопроверки**

1. Каково назначение компрессоров? 2. Какова классификация компрессоров? 3. Каковы принципы действия поршневого компрессора и изображение работы компрессора в  $p\nu$ -диаграмме? 4. Какой процесс сжатия в поршневом компрессоре наиболее энергетически выгодный? 5. Можно ли получить газ высокого давления в одноступенчатом компрессоре? 6. Как определяют работу, затрачиваемую на привод компрессора? 7. Как определяют техническую работу компрессора? 8. Чем вызвано применение нескольких ступеней сжатия в многоступенчатом компрессоре?

### **Тема 6. Циклы двигателей внутреннего сгорания. Циклы газотурбинных установок**

Классификация поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Изображение циклов ДВС в  $p\nu$ - и  $Ts$  -диаграммах. Анализ и сравнение циклов поршневых двигателей внутреннего сгорания. Определение термического КПД и влияние параметров цикла ДВС на увеличение КПД Циклы газотурбинных установок. Цикл газотурбинной установки с подводом теплоты при постоянном давлении. Цикл газотурбинной установки с подводом теплоты при постоянном объеме. Изображение циклов в  $p\nu$ - и  $Ts$  диаграммах. Анализ и сравнение циклов

газотурбинных установок. Определение термического КПД и методы повышения к.п.д. газотурбинных установок. Методы анализа циклов теплоэнергетических установок.

### **Методические указания**

Термодинамический анализ циклов двигателей внутреннего сгорания проводится при допущении термодинамической обратимости процессов, составляющих цикл. Для простоты анализа циклов ДВС в качестве рабочего тела принимают идеальный газ с постоянной теплоемкостью. Разность температур между источником теплоты и рабочим телом считают бесконечно малой, а подвод теплоты к рабочему телу осуществляют от внешних источников теплоты, а не за счет сжигания топлива. Следует научиться анализировать различные циклы, пользуясь при этом  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммами. При рассмотрении действительных процессов обратите внимание на отличие индикаторных диаграмм от теоретического идеального цикла. Проанализируйте уравнение для определения термического КПД различных циклов и влияние основных параметров на термический КПД. При сравнении рассматриваемых циклов при одинаковых степенях сжатия следует помнить, что наиболее экономичным будет цикл с изохорным подводом теплоты. Если же сравнение производить при одинаковых максимальных давлениях и температурах, то максимальный КПД имеет цикл с изобарным подводом теплоты, а наименьший – цикл с изохорным подводом теплоты. При рассмотрении газотурбинных установок (ГТУ) обратите внимание на преимущества их перед поршневыми двигателями внутреннего сгорания. Уясните принцип работы газотурбинных установок, запомните схемы установок и научитесь анализировать их работу, используя  $pV$ - и  $Ts$  диаграммы. Поймите принцип получения уравнения термического КПД, внутреннего относительного КПД и эффективного КПД газотурбинных установок, обратите внимание на физический смысл этих понятий. Запомните, что при сравнении циклов ГТУ при различных степенях повышения давлений и одинаковых максимальных температурах наибольший КПД имеет цикл с изобарным подводом теплоты. Разберите методы повышения термического КПД и запомните, что регенерация теплоты, ступенчатое сжатие и ступенчатый подвод теплоты значительно повышают КПД газотурбинной установки, а идеальный цикл при этом приближается к обобщенному циклу Карно.

**Литература:** [1], с. 230–241, 244–254.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Приведите определение понятия «двигатель внутреннего сгорания».
2. Как классифицируют теоретические циклы двигателей внутреннего сгорания?
3. Изобразите тепловой процесс цикла ДВС с подводом теплоты при  $v = \text{const}$  в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах.
4. Как определить термический КПД цикла ДВС с подводом теплоты при  $v = \text{const}$ ?
5. Почему в циклах ДВС с подводом теплоты при  $v = \text{const}$  нельзя применять высокие степени сжатия?
6. Изобразите идеальный цикл двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $v = \text{const}$  в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах.
7. Как определить термический КПД цикла ДВС с подводом теплоты при  $p = \text{const}$ ?
8. Изобразите идеальный цикл двигателя

внутреннего сгорания со смешанным подводом теплоты в  $p\nu$ - и  $Ts$ -диаграммах. 9. Как определить термический КПД и полезную работу в цикле? 10. Почему термический КПД цикла ДВС при  $p = const$  больше, чем в цикле при  $\nu = const$ ? 11. Приведите принципиальную схему газотурбинной установки с подводом теплоты при  $\nu = const$ . Изобразите тепловой процесс в  $p\nu$ - и  $Ts$ -диаграммах. 12. Приведите принципиальную схему газотурбинной установки с подводом теплоты при  $p = const$ . Изобразите тепловой процесс в  $p\nu$  и  $Ts$  диаграммах. 13. Что называют внутренним относительным КПД газотурбинной установки и как его определяют? 14. Что называют эффективным КПД газотурбинной установки и как его определяют? 15. Назовите методы повышения термического КПД газотурбинной установки. 16. Приведите сравнительную характеристику газотурбинных установок.

### **Тема 7. Термодинамика потока. Истечение газа из сопла Лавалья**

Уравнение первого закона термодинамики для потока и его анализ. Адиабатное истечение. Скорость адиабатного истечения. Критическое отношение давлений. Расчет скорости истечения и секундного массового расхода для критического режима. Воздействие на поток геометрии канала. Сопло Лавалья. Влияние потерь на скорость истечения.

#### **Методические указания**

Разберите физический смысл отдельных членов уравнения первого закона термодинамики для потока. Уясните, за счет чего совершаются различные виды работ при течении рабочего тела, почему в суживающихся и цилиндрических каналах скорость потока не может превзойти скорости звука. Разберитесь как влияет профиль канала на скорость потока и проанализируйте изменение параметров рабочего тела при течении его по соплу Лавалья.

**Литература:** [1], с. 180-194, 197-204.

#### **Вопросы для самопроверки**

1. Какие допущения лежат в основе вывода уравнения первого закона термодинамики для потока? 2. Объясните физический смысл каждого члена уравнения первого закона термодинамики для потока. 3. На что расходуется работа расширения газа в потоке? 4. Что такое располагаемая работа, как показать ее на  $p\nu$ -диаграмме? 5. Что такое сопло и диффузор, критическая скорость, условия создания сверхзвуковой скорости?

## 2. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

### 2.1. Задание № 1. Газовые смеси и теплоемкости. Параметры состояния. Уравнение состояния

**Цель работы** Ознакомиться на практическом примере с методикой расчета основных параметров состояния термодинамической системы.

#### Методические указания к выполнению задания

Если смесь состоит из идеальных газов, то для неё справедливы все соотношения, полученные для идеального газа. Основным законом определяющим поведение газовой смеси, является закон Дальтона: полное давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений всех входящих в него компонентов:  $p = \sum_1^n p_i$ .

*Парциальное давление*  $p_i$  – давление, которое имел бы газ, если бы он один при той же температуре занимал весь объем смеси.

Состав газовой смеси может быть задан массовыми, объемными или молярными долями.

*Массовой долей* называется отношение массы отдельного компонента  $M_i$  к массе смеси  $M_{см}$ :  $g_i = \frac{M_i}{M_{см}}$ .

Очевидно, что  $\sum_1^n M_i = M_{см}$  и  $\sum_1^n g_i = 1$ .

*Объемная доля* представляет собой отношение приведенного объема газа  $V_i$  к полному объему смеси  $V_{см}$ :  $r_i = \frac{V_i}{V_{см}}$ .

*Приведенным* называется объем, который занимал бы компонент газа, если бы его давление и температура равнялась давлению и температуре смеси:

$$V_i = \frac{V_{pi}}{P_{см}}$$

Газовая постоянная смеси газов определяется по формуле:

$$R_{см} = \sum_i^n g_i \cdot R_i \quad R_{см} = 8,314 \sum_i^n \frac{g_i}{\mu_i}, \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Газовая постоянная компонента смеси выражается формулой:  $R_i = \frac{8,314}{\mu_i}$ .

Если ввести кажущейся молекулярную массу смеси  $\mu_{см}$  через массовые доли:

$$\mu_{см} = \frac{1}{\sum_1^n g_i / \mu_i},$$

то по формуле для  $R_{см}$  будет иметь вид:  $R_{см} = \frac{8,314}{\mu_{см}}$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

Кажущаяся молекулярная масса смеси может быть выражена через объемные доли:

$$\mu_{см} = \sum_1^n r_i \cdot \mu_i.$$

Соотношение между объемными и массовыми долями имеет вид:

$$g_i = \frac{r_i \cdot \mu_i}{\sum_1^n r_i \cdot \mu_i}, \quad r_i = \frac{g_i / \mu_i}{\sum_1^n g_i / \mu_i}$$

### Условия выполнения задания

Газовая смесь задана следующим образом: в вариантах с № 1 по 15 в объемных  $r_i$  долях с № 16 по 30 в массовых  $g_i$  долях, процентным составом компонентов смеси; давление смеси  $p_{см}$ , *бар*, объем смеси  $V_{см}$ ,  $\text{м}^3$ . Определить:

- состав смеси (если состав смеси задан в объемных долях, то представить его в массовых долях, если состав смеси задан в массовых долях, то представить его в объемных долях);

- газовые постоянные компонентов  $R_i$  и смеси  $R_{см}$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

- среднюю молярную массу смеси,  $\mu_{см}$ ,  $\text{кг}/\text{кмоль}$ , выраженную через объемные и массовые доли;

- парциальные давления компонентов  $p_i$ , выраженные через объемные  $r_i$  и массовые  $g_i$  доли;

- массу смеси  $m_{см}$ ,  $\text{кг}$  и ее компонентов  $m_i$ ,  $\text{кг}$ ;

- парциальные объемы  $V_i$ ,  $\text{м}^3$  и плотности  $\rho_i$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$  компонентов и смеси  $\rho_{см}$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

- истинную молярную  $c_{\mu}$ ,  $\text{кДж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К})$ , объемную  $c_v$ ,  $\text{кДж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$  и массовую  $c$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$  теплоемкости для  $p = \text{const}$ ,  $v = \text{const}$  при температуре смеси  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$ .

- среднюю молярную  $c_{\mu}$ ,  $\text{кДж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К})$ , объемную  $c_v$ ,  $\text{кДж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$  и массовую  $c$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$  теплоемкости в интервале температур  $t_1-t_2$ ,  $^{\circ}\text{C}$ .

- количество теплоты  $Q$ ,  $\text{кДж}$ , необходимое для нагрева (охлаждения)  $p = \text{const}$ , на интервале температур  $t_1-t_2$ ,  $^{\circ}\text{C}$  при для случаев, когда количество вещества смеси задано как: 2 моль, 5  $\text{м}^3$ , 7 кг.

Варианты заданий приведены в таблице 1.

Справочные данные, необходимые для решения задачи, приведены в таблицах П.1 - П.3, приложения.

