

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»
(ТУСУР)

Утверждаю:
Зав. Кафедрой РЭТЭМ
В.И.Туев
«__» _____ 2012г

Пособие по теплофизике

Разработчик:
к.т.н. Апкарьян А.С.

Томск 2012

Содержание

Введение	3
Часть 1 Топливо.	
1. Глава 1. Топливо и теплофизические процессы горения	
1.1. Описание топлива	
1.1.2. Твёрдое топливо	5
1.1.3. Жидкое топливо	7
1.1.4. Газообразное топливо	8
1.2. Общая характеристика топлива	
1.2.1. Классификация топлива	11
1.2.2. Химический состав топлива	11
1.2.3. Теплота сгорания топлива	14
1.3. Расчёт горения топлива	
1.3.1. Расход воздуха, состав и количество продуктов сгорания	15
1.3.2. Определение температуры горения топлива	18
Часть 2. Техническая термодинамика	
2. Глава 2. Рабочее тело и основные законы идеального газа	
2.1. Основные понятия о термодинамике	20
2.2. Агрегатное состояние вещества. Идеальный газ.	20
2.3. Рабочее тело и параметры его состояния	21
2.4. Уравнение состояния идеального газа	24
2.5. Уравнение состояния реального газа	23
3. Глава 3. Газовые смеси	
3.1. Основные понятия	25
3.2. Способы задания смеси	25
3.3. Свойства смеси	26
4. Глава 4. Теплоёмкость	
4.1. Теплоёмкость газов	27
4.2. Теплоёмкость газовой смеси	28
5. Глава 5. Первое начало (закон) термодинамики	
5.1. Основные понятия	28
5.2. Первое начало (закон) термодинамики	32
5.3. Энтальпия	34
6. Глава 6. Термодинамические процессы изменения состояния идеального газа	
6.1. Изохорный процесс	34
6.2. Изобарный процесс	35
6.3. Взаимное расположение изохоры и изобары на T_s – диаграмме	37
6.4. Изотермический процесс	37
6.5. Адиабатный процесс	38
6.6. Взаимное расположение изотермы и адиабаты на T_s – диаграмме	40
6.7. Политропный процесс	42
7. Глава 7. Второе начало (закон) термодинамики	42
7.1. Круговой процесс теплового двигателя	42
7.2. Сущность второго начала термодинамики	45
8. Глава 8. Водяной пар	
8.1. Процесс парообразования	46
8.2. Процесс парообразования на $p\nu$ - диаграмме	47

8.3.	Процесс парообразования на Ts – диаграмме	50
8.4.	Определение состояния воды и водяного пара	52
8.5.	Is – диаграмма	53
9.	Глава 9. Истечение и дросселирование газового потока	
9.1.	Основные понятия	56
9.2.	Истечение газа из сопла	55
9.3.	Дросселирование потока газа	60
10.	Глава 10. Цикл паросиловой установки	
10.1.	Схема паросиловой установки	61
10.2.	Идеальный цикл Ренкина	62
10.3.	Способы повышения экономичности паросилового цикла	63
Часть 3. Основы теплопередачи		
11.	Глава 11. Теплопроводность	
11.1.	Основные понятия	65
11.2.	Теплопроводность стенки	67
12.	Глава 12. Конвективный теплообмен	
12.1.	Основные понятия	70
12.2.	Свободное движение жидкости	70
12.3.	Вынужденное движение жидкости	71
13.	Глава 13. Теплообмен излучением	
13.1.	Основные понятия	71
13.2.	Основные законы теплового излучения	72
13.3.	Излучение газов и паров	72
14.	Глава 14. Теплопередача и понятия о теплообменных аппаратах	
14.1.	Теплопередача	73
14.2.	Понятия о теплообменных аппаратах	74
15.	Глава 15. Инструкции	
15.1.	Инструкция по оказанию доврачебной помощи при несчастных случаях	76
15.2.	Инструкция «О мерах пожарной безопасности при проведении работ в помещениях»	78
15.3.	Инструкция по охране труда при эксплуатации электрошкафов сушильных лабораторных типа СНОЛ, СНВС	82
15.4.	Инструкция по охране труда при работе на индукционной плавильной вакуумной установке УИПВ -63 – 10-0,005	85
15.5.	Инструкция по охране труда при эксплуатации камерной печи ПКН 6125 «НАКАЛ»	92