Таблица. 1

## Варианты заданий

№	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Воздух	O <sub>2</sub>	p <sub>см</sub> , бар	V <sub>см</sub> , м <sup>3</sup>	t, °C	t <sub>1</sub> -t <sub>2</sub> , °C
1	12	-	-	75	8	-	5	1,0	3	2000	200-1000
2	10	-	2	80	-	-	8	0,95	2	450	300-100
3	-	5	15	70	10	-	-	0,9	4	500	100-300
4	13	-	-	75	6	-	6	1,05	5	150	600-200
5	-	10	30	50	10	-	-	1,05	6	200	1000-100
6	5	30	10	55	-	-	-	0,85	7	350	900-200
7	14	-	-	77	5	-	4	0,7	8	400	700-500
8	-	5	20	75	-	-	-	0,95	9	100	500-200
9	-	-	-	60	15	10	15	1,0	10	300	800-300
10	15	-	-	76	4	-	5	1,05	2	600	600-100
11	20	-	10	-	15	-	55	1,15	3	700	750-250
12	16	-	-	76	4	-	4	1,2	4	750	1000-500
13	8	5	2	85	-	-	-	1,25	5	700	300-1200
14	15	-	-	75	5	-	5	1,05	6	800	600-900
15	-	20	10	50	-	-	20	0,85	7	1000	1000-400
16	18	-	1	65	-	16	-	1,2	8	1200	850-350
17	-	15	-	45	15	-	25	1,0	9	1000	350-750
18	14	-	-	76	6	-	4	0,9	10	2000	900-600
19	-	2	25	65	-	8	-	1,0	2	450	450-300
20	-	10	-	70	-	15	5	1,05	3	350	300-150
21	10	-	-	75	5	-	10	1,05	4	600	800-300
22	-	5	10	80	-	-	5	1,0	5	550	400-300
23	17	-	-	74	5	-	4	0,95	6	400	800-300
24	10	10	20	60	-	-	-	1,15	7	1000	650-150
25	-	2	28	55	-	15	-	0,85	8	1000	150-1200
26	15	-	-	47	7	-	31	1,0	9	800	300-800
27	-	17	40	13	-	30	-	1,0	10	300	1200-900
28	12	-	-	75	5	-	8	0,9	2	500	400-900
29	-	8	15	62	-	15	-	0,95	3	1000	800-600
30	10	-	-	80	5	-	5	1,0	4	600	600-100

### Пример выполнения задания

В качестве исходных данных выберем из таблицы 1 исходные значения параметров варианта №1.

Смесь имеет следующий объемный состав:

$$CO_2 = 12\%; \quad r_{CO_2} = 0,12;$$

$$N_2 = 75\%; \quad r_{N_2} = 0,75;$$

$$H_2O = 8\%; \quad r_{H_2O} = 0,08;$$

$$O_2 = 5\%; \quad r_{O_2} = 0,05;$$

$$\text{Всего: } 100\% \quad \sum r_i = 1,0.$$

Давление смеси  $p_{см} = 1,0 \text{ бар}$ , объем смеси  $V_{см} = 3 \text{ м}^3$ , температура при которой определяется истинная теплоемкость  $t = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $T = 2273 \text{ K}$ ), интервал температур, для которого определяется средняя теплоемкость смеси  $t_1 - t_2 = 200 - 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $T_1 = 473 \text{ K}$ ;  $T_2 = 1273 \text{ K}$ ). Для всех вариантов  $T_{см} = 373 \text{ K}$ .

Молярная масса веществ, входящих в смесь (табл. П.1), кг/кмоль:

$$\mu_{CO_2} = 44; \quad \mu_{N_2} = 28; \quad \mu_{H_2O} = 18; \quad \mu_{O_2} = 32.$$

Состав смеси в массовых долях:

$$g_i = r_i \mu_i / (\sum r_i \mu_i);$$

$$g_{CO_2} = \frac{0,12 \cdot 44}{0,12 \cdot 44 + 0,75 \cdot 28 + 0,08 \cdot 18 + 0,05 \cdot 32} = \frac{5,28}{29,32} = 0,180;$$

$$g_{N_2} = 0,75 \cdot 28 / 29,32 = 0,716;$$

$$g_{H_2O} = 0,08 \cdot 18 / 29,32 = 0,049;$$

$$g_{O_2} = 0,05 \cdot 32 / 29,32 = 0,055;$$

$$\sum g_i = 1,000.$$

Для вариантов с № 16 по 30 формула перехода имеет вид:  $r_i = \frac{g_i}{\mu_i} / (\sum g_i / \mu_i)$ .

Газовые постоянные компонентов  $R_i$  смеси, кДж/(кг·К):

$$R_i = 8,314 / \mu_i;$$

$$R_{CO_2} = 8,314 / 44 = 0,189;$$

$$R_{N_2} = 8,314 / 28 = 0,297;$$

$$R_{H_2O} = 8,314 / 18 = 0,462;$$

$$R_{O_2} = 8,314 / 32 = 0,260.$$

Газовая постоянная смеси  $R_{см}$ , кДж/(кг·К):

$$R_{см} = \sum g_i R_i = 0,18 \cdot 0,189 + 0,716 \cdot 0,297 + 0,049 \cdot 0,462 + 0,055 \cdot 0,260 = 0,284.$$

Среднюю молярную массу смеси,  $\mu_{см}$ , кг/кмоль определим:

через объемные доли:

$$\mu_{см} = \sum r_i \mu_i = 0,12 \cdot 44 + 0,75 \cdot 28 + 0,08 \cdot 18 + 0,05 \cdot 32 = 29,32;$$

(проверка  $\mu_{см} = 8,314/R_{см} = 8,314/0,284 = 29,32$ ).

через массовые доли:

$$\mu_{см} = 1/\sum (g_i/\mu_i) = 1/\left(\frac{0,18}{44} + \frac{0,716}{28} + \frac{0,049}{18} + \frac{0,055}{32}\right) = 1/0,03413 = 29,32.$$

Парциальные давления компонентов  $p_i$ , бар:

через объемные  $r_i$  доли:

$$p_i = p_{см} r_i$$

$$p_{CO_2} = 1,0 \cdot 0,12 = 0,12;$$

$$p_{N_2} = 1,0 \cdot 0,75 = 0,75;$$

$$p_{H_2O} = 1,0 \cdot 0,08 = 0,08;$$

$$p_{O_2} = 1,0 \cdot 0,05 = 0,05;$$

$$\sum p_i = p_{см} = 1,0.$$

через массовые  $g_i$  доли:

$$p_i = p_{см} g_i R_i / R_{см};$$

$$p_{CO_2} = 1,0 \cdot 0,18 \cdot 0,189/0,284 = 0,12;$$

$$p_{N_2} = 1,0 \cdot 0,716 \cdot 0,297/0,284 = 0,75;$$

$$p_{H_2O} = 1,0 \cdot 0,049 \cdot 0,462/0,284 = 0,08;$$

$$p_{O_2} = 1,0 \cdot 0,055 \cdot 0,260/0,284 = 0,05;$$

$$\sum p_i = p_{см} = 1,0.$$

Масса смеси  $m_{см}$ , кг:

$$m_{см} = p_{см} V_{см} / (R_{см} T_{см}) = 1,0 \cdot 10^5 \cdot 3 / (0,284 \cdot 10^3 \cdot 373) = 2,83.$$

Масса компонентов  $m_i$  смеси, кг:

$$m_i = m_{см} g_i;$$

$$m_{CO_2} = 2,83 \cdot 0,18 = 0,51;$$

$$m_{N_2} = 2,83 \cdot 0,716 = 2,025;$$

$$m_{H_2O} = 2,83 \cdot 0,049 = 0,139;$$

$$m_{O_2} = 2,83 \cdot 0,055 = 0,156;$$

$$\sum m_i = m_{см} = 2,83.$$

Парциальные объемы  $V_i$  компонентов смеси,  $\text{м}^3$ :

$$\begin{aligned}V_i &= V_{см} r_i \\V_{CO_2} &= 3,0 \cdot 0,12 = 0,36 ; \\V_{N_2} &= 3,0 \cdot 0,75 = 2,25 ; \\V_{H_2O} &= 3,0 \cdot 0,08 = 0,24 ; \\V_{O_2} &= 3,0 \cdot 0,05 = 0,15 ; \\\sum V_i &= V_{см} = 3,00 .\end{aligned}$$

Протности  $\rho_i$  компонентов смеси,  $\text{кг}/\text{м}^3$ :

$$\begin{aligned}\rho_i &= m_i / V_i \\\rho_{CO_2} &= 0,51 / 0,36 = 1,417 ; \\\rho_{N_2} &= 2,025 / 2,25 = 0,9 ; \\\rho_{H_2O} &= 0,139 / 0,24 = 0,579 ; \\\rho_{O_2} &= 0,156 / 0,15 = 1,04 .\end{aligned}$$

Плотность смеси  $\rho_{см}$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ :

$$\rho_{см} = 1 / \sum (g_i / \rho_i) = 1 / \left( \frac{0,18}{1,417} + \frac{0,716}{0,9} + \frac{0,049}{0,579} + \frac{0,055}{1,04} \right) = 1 / 1,06 = 0,94 ;$$

(проверка  $\rho_{см} = m_{см} / V_{см} = 2,83 / 3,0 = 0,94$ ;

или  $\rho_{см} = p_{см} / (R_{см} T_{см}) = 10^5 / (0,284 \cdot 10^3 \cdot 373) = 0,94$  .

Истинная теплоемкость смеси для  $p = const$ ,  $v = const$ , при температуре  $t = 2000^\circ\text{C}$ . Величина  $c_p$  для каждого газа выбирается согласно табл. П.2, приложения:

молярная  $c_{\mu}$ ,  $\text{кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{K})$ :

$$\begin{aligned}\mu_{CO_2} c_{pCO_2} &= 44 \cdot 1,3783 = 60,65 ; \\\mu_{N_2} c_{pN_2} &= 28 \cdot 1,2979 = 36,3412 ; \\\mu_{H_2O} c_{pH_2O} &= 18 \cdot 2,9366 = 52,8588 ; \\\mu_{O_2} c_{pO_2} &= 32 \cdot 1,2004 = 38,4128\end{aligned}$$

$$\mu_{см} c_{pсм} = \sum r_i \mu_i c_{pi} ;$$

$$\mu_{см} c_{pсм} = 0,12 \cdot 60,65 + 0,75 \cdot 36,3412 + 0,08 \cdot 52,8588 + 0,05 \cdot 38,4128 = 40,48$$

$$\mu_{см} c_{vсм} = \mu_{см} c_{pсм} - 8,314 = 40,48 - 8,314 = 32,166 .$$

объемная  $c_v$ ,  $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ :

$V_1 = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$  – объем 1 кмоль любого газа;

$$c_{pсм}^* = \mu c_{pсм} / V_1 = 40,48 / 22,4 = 1,81;$$

$$c_{vсм}^* = \mu c_{vсм} / V_1 = 32,166 / 22,4 = 1,44;$$

массовая  $c$ ,  $[\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})]$ :

$$c_{pсм} = \mu c_{pсм} / \mu_{см} = 40,48 / 29,32 = 1,381;$$

$$c_{vсм} = \mu c_{vсм} / \mu_{см} = 32,166 / 29,32 = 1,097.$$

Средняя теплоемкость на интервале температур  $t_1 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_2 = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ :

мольная  $c_\mu$ ,  $\text{кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ . Величина  $c_p$  для каждого газа выбирается согласно табл. П.2, приложения:

$$\mu c_{pсм} \Big|_{t_1}^{t_2} = \left( \mu c_{pсм} \Big|_0^{t_2} - \mu c_{pсм} \Big|_0^{t_1} \right) / (t_2 - t_1),$$

$$\text{где } \mu c_{pсм} \Big|_0^t = \sum \mu_i c_{p_i} \Big|_0^t r_i;$$

$$\begin{aligned} \mu c_{pсм} \Big|_0^{1000} &= (44 \cdot 1,29 \cdot 0,12) + (28 \cdot 1,215 \cdot 0,75) \\ &+ (18 \cdot 2,4824 \cdot 0,08) + (32 \cdot 1,229 \cdot 0,05) = 37,8673 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu c_{pсм} \Big|_0^{200} &= 44 \cdot 0,9927 \cdot 0,12 + 28 \cdot 1,0517 \cdot 0,75 \\ &+ 18 \cdot 1,9406 \cdot 0,08 + 32 \cdot 0,9630 \cdot 0,05 = 31,6624 \end{aligned}$$

$$\mu c_{pсм} \Big|_{200}^{1000} = (37,8673 \cdot 1000 - 31,6624 \cdot 200) / (1000 - 200) = 39,4185;$$

$$\mu c_{vсм} \Big|_{200}^{1000} = \mu c_{pсм} \Big|_{200}^{1000} - 8,314 = 39,4185 - 8,314 = 31,1045.$$

объемная  $c_v$ ,  $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ :

$$c_{pсм}^* \Big|_{200}^{1000} = \mu c_{pсм} \Big|_{200}^{1000} / V_1 = 39,4185 / 22,4 = 1,7597;$$

$$c_{vсм}^* \Big|_{200}^{1000} = \mu c_{vсм} \Big|_{200}^{1000} / V_1 = 31,1045 / 22,4 = 1,3886;$$

массовая  $c$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ :

$$c_{pсм} \Big|_{200}^{1000} = \mu c_{pсм} \Big|_{200}^{1000} / \mu_{см} = 39,4185 / 29,32 = 1,3444;$$

$$c_{\text{всм}} \Big|_{200}^{1000} = \mu c_{\text{всм}} \Big|_{200}^{1000} / \mu_{\text{см}} = 31,1045 / 29,32 = 1,0608 .$$

Количество теплоты  $Q$ , кДж, необходимое для нагрева в интервале температур при  $p = const$ , на интервале температур от  $t_1 = 200^\circ\text{C}$ ; до  $t_2 = 1000^\circ\text{C}$ :

количество вещества смеси задано как 2 кмоль:

$$Q_1 = 2 \mu c_{\text{рсм}} \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = 2 \cdot 39,4185 \cdot (1000 - 200) = 63069,6;$$

количество вещества смеси задано как 5 м<sup>3</sup>:

$$Q_2 = 5 c_{\text{рсм}}^* \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = 5 \cdot 1,7597 \cdot (1000 - 200) = 7038,8;$$

количество вещества смеси задано как 7 кг:

$$Q_3 = 7 c_{\text{рсм}} \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = 7 \cdot 1,3444 \cdot (1000 - 200) = 7528,64 .$$

**Сделать заключение по работе.**

## 2.2. Задание № 2. Термодинамические процессы идеальных газов. Первый закон термодинамики

**Цель работы** Ознакомиться на практическом примере с методикой расчета параметров термодинамического процесса идеального газа.

### Методические указания к выполнению задания

Из первого закона термодинамики следует, что каждая термодинамическая система обладает внутренней энергией. Эта функция состояния возрастает на величину подведенной теплоты и убывает на величину совершенной системой внешней работы.

В общем случае аналитическая запись первого закона для закрытых систем имеет вид:

$$\delta Q = dU + \delta L, \text{ Дж.}$$

Возможны частные случаи, когда:

- $\delta Q = 0$ , то  $\delta L = -dU$ , без подвода теплоты от среды работа совершается телом за счет уменьшения его внутренней энергии.
- $\delta L = 0$ , то  $\delta Q = dU$ , вся подведенная от среды теплота затрачивается на увеличение внутренней энергии тела.
- $dU = 0$ , то  $\delta Q = \delta L$ , вся подведенная теплота от среды, затрачивается на совершение телом работы.

Для удельных величин уравнение примет вид:

$$dq = du + dl, \text{ Дж/кг.}$$

*Политропный процесс* – термодинамический процесс изменения состояния физической системы, в течение которого сохраняется постоянство теплоемкости. Уравнение политропного процесса имеет вид:  $pv^n = const$ .

Политропный процесс обобщает всю совокупность основных термодинамических процессов.

Процесс	$n$	$c_n$
изохорный $dv = 0$	$\infty$	$c_v$
изобарный $dp = 0$	0	$c_p$
изотермический $dT = 0$	1	$\infty$
адиабатный $dq = 0$	$k$	0

Давления обратно пропорциональны объемам в степени  $n$ :  $\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n$

Коэффициент политропы  $n = \frac{(c - c_p)}{(c - c_v)}$ , считается для отдельно взятого процесса

величиной постоянной  $n = const$ , значение которой могут изменяться  $\pm \infty$ .

При известных параметрах состояния:  $n = \frac{\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}{\ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right)}$ .

Работа расширения в политропном процессе:

$$l_{1-2} = \int_{v_1}^{v_2} p dv = \int_{v_1}^{v_2} p_1 v_1^n \frac{dv}{v^n} = p_1 v_1^n \frac{1}{n-1} \left( \frac{v_1}{v_1^n} - \frac{v_2}{v_2^n} \right)$$

$$\frac{1}{n-1} \left( p_1 v_1 - p_1 v_2 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^n \right) = \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$$

Используя уравнение состояния  $p v = R T$  и соотношения:

$$\left( \frac{p_2}{p_1} \right) = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^n; \left( \frac{v_2}{v_1} \right) = \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{n}}; \left( \frac{T_2}{T_1} \right) = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1}; \left( \frac{T_2}{T_1} \right) = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}},$$

аналогично, приведенные соотношения для работы расширения в адиабатном процессе:

$$l_{1-2} = \frac{1}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) = \frac{R}{k-1} (T_2 - T_1) = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \right],$$

где  $k = c_p / c_v$  - коэффициент адиабаты.

Изменение внутренней энергии в политропном процессе:  $du = c_v dT$

При  $c_v = const$  для двух значений температур ( $T_1$  и  $T_2$ ):

$$u_{1-2} = u_2 - u_1 = c_v T_2 - c_v T_1, \text{ Дж/кг}$$

Изменение энтальпии в политропном процессе:

$$di = c_p dT$$

При  $c_p = const$  для двух значений температур ( $T_1$  и  $T_2$ ):

$$i_{1-2} = i_2 - i_1 = c_p T_2 - c_p T_1, \text{ Дж/кг.}$$

Количество теплоты в политропном процессе:

$$\delta q = \int_{T_1}^{T_2} c_n dT$$

При  $c_n = c_v \frac{k-n}{1-n}$  и для двух значений температур ( $T_1$  и  $T_2$ ):

$$q_{1-2} = c_v \frac{k-n}{1-n} (T_2 - T_1), \text{ Дж/кг.}$$

Изменение энтропии в политропном процессе:

$$ds = q_{1-2} / T = 0.$$

Энтропия в политропном процессе определится по зависимости:

$$\Delta s_{1-2} = s_2 - s_1 = q_{1-2} / T_2 - q_{1-2} / T_1, \text{ кДж/(кг·К).}$$

### Условия выполнения задания

Газ, массой  $m$ , кг, при начальном давлении  $p_1$ , МПа и начальной температуре  $t_1$ , °С, расширяется по политропе до конечного давления  $p_2$ , МПа и конечной температуры  $t_2$ , °С. Определить начальный  $V_1$ , м<sup>3</sup> и конечный  $V_2$ , м<sup>3</sup> объемы, показатель политропы  $n$ , работу расширения  $L_{1-2}$ , Дж, изменение внутренней энергии  $\Delta U_{1-2}$ , Дж, количество подведенной теплоты  $Q_{1-2}$ , Дж, и изменение удельной энтальпии  $\Delta i_{1-2}$ , кДж/кг, энтропии  $s_{1-2}$ , кДж/(кг·К). Варианты заданий приведены в таблице 2.

Таблица. 2

### Варианты заданий

№	Газ	$m$ , кг	$p_1$ , МПа	$p_2$ , МПа	$t_1$ , °С	$t_2$ , °С
1	$O_2$	5	2,0	0,1	427	27
2	воздух	4,5	1,5	0,2	405	15
3	$H_2O$	2,2	1,2	0,15	320	20
4	$N_2$	1,5	1,3	0,11	380	80
5	$CO$	3,0	1,6	0,12	450	50
6	$CO_2$	4,0	1,0	0,2	430	20
7	воздух	2,1	1,1	0,1	427	27
8	$O_2$	3,5	1,5	0,2	405	15
9	$H_2O$	2,4	1,2	0,15	320	20
10	$SO_2$	4,2	1,3	0,11	380	80
11	$CO$	5,1	1,6	0,12	450	50
12	$CO_2$	1,5	1,0	0,2	430	20
13	$N_2$	3,0	1,5	0,1	421	21
14	$SO_2$	4,0	1,1	0,1	427	27
15	$O_2$	2,1	1,5	0,2	405	15
16	$H_2O$	3,5	1,2	0,15	320	20
17	$N_2$	3,5	1,3	0,11	380	80
18	$CO$	2,4	1,6	0,12	450	50
19	$CO_2$	4,2	1,0	0,2	430	20
20	воздух	5,1	1,1	0,1	427	27
21	$O_2$	1,5	1,5	0,2	405	15
22	$SO_2$	3,0	1,2	0,15	320	20
23	$N_2$	2,1	1,3	0,11	380	80
24	$CO$	3,5	1,6	0,12	450	50
25	$CO_2$	3,5	1,0	0,2	430	20
26	воздух	2,4	1,1	0,1	427	27
27	$SO_2$	4,2	1,5	0,2	405	15
28	$H_2O$	5,1	1,2	0,15	320	20
29	$N_2$	3,8	1,3	0,11	380	80
30	$CO$	2,6	1,6	0,12	450	50

### Пример выполнения задания

В качестве исходных данных выберем из таблицы 2 исходные значения параметров варианта №1.

Рабочий газ – кислород  $O_2$ .

Масса  $m=5$  кг.

Начальное давление  $p_1=2,0$  МПа.

Начальная температура  $t_1=427$  °С ( $T_1=700$  К).

Конечное давление  $p_2=0,1$  МПа.

Конечная температура  $t_2=27$  °С ( $T_2=300$  К).

Молярная масса  $\mu_{O_2}=32$  кг/кмоль.