Введение

В настоящее время тепловые устройства получили широкое распространение в самых различных областях науки и техники. Metallургия, машиностроение, энергетика, производство строительных материалов и другие отрасли промышленности немислимы без использования тепловых агрегатов. Современные тепловые агрегаты представляют собой сложные, высокомеханизированные и автоматизированные производственные устройства. Теплофизические и технологические процессы, протекающие в них сложны и многообразны. Поэтому без глубокого понимания физической сущности проходящих явлений и без достаточной теоретической подготовки невозможно решать сложные инженерные задачи, связанные с конструированием и эксплуатацией тепловых агрегатов.

Цель преподавания дисциплины – теоретически и практически подготовить будущих специалистов методам получения, преобразования, передачи и использования теплоты, выбирать и эксплуатировать необходимое оборудование отраслей промышленности. При этом особое внимание уделяется максимальной экономии теплоэнергетических ресурсов и материалов, интенсификации технологических процессов, выявлению и использованию вторичных энергоресурсов, защите окружающей среды и безопасности людей.

Задачей курса является формирование у студентов знаний; основ преобразования энергии, законов термодинамики и теплообмена, термодинамических процессов и циклов, свойств существенных для отрасли рабочих тел, характеристик топлива, теории горения, энерготехнологии, энергосбережения, принципов работы тепловых и теплообменных аппаратов, теплосиловых установок. Дисциплина даёт знания основных принципов обеспечения жизнедеятельности и безопасности при работе на тепловых и холодильных установках.

Часть I Топливо

Глава 1 Топливо и теплофизические процессы горения

1.1 Описание топлива

Все виды топлива по агрегатному состоянию делятся на твёрдые, жидкие и газообразные.

1.1.2 Твёрдое топливо

Естественное твёрдое топливо

Для естественного твёрдого топлива всех видов общим является не только агрегатное состояние, но и общность условий происхождения. Различают три химических возрастных стадий твёрдых ископаемых – торфяную, буроугольную, каменноугольную. Твёрдое топливо характеризуется химическим составом, содержанием влаги и летучих веществ, зольностью, количеством серы и теплотой сгорания. В таблице 1.1. показаны элементарный анализ и теплота сгорания твёрдого топлива. Влажность твёрдого топлива определяет эффективность его использования.

Таблица 1.1

Вид топлива	Состав органической массы, %			Теплота сгорания органической массы КДж/кг
	С	Н	О	
Древесина	50	6	44	18840
Торф	55-60	5,5-6,0	35-39	5000-5700
Бурые угли	67-78	5,0	17-28	27200-30900
Каменные угли	80-96	2-5	2-15	31800-36400

Летучие вещества выделяются из топлива при его термическом разложении. Летучие вещества играют весьма важную роль в процессе сгорания твёрдого топлива, так как они воспламеняются первыми и способствуют развитию процесса горения.

Твёрдое топливо содержит негорючие элементы, составляющие основу золы. Чем больше количество этих негорючих элементов, тем ниже качество топлива.

Сера – крайне вредная примесь твёрдого топлива. При сжигании топлива, в состав которого входит сера, образуется диоксид серы SO_2 , являющийся очень сильным окислителем. Наличие SO_2 в продуктах сгорания наносит вред технологическим процессам и экологии.

Древесное топливо

Древесное топливо применяют преимущественно в быту. Это объясняется низкими теплофизическими характеристиками древесины и его ценностью как строительного материала. Древесина характеризуется высокой влажностью. В растущем дереве влажность достигает 60%.

Теплота сгорания древесины основных пород в значительной мере зависит от влажности и находится в пределах 18555 – 19793 КДж/кг. Зольность древесины составляет 2 - 6%. Для древесины характерен высокий выход летучих (80 – 90% на органическую массу). Положительным является низкое содержание серы.