Универсальная газовая постоянная кислорода :

$$R_{O_2} = 8,314/32 = 0,260 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}) = 260 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Начальный объем находим из уравнения состояния:

$$V_1 = mR_{O_2} T_1 / p_1 \quad V_1 = 5 \cdot 260 \cdot (427 + 273) / 2 \cdot 10^6 = 0,452 \text{ м}^3.$$

Показатель политропы находим из уравнения  $\frac{n-1}{n} = \frac{\lg(T_2/T_1)}{\lg(p_2/p_1)}$ :

$$\frac{n-1}{n} = \frac{\lg(300/700)}{\lg(10^5/2 \cdot 10^6)}, \text{ откуда } n=1,39.$$

Конечный объем находим по уравнению политропы  $p_2/p_1 = (V_1/V_2)^n$ :

$$V_2 = V_1 / (p_2/p_1)^{1/n} = 0,452 / (10^5/2 \cdot 10^6)^{1/1,39} = 3,9 \text{ м}^3.$$

Работу расширения определим по формуле  $L_{1-2} = [mR(T_1 - T_2)] / (n - 1)$ :

$$L_{1-2} = [5 \cdot 260 \cdot (700 - 300)] / (1,39 - 1) = 1334 \text{ кДж}.$$

Изменение внутренней энергии определяем по средним теплоемкостям, что

дает более точный результат  $U_2 - U_1 = m [c_v|_0^{t_2} t_2 - c_v|_0^{t_1} t_1]$ :

$$U_2 - U_1 = 5 [0,6560 \cdot 27 - 0,709 \cdot 427] = -1424 \text{ кДж}.$$

Соответственно удельное значение составит:  $u_{1-2} = -284,5$  кДж/кг.

Количество подведенной теплоты  $Q_{1-2} = [\Delta U_{1-2} (n - k)] / (n - 1)$ ;

показатель адиабаты  $k = \Delta i_{1-2} / \Delta u_{1-2}$ ;

изменение энтальпии  $\Delta i_{1-2} = (c_p|_0^{t_2} t_2 - c_p|_0^{t_1} t_1)$ ;

$$\Delta i_{1-2} = (0,9199 \cdot 27) - (0,9698 \cdot 427) = -389 \text{ кДж}/\text{кг};$$

$k = -389 / -284,5 = 1,365$ ;  $Q_{1-2} = [-1424 \cdot (1,39 - 1,365)] / (1,39 - 1) = -91$  кДж.

Проверяем, выполняется ли первый закон термодинамики для нашего

политропного процесса  $Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} + L_{1-2}$ :  $Q_{1-2} = -1424 + 1334 = -90$  кДж.

Погрешность в расчете допустима и составляет 0,2 кДж/кг.

Изменение энтропии определяем как  $\Delta s_{1-2} = s_2 - s_1 = (c_v \ln T_2/T_1) + (R \ln v_2/v_1)$

$$\Delta s_{1-2} = (0,716 \cdot 2,3 \lg(300/700)) + (0,260 \cdot 2,3 \lg(3,9/0,452)) = -0,0047 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

**Сделать заключение по работе.**

### 2.3. Задание № 3. Максимальная работа. Эксергия. Второй закон термодинамики

**Цель работы** Ознакомиться на практическом примере с методикой расчета термодинамических параметров при работе энергетического оборудования.

#### Методические указания к выполнению задания

*Второе начало термодинамики* отражает качественную сторону процессов и устанавливает их направленность. Этот закон утверждает: «Невозможен процесс, имеющим единственным своим результатом полное превращение теплоты в работу». Из этого закона следует, что невозможно создать вечный двигатель второго рода, в котором теплота полностью превращается в работу. Этот закон отражает принцип существования таких понятий как: абсолютная температура, энтропия, принцип возрастания энтропии.

*Энтропия* – это параметр состояния, изменение которого происходит при обмене энергией в форме теплоты. Энтропию нельзя измерить каким-либо прибором, как и внутреннюю энергию. Принцип существования энтропии используется при анализе обратимых (равновесных) процессов и состоит в утверждении или обосновании существования энтропии как функции состояния. Он гласит: «Для каждой термодинамической системы существует функция состояния (энтропия), изменение которой происходит под действием энергии, подводимой или отводимой в форме теплоты». Для обратимых процессов уравнение запишется в виде:

$$dS_{об} = \frac{dQ}{T}, \text{ Дж/К}, \quad ds_{об} = \frac{dq}{T}, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Принцип возрастания энтропии используется при анализе необратимых (реальных) процессов. Для необратимых процессов:

$$dS_{необ} = \frac{dQ}{T} + \frac{dQ_r}{T},$$

здесь  $dQ$  – элементарное количество теплоты при внешнем теплообмене,  $dQ_r$  – элементарное количество теплоты, обусловленное необратимостью (реальностью) процесса. В любом необратимом процессе величина  $dQ_r > 0$ .

Общее уравнение второго закона термодинамики примет вид:

$$dS_{необ} \geq \frac{dQ}{T}.$$

Второй закон термодинамики не позволяет определить меру необратимости  $dQ_r/T$ , не противоречит закону сохранения энергии, как для обратимых, так и необратимых процессов. Он определяет одностороннюю направленность самопроизвольных необратимых процессов превращения энергии.

### Условия выполнения задания

Определить эксергетический КПД  $\eta_e$  котельной установки, если известно, что температура продуктов сгорания в топке равна  $t_1$ , °С, а теплотворная способность топочного мазута  $Q$ , кДж/кг. В котельной установке вырабатывается пар с температурой  $t_2$ , °С. Температура окружающей среды  $t_0$ , °С. Варианты заданий приведены в таблице 3.

Таблица. 3

#### Варианты заданий

№	$t_1$ , °С	$Q$ , кДж/кг	$t_2$ , °С	$t_0$ , °С
1	1827	42000	557	27
2	1500	40000	550	25
3	1660	35500	560	26
4	1750	41500	570	25
5	1550	36800	540	23
6	1800	41000	535	24
7	1900	41300	545	21
8	1850	38500	560	20
9	1500	40000	550	25
10	1660	35500	560	26
11	1750	41500	570	25
12	1550	36800	540	23
13	1800	41000	535	24
14	1900	41300	545	21
15	1850	38500	560	20
16	1550	36800	540	23
17	1800	41000	535	24
18	1900	41300	545	21
19	1850	38500	560	20
20	1500	40000	550	25
21	1660	35500	560	26
22	1750	41500	570	25
23	1900	41300	545	21
24	1850	38500	560	20
25	1550	36800	540	23
26	1800	41000	535	24
27	1900	41300	545	21
28	1750	43000	543	24
29	1830	45000	542	26
30	1860	41600	538	28

### Пример выполнения задания

В качестве исходных данных выберем из таблицы 3 исходные значения параметров варианта №1.

Температура продуктов сгорания в топке равна  $t_1=1827\text{ }^\circ\text{C}$  ( $T_1=2100\text{K}$ ).

Теплотворная способность топочного мазута  $Q=42000\text{ кДж/кг}$ .

Температура пара  $t_2=557\text{ }^\circ\text{C}$  ( $T_2=830\text{K}$ ).

Температура окружающей среды  $t_0=27\text{ }^\circ\text{C}$  ( $T_0=300\text{K}$ ).

Эксергия теплоты продуктов сгорания топлива определится:

$$e_1 = Q(1 - T_0/T_1) = 42000 \cdot (1 - 300/2100) = 35990\text{ кДж/кг}.$$

Эксергия теплоты полученного пара:

$$e_2 = Q(1 - T_0/T_2) = 42000 \cdot (1 - 300/830) = 26840\text{ кДж/кг}.$$

Потеря эксергии на 1 кг израсходованного топлива:

$$\Delta e = e_1 - e_2 = 35990 - 26840 = 9150\text{ кДж/кг}.$$

Так же потерю эксергии можно определить по уравнению Гюи-Стодолы:

$$\Delta e = T_0 \Delta s = T_0 [Q/T_2 - Q/T_1] = 300(42000/830 - 42000/2100) = 9150\text{ кДж/кг}.$$

Эксергетический КПД котельной установки без тепловых потерь:

$$\eta_e = 1 - \Delta e/e_1 = 1 - 9150/35990 = 0,747 = 74,7\%.$$

**Сделать заключение по работе.**

## 2.4. Задание № 4. Термодинамический анализ процессов в компрессорах

**Цель работы** Ознакомиться на практическом примере с методикой расчета термодинамических параметров при работе поршневого компрессора.

### Методические указания к выполнению задания

Схема одноступенчатого поршневого компрессора (а) и его индикаторная диаграмма (б) приведена на рис. 1.

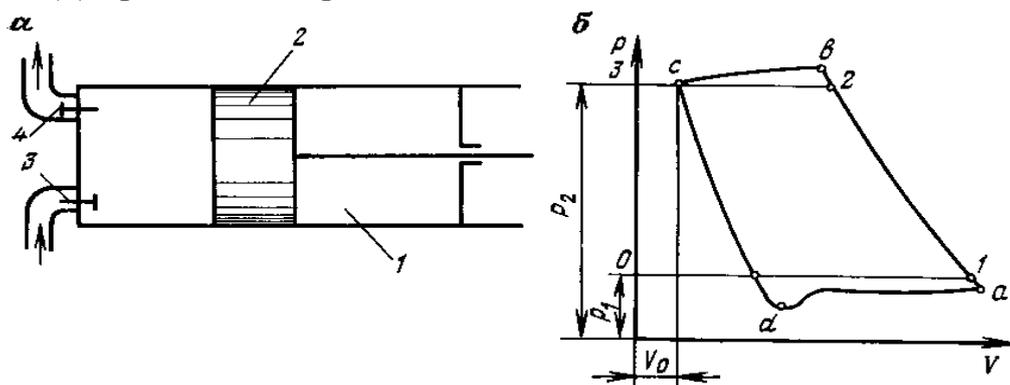


Рис. 1. Схема одноступенчатого поршневого компрессора (а) и его индикаторная диаграмма (б)

Поршень 2 совершает возвратно-поступательные движения в цилиндре 1, при чем при движении с лева на право открывается всасывающий клапан 3 и полость цилиндра заполняется газом (в теоретическом цикле на индикаторной диаграмме кривая 0-1 при постоянном давлении  $p_1$ ).

При обратном движении поршень сжимает газ в цилиндре (в теоретическом цикле на индикаторной диаграмме кривая 1-2 до давления  $p_2$ ). При заданном давлении открывается нагнетательный клапан 4, и поршень выталкивает газ в нагнетательную линию трубопровода (в теоретическом цикле кривая 2-3). Перед новым ходом поршня давление в цилиндре теоретически мгновенно снижается от  $p_2$  до  $p_1$  линия 3-0. Полученная индикаторная диаграмма 0-1-2-3-0 является теоретической индикаторной диаграммой поршневого компрессора, в которой не учитывается вредное пространство и потери давления при прохождении газа через клапаны (трение) и т.д.

Действительная индикаторная диаграмма поршневого компрессора  $d-a-b-c-d$  отображает реально протекающий процесс работы компрессора. Из-за наличия вредного пространства - объема пространства компрессора, который образуется в связи с тем, что поршень не может доходить в левом крайнем положении до крышки цилиндра, процесс падения давления происходит не мгновенно, а по кривой  $c-d$ , следовательно, всасывающий клапан открывается при меньшем давлении (точка  $d$ ).

Те же изменения относятся и к нагнетательному клапану, который реально открывается при большем давлении (точка  $b$ ).

С целью получения газа высокого давления применяют многоступенчатое сжатие. В современных поршневых компрессорах степень повышения давления одной степени  $\varepsilon \approx 4$ . При более высоком компримировании применяют промежуточное охлаждение газа. На рис. 2 приведена схема трехступенчатого поршневого компрессора с двумя промежуточными охладителями газа. Предельное значение определяют исходя из требований предупреждения воспламенения паров смазочного масла в цилиндре компрессора.

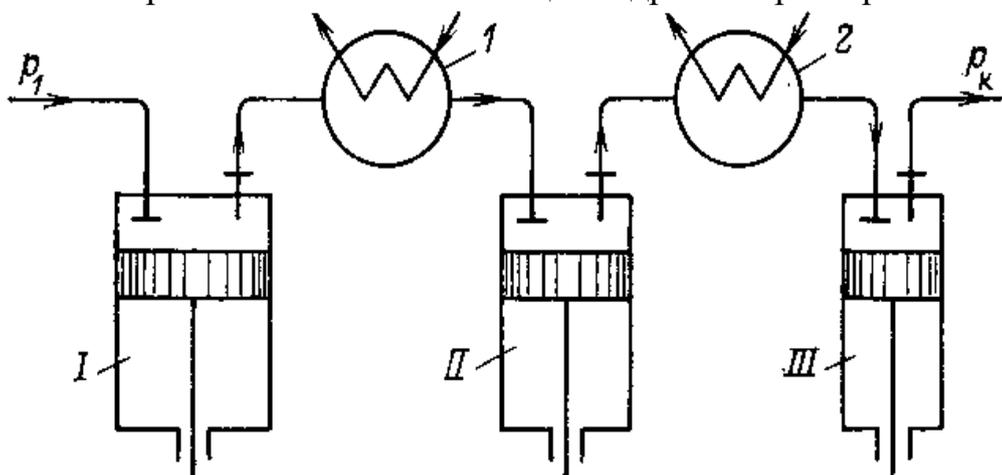


Рис. 2. Схема трехступенчатого поршневого компрессора с двумя промежуточными охладителями газа

Принято, что в каждой ступени компрессора *I*, *II*, *III* происходит политропный процесс сжатия (с некоторым теплоотводом через стенки цилиндра). Охлаждение газа в промежуточных охладителях *1*, *2* осуществляется до начальной температуры. Потери давления при прохождении газа по трубам промежуточных охладителей не учитываются.

На рис. 3 представлен процесс трехступенчатого сжатия и промежуточного охлаждения газа в  $p-v$  (а) и  $T-s$  (б) диаграммах.

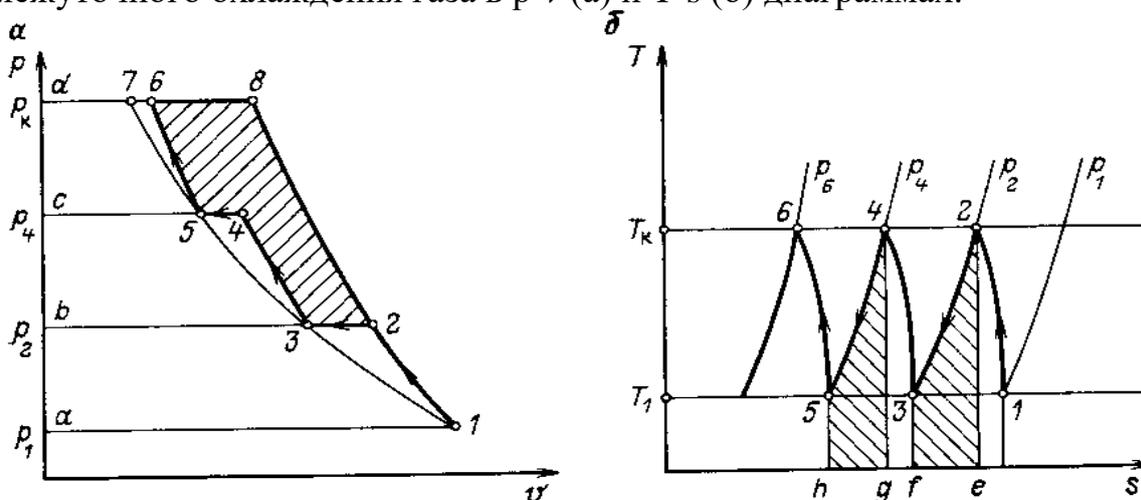


Рис. 3. Процесс трехступенчатого сжатия и промежуточного охлаждения газа в  $p-V$  (а) и  $T-s$  (б) координатах

Газ при давлении  $p_1$  поступает в первый цилиндр компрессора (*I* - ступень), где политропно сжимается по линии *1-2* до давления  $p_2$ . Затем сжатый

газ поступает в охладитель  $I$ , где охлаждается до первоначальной температуры  $T_1$  линия 2-3 при постоянном давлении  $p_2=p_3$ . Далее газ поступает во второй цилиндр (II - ступень), где процессы сжатия и охлаждения происходят аналогично, как и в первой ступени, а затем и в третий цилиндр (III - ступень), где конечное давление газа достигает значения  $p_6$ .

За счет применения промежуточного охлаждения значительно уменьшаются затраты работы на сжатие газа. Потенциальная работа уменьшается на величину, соответствующей заштрихованной области диаграммы *пл.* 2-8-6-5-4-3-2.

При одноступенчатом сжатии работа по повышению давления от  $p_1$  до  $p_8$  осуществлялась бы по кривой 1-8, а работа, затраченная на сжатие была бы равна площади *a-1-2-8-d-a* - диаграмма рис. 3 (а).

Промежуточное охлаждение приводит так же к уменьшению температуры в конце сжатия. На диаграмме рис. 3 (б) количество теплоты отведенной от газа после сжатия в первой ступени равна заштрихованной *пл.* 2-3-f-e-2, а после второй ступени *пл.* 4-5-h-g-4.

В результате промежуточного охлаждения в компрессоре процесс сжатия приближается к изотермическому. При бесконечно большом числе промежуточных охладителей процесс сжатия будет изотермическим рис.3 (а) линия 1-3-5-7.

Степень повышения давления от  $p_1$  до  $p_k$  в каждой ступени при общем числе  $z$  определяется соотношением:

$$\varepsilon_i = \sqrt[z]{p_k / p_1}.$$

В конечном итоге целесообразность использования многоступенчатого сжатия определяется технико-экономическим обоснованием.

### Условия выполнения задания

Определить теоретическую работу  $l_{k1}$  на привод одноступенчатого и трехступенчатого компрессоров при сжатии воздуха от давления  $p_1$ , МПа до давления  $p_2$ , МПа. Начальная температура  $t_1$ , °С. Показатель политропы для всех ступеней  $n$ . Определить работу  $l$   $л^3$  воздуха и температуру сжатия в одноступенчатом, трехступенчатом и четырех ступенчатом компрессорах. Оценить уменьшение затрат работы при переходе с от одноступенчатого к четырехступенчатому компрессору. Варианты заданий приведены в таблице 4.

## Варианты заданий

№	$p_1, \text{МПа}$	$t_1, \text{°C}$	$p_2, \text{МПа}$	$n$
1	0,1	27	12,5	1,2
2	0,12	24	10,5	1,1
3	0,15	25	10,0	1,2
4	0,13	26	11,5	1,21
5	0,9	21	13,4	1,11
6	0,16	20	12,0	1,12
7	0,11	23	13,0	1,1
8	0,10	25	11,2	1,14
9	0,12	24	10,5	1,15
10	0,15	25	10,0	1,2
11	0,13	26	11,5	1,21
12	0,9	21	13,4	1,11
13	0,16	20	12,0	1,12
14	0,11	23	13,0	1,1
15	0,13	26	11,5	1,21
16	0,9	21	13,4	1,11
17	0,16	20	12,0	1,12
18	0,11	23	13,0	1,1
19	0,10	25	11,2	1,14
20	0,12	24	10,5	1,15
21	0,15	25	10,0	1,2
22	0,13	26	11,5	1,21
23	0,9	21	13,4	1,11
24	0,16	20	12,0	1,12
25	0,11	23	13,0	1,1
26	0,13	26	11,5	1,21
27	0,9	21	13,4	1,11
28	0,16	20	12,0	1,12
29	0,11	23	13,0	1,1
30	0,10	25	11,2	1,14

**Пример выполнения задания**

В качестве исходных данных выберем из таблицы 4 исходные значения параметров варианта №1.

Начальное давление  $p_1=0,1 \text{ МПа}$ .

Начальная температура  $t_1=27 \text{ °C}$  ( $T_1=300\text{K}$ ).

Конечное давление  $p_2=12,5 \text{ МПа}$ .

Показатель политропы  $n=1,2$ .

### Одноступенчатый компрессор

Работа на привод одноступенчатого компрессора,  $\kappa\text{Дж}/\text{м}^3$ :

$$l_{k1} = -\frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left[ \left( p_2 / p_1 \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = -\frac{1,2}{1,2-1} 0,1 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot \left[ (12,5/0,1)^{\frac{1,2-1}{1,2}} - 1 \right] = -774.$$

Температура в конце сжатия определится из соотношения  $T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{\frac{n-1}{n}}$ :

$$T_2 = 300 \cdot (12,5/0,1)^{\frac{1,2-1}{1,2}} = 672 \text{ К}.$$

### Трехступенчатый компрессор

Степень увеличения давления воздуха в каждой ступени определяется из уравнения  $x = \sqrt[n]{p_2/p_1}$ :

$$x = \sqrt[3]{12,5/0,1} = 5.$$

Работа, затраченная на получение сжатого воздуха в первой ступени равна,  $\kappa\text{Дж}/\text{м}^3$ :

$$l_1 = -\frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left[ \left( p_2 / p_1 \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = -\frac{1,2}{1,2-1} 0,1 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot \left[ (5)^{\frac{1,2-1}{1,2}} - 1 \right] = -186.$$

Затраченная работа всех ступеней одинакова, поэтому общая работа на привод компрессора определится:

$$l_{k3} = 3l_1 = 3 \cdot (-186) = -558 \kappa\text{Дж}/\text{м}^3.$$

Температура в конце сжатия в каждой ступени:

$$T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{\frac{n-1}{n}} = 5^{\frac{1,2-1}{1,2}} = 1,31; T_2 = T_1 \cdot 1,31 = 300 \cdot 1,31 = 393 \text{ К}.$$

### Четырехступенчатый компрессор

Степень увеличения давления воздуха в каждой ступени:

$$x = \sqrt[4]{12,5/0,1} = 3,34.$$

Работа, затраченная на получение сжатого воздуха в первой ступени равна,  $\kappa\text{Дж}/\text{м}^3$ :

$$l_1 = -\frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left[ \left( p_2 / p_1 \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = -\frac{1,2}{1,2-1} 0,1 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot \left[ (3,34)^{\frac{1,2-1}{1,2}} - 1 \right] = -122.$$

Общая работа на привод компрессора определится:

$$l_{k4} = 4l_1 = 4 \cdot (-122) = -488 \kappa\text{Дж}/\text{м}^3.$$

Температура в конце сжатия в каждой ступени:

$$T_2/T_1 = \left( p_2 / p_1 \right)^{\frac{n-1}{n}} = 3,34^{\frac{1,2-1}{1,2}} = 1,22; T_2 = T_1 \cdot 1,22 = 300 \cdot 1,22 = 366 \text{ К}.$$

Затрата работа при переходе от одноступенчатого к четырехступенчатому компрессору уменьшается на:

$$\frac{l_{k1} - l_{k4}}{l_{k1}} = \frac{-774 - (-488)}{-774} = 0,344 = 34,4 \%$$

По завершении расчетов отобразить работу компрессора в p-v диаграмме.