Торф

Торф занимает промежуточное значение между древесиной и каменным углём. В нём содержится большое количество воды (от 80 до 95%), т. е. сухая масса составляет всего 5 -20%. Зольность торфа составляет всего 3 – 10%, а серы 0,1 -2,0%. Состав органической массы торфа колеблется в широких пределах и зависит от возраста и района залегания. Торф широко применяют как местное топливо, заменяющее большое количество древесины.

Бурые угли

Бурые угли следует рассматривать как этап завершения превращений растительного материала. В буром угле нет остатков растений, хотя молодой бурый уголь

трудно отличить от торфа. Бурые угли характеризуются большой зольностью (7 – 40%), значительной влажностью (11 – 45%) и значительным содержанием серы (до 3%). Теплота сгорания бурых углей зависит от содержания углерода. Бурым углям свойственна низкая механическая прочность. Они способны самовозгораться при длительном хранении. Поэтому их нецелесообразно транспортировать на большие расстояния. Обычно их используют на предприятиях, которые расположены недалеко от месторождений. На бурых углях работают некоторые электростанции страны.

Каменные угли

Каменные угли характеризуются высоким содержанием углерода в органической массе топлива. Одним из самых освоенных каменноугольных бассейнов является Кузнецкий – Кемеровская область.

Для промышленности большое значение имеют сорта угля, направляемые на коксование для металлургии и на теплоэнергетические установки – электростанции и котельные. В таблице 1.2 даны характеристики углей Кузнецкого бассейна.

Таблица 1.2

Наименование месторождения	Марка угля	Рабочая масса топлива, %							Q _р ^н , КДж/кг	V _г , %
		W	A	S ₀	C	H	N	O		
Кемеровское	К, ПС, СС, Г	9,0	15,5	0,5	64,9	3,8	1,5	4,8	25098	29
Ленинское - Кузнецкое	Г, Д	10,0	5,0	0,4	67,2	4,7	2,0	10,7	26397	40
Прокопьевско-Киселёвское	К, ПС СС, Г	7,0	7,4	0,4	71,0	4,5	2,0	7,7	27821	30

Кузнецкие угли малозольные и, что особенно ценно малосернистые. Запасы угля в Кузнецком бассейне превышают 900 млрд.т. В основном здесь преобладают газовые и полугазовые угли. На коксовые и жирные угли приходится около 6% от общегеологических запасов бассейна. Кузнецкий бассейн является основной базой коксующихся углей для уральской и сибирской металлургии.

Большую роль в снабжении топливом предприятий страны играют месторождения Кизеловского района Печорского бассейна. Огромные запасы угля найдены в различных районах Восточной Сибири (Канско – Ачинское месторождение) и Дальнего Востока.

Горючие сланцы

Горючая масса сланцев характеризуется высоким содержанием водорода (до 8 – 10%). Это значительно больше, чем в горючей массе других твёрдых топлив (в дровах, торфе, бурых углях около 6%, в каменных углях 2 – 6 %). Благодаря содержанию такого количества водорода и около 60 - 70 % углерода теплота сгорания горючей массы сланцев высокая – 27654 – 33520 КДж/кг. Однако теплота сгорания рабочего топлива очень невелика, так как в состав сланцев входит большое количество минеральной массы, значительную часть которых составляют карбонаты. Из-за низкой теплоты сгорания рабочей массы горючие сланцы рассматривают как топливо местного значения. При нагревании горючих сланцев без доступа воздуха можно получить значительное количество смолы и газа.

Искусственное твёрдое топливо.

Кокс. Кокс образуется из каменного угля (коксующих углей) в результате сухой перегонки (нагрева без доступа воздуха) в камерах коксовальных печей. При этом из угля удаляются летучие вещества – кокс содержит только углерод и золу. В рабочем составе кокса содержится около 83 – 86% углерода, 9 – 10 % золы и 4 – 5 % влаги. Средняя теплота сгорания кокса 28000 КДж/кг.

Термоантрацит. Каменный уголь – антрацит подвергают особой термической обработке, в результате получают топливо, удовлетворяющее требованиям металлургов. Предварительную термическую обработку антрацита ведут в шахтных печах при продувании водяным паром. При термообработке содержание влаги в антраците

снижается с 3,5 до 0,2%, водорода с 1,2 – 1,4 до 0,2 – 0,4% кислорода и азота с 1,6 – 2,9% до 1,0 – 1,6% и серы с 1,5 – 2,0 до 0,9 – 1,0%.

Полученный термоантрацит характеризуется большой пористостью и вместе с тем высокой механической прочностью по сравнению с антрацитом. Реакционная способность термоантрацита выше, чем исходного антрацита, но ниже чем кокса.

1.1.3 Жидкое топливо

Естественное жидкое топливо

К естественным жидким топливам относится только сырая нефть, которую как топливо используют в ограниченном количестве, так как переработка нефти даёт неизмеримо более высокий эффект, чем использование её в сыром виде.

В настоящее время эксплуатируются мощные месторождения нефти на обширной территории между Волгой и Уралом и в Западной Сибири. Большую часть нефти добывают в Башкирии, Татарии, Самарской, Волгоградской, Пермской и Тюменской областях. Техника добычи нефти значительно совершенствована. Благодаря широкому применению прогрессивных методов добычи нефти себестоимость её значительно ниже себестоимости каменного угля. Нефть на нефтеперерабатывающие заводы транспортируют по нефтепроводам.

Искусственное жидкое топливо

Основную массу искусственного жидкого топлива составляют продукты переработки сырой нефти.

Бензин представляет собой жидкое топливо, состоящее из наиболее легкокипящих фракций нефти (температура кипения до 200°C). Плотность бензина, получаемого из различных нефтей, колеблется в пределах 0,72 – 0,76. Элементарный состав бензина зависит от содержания в нём различных углеводородов. В среднем можно считать, что бензин состоит из 85% углерода и 15% водорода. Низшая теплота сгорания составляет около 41900 КДж/кг. Температура вспышки бензина очень низкая, что объясняется высокой упругостью его паров при низких температурах. Бензин служит топливом для авиационных и автомобильных двигателей.

Несколько более высокой температурой кипения отличается *керосин* – выше 250°C. Плотность керосина – 0,800 – 0,833. При дальнейшем повышении температуры из него отгоняется *соляровый дистиллят*.

В зависимости от типа нефти выход лёгких фракций при перегонке составляет 25 – 30%. Остальная часть это более тяжёлые фракции, объединяемые общим названием – *мазут*.

Мазут имеет широкое применение в российской промышленности.

Мазуты различного происхождения по элементарному анализу мало отличаются друг от друга и состоят: 86,3 – 87,1% C^r, 12,3 – 13,1% H^r, 0 – 0,35% O^r, 0 – 0,5% N^r и 0 – 10% W^p.

Содержание серы в мазуте, получаемой из малосернистой нефти, составляет 0,5%; а в мазуте, получаемой из высокосернистой нефти около 4%. Нефтеперерабатывающие заводы выпускают мазут в основном марок 40, 100, 200 и их характеристики приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Физические свойства мазута	Марка мазута		
	40	100	200
Вязкость при 80°C	8	15,5	6,5 – 9,5
Температура вспышки не ниже °C	90	110	140
Температура застывания не ниже °C	10	25	35

Важными показателями, характеризующими качество мазута, являются температура застывания и вязкость. Вязкость в значительной степени снижается при повышении температуры нефтепродукта. Поэтому для обеспечения возможности перекачивания и сжигания в форсунках вязкие мазуты приходится предварительно

подогревать до (70 – 80) °С. Низшая теплота сгорания мазута в зависимости от его состава и содержания влаги колеблется в пределах 35615 - 39805 КДж/кг.

Огромное значение жидкого топлива заставляет изыскивать пути для замены нефти другими видами горючих ископаемых, которые можно использовать для получения моторных топлив. Существует ряд методов переработки твёрдого топлива: полукоксование, гидрогенизация, синтез углеводородов и др.

В качестве заменителя мазута, особенно в виде добавки к газообразному топливу (для увеличения излучательной способности факела) нередко применяют смолы, получаемые как продукт переработки твёрдых топлив. В таблице 1.4. указаны характеристики смол.