**Сделать заключение по работе.**

## 2.5. Задание № 5. Газовый цикл

**Цель работы** Ознакомиться на практическом примере с методикой расчета газового цикла тепловой энергетической машины.

### Методические указания к выполнению задания

Для оценки совершенства цикла вводят понятие термический коэффициент полезного действия  $\eta_t$ , который определяют как отношение энергий в форме полезно затраченной работы  $l_u$  к энергии в форме всей подведенной теплоты  $q_1$ , для выполнения этой работы:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{l_u}{q_1}.$$

Для цикла Карно это уравнение принимает вид:

$$\eta_t = \frac{l_u}{q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Цикл Карно в заданном диапазоне температур  $T_1$  и  $T_2$  имеет наибольший термический КПД по сравнению с любым другим циклом.

В настоящее время в двигателях внутреннего сгорания осуществляются следующие циклы:

*С подводом тепла по изохоре* (цикл Отто) для которого термический КПД определяется:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}},$$

где  $\varepsilon = v_1/v_2$  – степень адиабатного сжатия;

$k = c_p/c_v$  – показатель адиабаты.

*С подводом тепла по изобаре* (цикл Дизеля) для которого термический КПД определяется:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{k} \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\rho^k - 1}{\rho - 1},$$

где  $\rho = v_3/v_2$  – степень изобарного (предварительного) расширения.

*Смешанный*, с подводом части тепла по изохоре и части по изобазе (цикл Тринклера) для которого термический КПД определяют:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\lambda \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)},$$

где  $\lambda = p_3/p_2$  – повышение давления при подводе тепла по изохоре;  
 $\rho = v_4/v_3$  – степень изобарного (предварительного) расширения.

В газовых турбинах осуществляются следующие циклы:

*С подводом тепла по изобазе* (цикл Брайтона) для которого термический КПД определяется:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}},$$

где  $\varepsilon = v_1/v_2$  – степень адиабатного сжатия.

*С подводом тепла по изохоре* (цикл Гемфри) для которого термический КПД определяется:

$$\eta_t = 1 - \frac{k}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} \frac{\lambda^{1/k} - 1}{\lambda - 1},$$

где  $\lambda = p_3/p_2$  - степень повышения давления;

$\pi = p_2/p_1$  - степень отношения давления в компрессоре при адиабатном сжатии.

#### **Условия выполнения задания**

При расчете газового цикла считается, что рабочее тело - 1 кг воздуха, для которого термодинамические параметры имеют постоянные значения:

$$c_p = 1,005 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град});$$

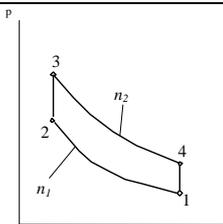
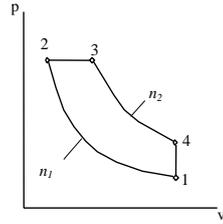
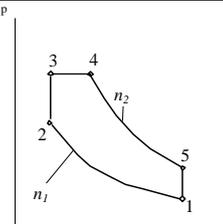
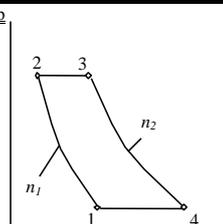
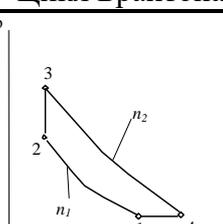
$$c_v = 0,71 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град});$$

$$R = 0,287 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град}).$$

Требуется определить: основные параметры состояния  $p$ ,  $v$ ,  $T$  для точек цикла; построить цикл в координатах  $p-v$ ; рассчитать термический КПД. Варианты заданий приведены в таблице 5.

Таблица 5

## Варианты заданий

№ п/п	$T_1,$ °K	$P_1,$ кПа	Характеристики цикла						Цикл
			$n_1$	$n_2$	$\varepsilon$	$\lambda$	$\rho$	$\pi$	
1	273	100	1,4	1,35	5	4,6	-	-	 <p>Цикл Отто</p>
2	283	110	1,34	1,3	5,5	4,3	-	-	
3	303	120	1,30	1,23	6	4,0	-	-	
4	323	90	1,32	1,2	6,5	3,8	-	-	
5	343	130	1,36	1,25	7	3,4	-	-	
6	263	80	1,38	1,27	7,5	3,0	-	-	
7	263	80	1,4	1,36	10	-	2,2	-	 <p>Цикл Дизеля</p>
8	273	90	1,38	1,33	10,5	-	2,1	-	
9	283	100	1,36	1,3	11,0	-	2,0	-	
10	303	110	1,34	1,28	11,5	-	1,9	-	
11	323	120	1,32	1,25	12	-	1,8	-	
12	343	130	1,3	1,24	12,5	-	1,7	-	
13	263	85	1,3	1,25	14	1,4	2	-	 <p>Цикл Тринклера</p>
14	273	90	1,32	1,28	15	1,5	1,9	-	
15	283	95	1,34	1,3	16	1,6	1,8	-	
16	308	100	1,36	1,32	17	1,7	1,7	-	
17	323	105	1,38	1,34	16	1,6	1,6	-	
18	343	110	1,4	1,36	19	1,5	1,5	-	
19	253	70	1,4	1,38	-	-	2	5	 <p>Цикл Брайтона</p>
20	263	80	1,38	1,36	-	-	1,9	5,5	
21	273	90	1,36	1,34	-	-	1,8	6	
22	283	95	1,34	1,32	-	-	1,7	6,5	
23	293	100	1,32	1,3	-	-	1,6	7	
24	303	105	1,3	1,28	-	-	1,5	7,5	
25	253	70	1,4	1,38	-	1,4	-	7	 <p>Цикл Гемфри</p>
26	263	75	1,38	1,36	-	1,5	-	6,5	
27	273	80	1,36	1,34	-	1,6	-	6	
28	283	85	1,34	1,32	-	1,7	-	5,5	
29	293	90	1,32	1,3	-	1,8	-	5	
30	303	95	1,3	1,28	-	1,9	-	4,5	

### Пример выполнения задания

В качестве исходных данных выберем из таблицы 5 исходные значения параметров к задаче №27. Будем считать процесс расширения, сжатия газа адиабатным т.е. коэффициент политропы равен коэффициенту адиабаты

$$n_1 = k_1, n_2 = k_2.$$

Тогда газовый цикл можно изобразить как это представлено на рабочей диаграмме рис.4. Цикл состоит из четырех процессов: 1–2 - адиабатного, 2–3 - изохорного, 3–4 - адиабатного, 4–1 - изобарного.

Параметры в точках:  $p_1=80 \text{ кПа}$ ;  $t_1=273 \text{ К}$ ; показатель адиабаты  $k_1=1,36$ ;  $k_2=1,34$ ; теплоемкости рабочего газа - воздуха:  $c_p=1,005 \text{ кДж/кг·град}$ ;  $c_v=0,71 \text{ кДж/(кг·град)}$ ; газовая постоянная воздуха:  $R=0,287 \text{ кДж/(кг·град)}$ ; степень повышения давления  $\lambda=1,6$ ; степень повышения давления при адиабатном сжатии  $\pi=6$ .

Цикл осуществляется в газовой турбине с подводом тепла по изохоре.

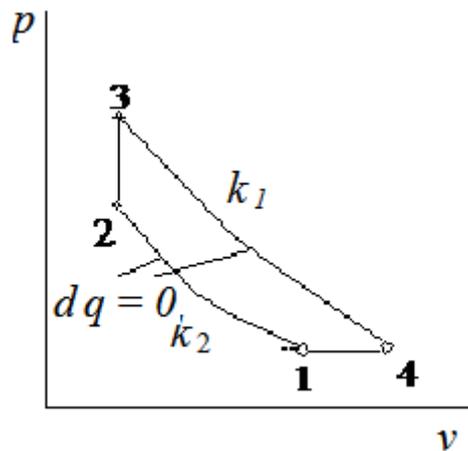


Рис. 4. Цикл в координатах  $p-v$

Определение параметров  $p$ ,  $v$ ,  $T$  для точек цикла:

для точки 1 дано  $p_1=80 \text{ кПа}$ ,  $t_1=273 \text{ К}$ ; определим  $v_1$ :

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 273}{0,8 \cdot 10^5} = 0,98 \text{ м}^3/\text{кг};$$

для процесса 1-2 известно  $\pi=6$  ; определим  $v_2$ ,  $p_2$ , и  $T_2$ .  $p_2$  найдем через  $\pi=p_2/p_1$ :

$$p_2 = p_1 \cdot \pi = 80 \cdot 6 = 480 \text{ кПа}.$$

Для определения  $v_2$  используем уравнение адиабаты в  $T-v$  - координатах  $pv^k = \text{const}$ , где

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k_1} \text{ откуда } v_2 = v_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k_1}} = v_1 \left( \frac{1}{\pi} \right)^{\frac{1}{k_1}} = 0,98 \left( \frac{1}{6} \right)^{\frac{1}{1,36}} = 0,26 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Для определения температуры  $T_2$  используем уравнение состояния  $p_2 v_2 = RT_2$ , откуда

$$T_2 = \frac{p_2 v_2}{R} = \frac{480 \cdot 0,26}{0,287} = 434^\circ \text{K},$$

Для точки 3 дано  $v_3 = v_2 = 0,26 \text{ м}^3/\text{кг}$ ; определим  $T_3, p_3$ .  $p_2$  найдем через  $\lambda = p_3/p_2$ :

$$p_3 = p_2 \cdot \lambda = 480 \cdot 1,6 = 768 \text{ кПа}.$$

Для определения температуры  $T_3$  используем уравнение состояния  $p_3 v_3 = RT_3$ , откуда

$$T_3 = \frac{p_3 v_3}{R} = \frac{768 \cdot 0,26}{0,287} = 695^\circ \text{K}.$$

Для точки 4 известно  $p_4 = 80 \text{ кПа}$ , определим  $v_4$ , и  $T_4$ .

Для определения  $v_4$  используем соотношение параметров адиабатного процесса

$$4-1: \frac{p_4}{p_3} = \left( \frac{v_3}{v_4} \right)^{k_2}, \text{ откуда:}$$

$$v_4 = v_3 \left( \frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{1}{k_1}} = 0,26 \left( \frac{768}{80} \right)^{\frac{1}{1,34}} = 1,4 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Для определения температуры  $T_4$  используем уравнение состояния:

$$T_4 = \frac{p_4 v_4}{R} = \frac{80 \cdot 1,4}{0,287} = 390^\circ \text{K}$$

Заносим параметры состояния в сводную таблицу:

№ точки	$p, \text{ кПа}$	$v, \text{ м}^3/\text{кг}$	$T, \text{ }^\circ\text{K}$
1	80	0,98	273
2	480	0,26	434
3	768	0,26	695
4	80	1,4	390

По расчетным данным в масштабе в координатах  $p$  и  $v$  строится цикл. Термический К.П.Д. -  $\eta_t$  цикла рассчитываем как:

$$\eta_t = 1 - \frac{k}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} \frac{\lambda^{1/k} - 1}{\lambda - 1} = 1 - \frac{1,41}{6^{\frac{1,41-1}{1,41}}} \cdot \frac{1,6^{\frac{1}{1,41}} - 1}{1,6 - 1} = 44,8\%.$$

По завершении расчетов отобразить работу цикла в  $p$ - $v$  диаграмме.

**Сделать заключение по работе.**

## 2.6. Задание № 6. Истечение газа из сопла Лавалья

**Цель работы** Ознакомиться на практическом примере с методикой расчета истечения газа из сопла Лавалья.

### Методические указания к выполнению задания

Специально спроектированные каналы для рабочей среды и придания потоку определенного направления называют *соплами*.

При истечении газа из отверстий производят расчет критического отношения давлений  $\beta_{кр}$ , величина которого соответствует звуковой (критической) скорости:

$$\beta_{кр} = \frac{P_{кр}}{P_{ex}} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}},$$

где  $P_{ex}$  - давление газа на входе в сопло;

$P_{кр}$  - давление газа в критическом сечении сопла.

Скорость истечения газа на выходе из сопла находится, м/с:

$$v_{вых} = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_{ex} \left[ 1 - \left( \frac{P_{вых}}{P_{ex}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]},$$

где  $k$  - показатель адиабаты;

$R$  - удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К).

Скорость течения газа в критическом сечении равна местной скорости звука и находится из выражения:

$$v_{кр} = a = \sqrt{kRT_{кр}}.$$

Температуру и плотность газа находят из уравнения состояния:

$$P = \rho RT.$$

Поскольку процесс истечения газа в сопле рассматривают как адиабатный, то соотношение, между удельным объемом, плотность и давлением примет вид:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{\rho_1}{\rho_2} = \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}}.$$

Массовый расход газа в любом сечении сопла определяется так:

$$G = \rho v F,$$

где  $\rho$  - плотность газа,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$v$  - скорость газа,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$F$  - площадь проходного сечения,  $\text{м}^2$ .

Работа открытой термодинамической системы, к которой относится сопло, определяется по следующей зависимости:

$$l_{\text{расп}} = \int_{P_1}^{P_2} v dP = l_{\text{тех}} + \frac{v_{\text{вых}}^2 - v_{\text{вх}}^2}{2} + l_{\text{тр}},$$

где  $l_{\text{тех}}$  - техническая работа. Для сопла  $l_{\text{тех}}=0$ ;

$l_{\text{тр}}$  - работа сил трения. Примем, что  $l_{\text{тр}}=0$ .

Схема сопла изображена на рис.5.

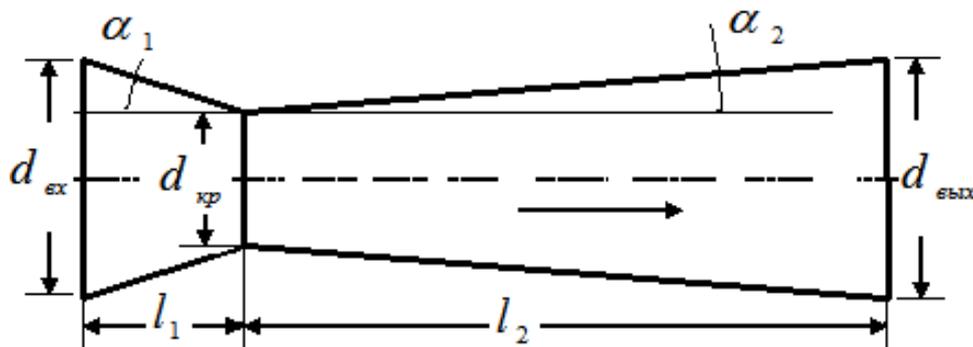


Рис. 5. Схема сопла Лавали

Здесь

$\alpha_1, \alpha_2$  - углы конусности конфузора и диффузора;

$d_{\text{вх}}, d_{\text{кр}}, d_{\text{вых}}$  - диаметры входа, критики и выхода;

$l_1, l_2$  - длина конфузора и диффузора.

#### Условия выполнения задания

Требуется определить: геометрические и теплофизические параметры на входе, выходе и в критическом сечении сопла; критическую скорость и скорость истечения; рассчитать размеры сопла.

Рассчитать располагаемую работу газового потока. Построить графики изменения  $v, P$  и  $T$  по длине сопла.

Через сужающийся канал (конфузор), а затем через расширяющийся канал (диффузор) протекает газ.

Варианты заданий приведены в таблице 6.

## Варианты заданий

№	Газ	$P_{\text{вх}}$ бар	$T_{\text{вх}}$ °C	$v_{\text{вх}}$ м/с	$P_{\text{вых}}$ бар	$G$ кг/ч	$a_1$ град	$a_2$ град
1	воздух	25	1800	150	2,0	2000	30	10
2	O <sub>2</sub>	24	1700	140	1,9	2100	31	9°30'
3	N <sub>2</sub>	23	1600	130	1,8	2200	32	9
4	CO <sub>2</sub>	22	1500	120	1,7	2300	33	8°30'
5	O <sub>2</sub>	21	1400	110	1,6	2400	34	8
6	воздух	20	1700	100	1,5	2500	35	7°30'
7	O <sub>2</sub>	19	1600	90	1,4	2600	36	7
8	N <sub>2</sub>	18	1500	80	1,3	2700	37	6°30'
9	CO <sub>2</sub>	17	1400	70	1,2	2800	38	6
10	CO	16	1300	60	1,1	2900	39	5°30'
11	воздух	15	1600	50	1,0	3000	40	5
12	O <sub>2</sub>	14	1500	40	0,9	3100	41	5°30'
13	N <sub>2</sub>	13	1400	50	0,8	3200	42	6
14	CO <sub>2</sub>	12	1300	60	0,7	3300	43	6°30'
15	CO	11	1200	70	0,7	3400	44	7
16	воздух	12	1750	80	0,8	3450	45	7°30'
17	O <sub>2</sub>	13	1650	90	0,9	3350	44	8
18	N <sub>2</sub>	14	1550	100	1,0	3250	43	8°30'
19	CO <sub>2</sub>	15	1450	110	1,1	3150	42	9
20	CO	16	1350	120	1,2	3050	41	9°30'
21	воздух	17	1650	130	1,3	2950	40	10
22	O <sub>2</sub>	18	1550	140	1,4	2850	39	9°30'
23	N <sub>2</sub>	19	1450	150	1,5	2750	38	8
24	CO <sub>2</sub>	20	1350	140	1,6	2650	37	7
25	CO	21	1250	130	1,7	2550	36	6
26	воздух	22	1900	120	1,8	2450	35	5
27	O <sub>2</sub>	23	1750	110	1,9	2350	34	6
28	N <sub>2</sub>	24	1650	100	2,0	2250	33	7
39	CO <sub>2</sub>	25	1550	90	2,1	2150	32	8
30	CO	26	1450	80	2,2	2050	31	9

## Пример выполнения задания

В качестве исходных данных выберем из таблицы 6 исходные значения параметров к задаче №25.

Газ - CO, начальные параметры: давление  $P_{\text{вх}}=21$  бар ( $21 \cdot 10^5$  Па), температура  $T_{\text{вх}}=1250$  °C (1523 К), скорость  $v_{\text{вх}}=130$  м/с. Давление на выходе  $P_{\text{вых}}=1,7$  бар ( $1,7 \cdot 10^5$  Па), массовый расход газа  $G=2550$  кг/ч (0,71 кг/с) Углы конусности  $a_1=36^\circ$  и  $a_2=6^\circ$ .

Удельная газовая постоянная газа CO:

$$R_{\text{CO}} = 8314/28 = 297 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Плотность газа на входе в сопло:

$$\rho_{\text{вх}} = \frac{P_{\text{вх}}}{RT_{\text{вх}}} = \frac{21 \cdot 10^5}{297 \cdot 1523} = 4,6 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Коэффициент адиабаты  $k = c_p / c_v = 1,2594 / 0,8587 = 1,47$ , где величины  $c_p$  и  $c_v$  выбраны при температуре входа  $T_{ex} = 1250$  °C для газа - CO из таблиц П.2 и П.3 приложения.

Давление в критическом сечении сопла:

$$P_{кр} = P_{ex} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 21 \cdot 10^5 (0,81)^{3,13} = 10,86 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Плотность газа на выходе из сопла:

$$\rho_{вых} = \frac{\rho_{ex}}{\left( \frac{P_{ex}}{P_{вых}} \right)^{\frac{1}{k}}} = \frac{\rho_{ex}}{\left( \frac{21}{1,7} \right)^{\frac{1}{1,47}}} = \frac{4,6}{5,53} = 0,83 \text{ кг/м}^3.$$

Температура на выходе из сопла:

$$T_{вых} = \frac{P_{вых}}{\rho_{вых} R} = \frac{1,7 \cdot 10^5}{0,83 \cdot 297} = 689,6 \text{ К.}$$

Плотность газа в критическом сечении:

$$\rho_{кр} = \frac{\rho_{ex}}{\left( \frac{P_{ex}}{P_{кр}} \right)^{\frac{1}{k}}} = \frac{\rho_{ex}}{\left( \frac{21}{10,86} \right)^{\frac{1}{1,47}}} = \frac{4,6}{1,57} = 2,9 \text{ кг/м}^3.$$

Температура в критическом сечении:

$$T_{кр} = \frac{P_{кр}}{\rho_{кр} R} = \frac{10,86 \cdot 10^5}{2,9 \cdot 297} = 1260,9 \text{ К.}$$

Скорость на выходе

$$v_{вых} = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} R T_{ex} \left[ 1 - \left( \frac{P_{вых}}{P_{ex}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = \sqrt{2 \frac{1,47}{1,47-1} 297 \cdot 1523 \left[ 1 - \left( \frac{1,7}{21} \right)^{0,319} \right]} = 1247,5 \text{ м/с.}$$

Критическая скорость:

$$v_{кр} = a = \sqrt{k \cdot R \cdot T_{кр}} = \sqrt{1,47 \cdot 297 \cdot 1260,9} = 738 \text{ м/с.}$$

Из уравнения по расходу газа  $G = \rho v F$ , найдем площадь сечения участков входа, критики и выхода:

$$F_{ex} = \frac{G}{\rho_{ex} v_{ex}} = \frac{0,71}{4,6 \cdot 130} = 0,0012 \text{ м}^2,$$

$$F_{кр} = \frac{G}{\rho_{кр} v_{кр}} = \frac{0,71}{2,9 \cdot 738} = 0,00033 \text{ м}^2,$$

$$F_{вых} = \frac{G}{\rho_{вых} v_{вых}} = \frac{0,71}{0,83 \cdot 1247,5} = 0,00069 \text{ м}^2.$$

$$d_{\text{ex}} = \sqrt{\frac{4F_{\text{ex}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0012}{3,14}} = 0,039 \text{ м} = 3,9 \text{ см},$$

$$d_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{4F_{\text{кр}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00033}{3,14}} = 0,02 \text{ м} = 2,0 \text{ см},$$

$$d_{\text{вых}} = \sqrt{\frac{4F_{\text{вых}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00069}{3,14}} = 0,029 \text{ м} = 2,9 \text{ см}.$$

Длины участков сопла:

$$l_1 = \frac{d_{\text{ex}} - d_{\text{кр}}}{2 \operatorname{tg} \alpha_1} = \frac{0,039 - 0,02}{2 \operatorname{tg} 36^\circ} = 0,013 \text{ м} = 1,3 \text{ см},$$

$$l_2 = \frac{d_{\text{вых}} - d_{\text{кр}}}{2 \operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{0,029 - 0,02}{2 \operatorname{tg} 6^\circ} = 0,041 \text{ м} = 4,1 \text{ см}.$$

Располагаемая работа газового потока:

$$l_{\text{расч}} = \int_{P_1}^{P_2} v dP = l_{\text{мех}} + \frac{v_{\text{вых}}^2 - v_{\text{ex}}^2}{2} + l_{\text{тр}} = 0 + \frac{1247,5^2 - 13^2}{2} + 0 = 778044 \text{ м}^2 / \text{с}^2.$$

$$l_{\text{расч}} = 778044 \text{ Дж} / \text{кг}.$$

По рассчитанным данным строим график изменения параметров газового потока.

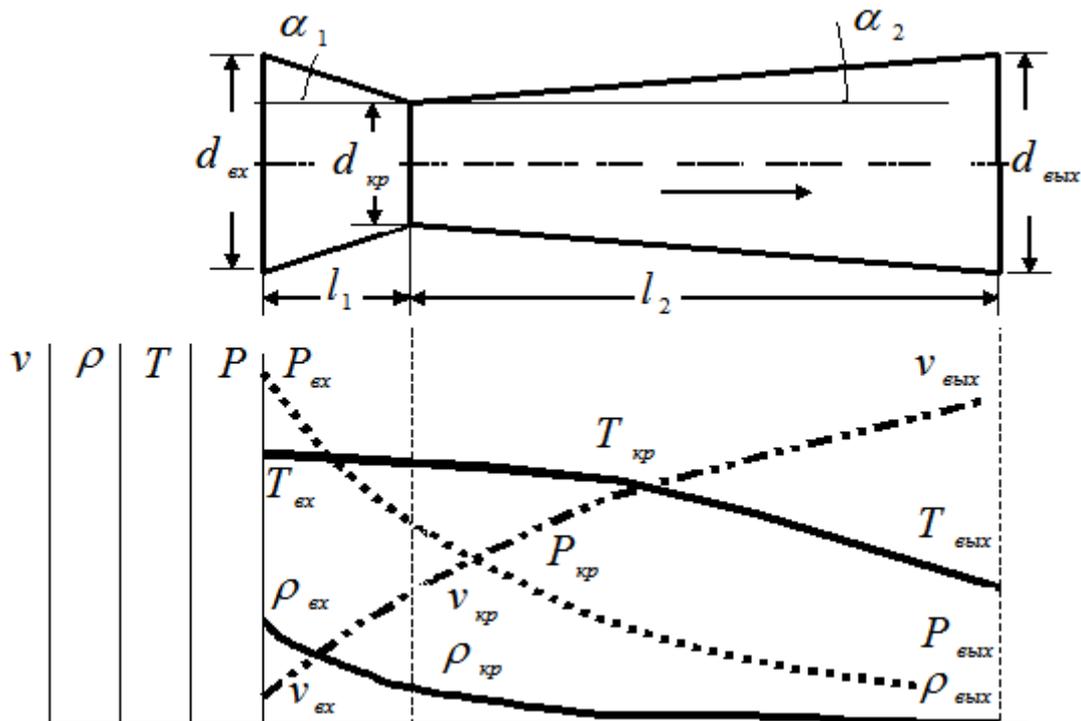


Рис. 6. Графики изменения параметров по длине сопла  
Сделать заключение по работе.

### 3.ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Техническая термодинамика. Основные понятия и определения.
2. Термодинамические параметры состояние тела.
3. Идеальные и реальные газы. Основные законы.
4. Газовые смеси.
5. Первый закон термодинамики. Энтальпия. Энтропия.
6. Теплоемкость газов и их смесей.
7. Истинная и средняя теплоемкость.
8. Второй закон термодинамики. Термический КПД цикла.
9. Цикл Карно и его свойства.
10. Термодинамические процессы.
11. Рабочая и тепловая диаграмма.
12. Изохорный процесс.
13. Изобарный процесс.
14. Изотермический процесс.
15. Адиабатный процесс.
16. Политропный процесс.
17. Термодинамика газового потока.
18. Адиабатное течение потока газа.
19. Сопло Лаваля.
20. Термодинамические циклы тепловых двигателей и установок.
21. Термодинамический анализ процессов в компрессорах.
22. Термодинамические циклы ДВС.
23. Термодинамические циклы газотурбинных установок.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Практическое освоение раздела «Термодинамика» курса «Термодинамика и теплопередача» в предложенном объеме позволит сформировать у обучающихся компетенции, необходимые для эффективного ознакомления с основополагающими принципами теории и расчета термодинамических параметров в теплотехнических объектах и системах; приобретение навыков расчета параметров термодинамических процессов и циклов тепловых машин нефтегазодобывающих предприятий.

В практической деятельности пригодятся навыки, полученные при изучении рассматриваемых тем: законы термодинамики; термодинамические процессы идеальных газов; термодинамический анализ процессов в компрессорах; термодинамические циклы тепловых двигателей и установок; термодинамика потока.

### **СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача. - М.: ВШ. – 1980. – 469 с.
2. Юдаев Б. Н. Техническая термодинамика. Теплопередача. - М.: ВШ. – 1988. – 479 с.
3. Андрианова Т. Н., Дзампов Б. В. и др. Сборник задач по технической термодинамике. -М.: Издательство МЭИ, 2000. – 356 с.
4. Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева и П.Б. Лебедева. – Т.1 – М.: Энергия, 1975. – 744 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица. П.1

**Молекулярная масса веществ  $\mu$ , кг/кмоль, [4]**

$CO_2$	$SO_2$	$CO$	$N_2$	$H_2O$	Воздух	$O_2$
44	64	28	28	18	29	32

Таблица. П.2

**Средняя массовая теплоемкость  $c_p$  газов  
при  $p=const$ , кДж/(кг · град), [1,4]**

$t, [^{\circ}C]$	$CO_2$	$SO_2$	$CO$	$N_2$	$H_2O$	Воздух	$O_2$
0	0,8148	0,607	1,0396	1,0392	1,8594	1,0036	0,9148
100	0,9136	0,636	1,0446	1,0421	1,8903	1,0103	0,9232
200	0,9927	0,662	1,0584	1,0517	1,9406	1,0245	0,9353
300	1,0567	0,687	1,0802	1,0693	2,0005	1,0446	0,9500
400	1,1103	0,708	1,1057	1,0915	2,0645	1,0685	0,9651
500	1,1542	0,724	1,1321	1,1154	2,1319	1,0923	0,9793
600	1,1920	0,737	1,1568	1,1392	2,2014	1,1149	1,0689
700	1,2230	0,754	1,1790	1,1614	2,2730	1,1355	1,0856
800	1,2493	0,762	1,1987	1,1815	2,3450	1,1539	1,0999
900	1,2715	0,775	1,2158	1,1974	2,4154	1,1702	1,1120
1000	1,2900	0,783	1,2305	1,2150	2,4824	1,1844	1,1229
1100	1,3059	0,791	1,2435	1,2288	2,5456	1,1970	1,1317
1200	1,3197	0,795	1,2544	1,2410	2,6042	1,2083	1,1401
1300	1,3314	-	1,2644	1,2514	2,6586	1,2179	1,1484
1400	1,3415	-	1,2728	1,2606	2,7089	1,2267	1,1564
1500	1,3498	-	1,2799	1,2686	2,7553	1,2347	1,1639
1600	1,3574	-	1,2866	1,2761	2,7980	1,2418	1,1710
1700	1,3636	-	1,2926	1,2824	2,8382	1,2485	1,1786
1800	1,3695	-	1,2979	1,2883	2,8742	1,2944	1,1757
1900	1,3741	-	1,3025	1,2933	2,9073	1,2602	1,1928
2000	1,3783	-	1,3067	1,2979	2,9366	1,2653	1,2004

**Средняя массовая теплоемкость  $c_p$  газов  
при  $\nu=const$ , кДж/(кг · град), [1]**

$t, [^{\circ}C]$	$CO_2$	$SO_2$	$CO$	$N_2$	$H_2O$	Воздух	$O_2$
0	0,6259	0,477	0,7427	0,7352	1,3980	0,7164	0,6548
100	0,6770	0,507	0,7448	0,7365	1,4114	0,7193	0,6632
200	0,7214	0,532	0,7494	0,7394	1,4323	0,7243	0,6753
300	0,7599	0,557	0,7570	0,7448	1,4574	0,7319	0,6900
400	0,7938	0,578	0,7666	0,7524	1,4863	0,7415	0,7051
500	0,8240	0,595	0,7775	0,7616	1,5160	0,7519	0,7193
600	0,8508	0,607	0,7892	0,7716	1,5474	0,7624	0,7827
700	0,8746	0,624	0,8009	0,7821	1,5805	0,7733	0,7448
800	0,8964	0,632	0,8122	0,7926	1,6140	0,7842	0,7557
900	0,9157	0,645	0,8231	0,8030	1,6483	0,7942	0,7658
1000	0,9332	0,653	0,8336	0,8127	1,6823	0,8039	0,7750
1100	0,9496	0,662	0,8432	0,8219	1,7158	0,8127	0,7834
1200	0,9638	0,666	0,8566	0,8307	1,7488	0,8215	0,7913
1300	0,9772	-	0,8608	0,8390	1,7815	0,8294	0,7984
1400	0,9893	-	0,8688	0,8470	1,8129	0,8369	0,8051
1500	1,0006	-	0,8763	0,8541	1,8434	0,8441	0,8114
1600	1,0107	-	0,8830	0,8612	1,8728	0,8508	0,8173
1700	1,0203	-	0,8893	0,8675	1,9016	0,8570	0,8231
1800	1,0291	-	0,8956	0,8738	1,9293	0,8633	0,8286
1900	1,0371	-	0,9014	0,8792	1,9552	0,8688	0,8340
2000	1,0446	-	0,9064	0,8847	1,9804	0,8742	0,8390

## **ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ ИЗДАНИЯ:**

Интерфейс электронного издания (в формате pdf) можно условно разделить на 2 части.

Левая навигационная часть (закладки) включает в себя содержание книги с возможностью перехода к тексту соответствующей главы по левому щелчку компьютерной мыши.

Центральная часть отображает содержание текущего раздела. В тексте могут использоваться ссылки, позволяющие более подробно раскрыть содержание некоторых понятий.

## **МИНИМАЛЬНЫЕ СИСТЕМНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ:**

Систем. требования: процессор x64 с тактовой частотой 1,5 ГГц и выше; 1 Гб ОЗУ; WindowsXP/7/8/10; Монитор с разрешением 1920x1080, Видеокарта дискретная (128 bit), или встроенная; привод DVD-ROM. Программное обеспечение: AdobeAcrobatReader версии 9 и старше.

## **Сведения о лицах, осуществлявших техническую обработку и подготовку материалов:**

Сектор ДиТО УП ИЭиУ ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет».

---

Подписано к использованию 01.03.2022  
Объем электронного издания 2,4 Мб на 1 CD.  
Издательский центр «Удмуртский университет»  
426034, г. Ижевск, ул. Ломоносова, д. 4Б, каб. 021  
Тел. : +7(3412)916-364 E-mail: editorial@udsu.ru

---