Таблица 1.4

Наименование	Плотность при 20°С	Условн. Вязкость при 50°С	Горючая масса				Балласт		Q ^н _p КДж/кг
			C ^r	H ^r	S ^r	N ^r + O ^r	W ^p	A ^p	
Каменноугольная смола	1,04 - 1,2	24	90	7	1	2	До 5	до 1	35615
Буроугольная смола	1,10	55	83	7	2	8	До 5	до 1	33520
Каменноугольная смола	-	Очень вязкий	87	5	7	1	следы	0,6	36034

1.1.4 Газообразное топливо

Природный газ

Природный газ важнейший вид газообразного топлива. Количество используемого в России природного газа в несколько раз превышает потребление всех других видов газообразного топлива вместе взятых.

Природный газ по сравнению с другими видами топлива имеет ряд весьма существенных преимуществ:

- 1 Производительность труда при его добыче примерно в 5 раз выше, чем при добыче нефти и в 35 раз выше, чем при шахтной добыче угля.
- 2 Себестоимость добычи этого газа значительно ниже, чем других видов топлива.
- 3 При использовании газа в качестве топлива не требуется сложной и дорогостоящей переработки.
- 4 Высокая теплотворная способность позволяет эффективно применять его в качестве технологического и энергетического топлива.
- 5 Полное отсутствие серы.
- 6 Отсутствие в составе токсичного оксида углерода.
- 7 Высокая теплота сгорания
- 8 При его сжигании не загрязняется атмосфера.

В таблице 1.5 приведена характеристика природного газа, применяемого в промышленности.

Таблица 1.5

Месторождение	Состав газа, % (объёмн.)								Отн. пл-ть	Q ^н _p КДж/м ³
	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	H ₂		
Ставропольское	0,43	91,2	1,96	0,74	0,15	0,03	2,5	0,018	0,591-0,608	34800
Краснодарское	0,51	93,8	3,86	1,19	0,22	0,04	2,6		0,600-0,604	34800
Шебелинское	0,10	92,8	3,9-4,0	1,0-1,1	0,16-0,11	0,04-0,11	1,0	0,051	0,579	34800
Газлинское	0,08	95,5	2,7	0,35	0,21	0,10	1,0	0,026	0,579	34200
Саратовское	0,1	78,2	4,4	2,2	0,41	0,09	14,0	0,017	0,680	32500
Волгоградское	1,2	91,5	2,1	1,3	0,28	0,07	2,9	0,051	0,608	33700

Основными потребителями природного газа являются чёрная металлургия (доменные печи, нагревательные печи прокатного производства), производство строительных материалов, теплоэнергетика, химическая промышленность.

Искусственное газообразное топливо

Доменный газ

Доменный газ побочный продукт производства чугуна. Теплота сгорания его в зависимости от вида выплавляемого чугуна колеблется в пределах 3330 – 4620 КДж/м³. В таблице 1.6 приведён средний состав доменного газа.

Таблица 1.6

Наименование	Содержание, %
Оксид углерода CO	28,5 – 30,5
Диоксид углерода CO ₂	10,5 – 12,5
Водород H ₂	1,5 - 3,8
Азот N ₂	57 – 59,5
Метан CH ₄	0,1 – 0,2

Теоретическая температура горения доменного газа составляет 1430 – 1500 °С.

Доменный или колошниковый газ получают в большом количестве (около 3м³ на 1кг чугуна) в процессе доменной плавки. В металлургическом производстве доменный газ играет существенную роль в тепловом балансе, на его долю приходится свыше 40% теплоты сгорания кокса, загруженного в доменную печь. Ресурсы доменного газа зависят от количества выплавляемого чугуна и способа ведения доменной плавки. Интенсификация доменного производства кислородом, повышение давления под колошником, увеличение объёма доменных печей и другие технические мероприятия привели к значительному снижению удельного выхода и темпов роста ресурсов доменного газа по сравнению с ростом выплавки чугуна.

Технический прогресс в доменном производстве приводит к дальнейшему снижению ресурсов доменного газа.

Основным недостатком доменного газа является большое содержание балласта (около 70%). Доменный газ в обогащённом виде – в результате очистки от азота, в металлургическом производстве используется как восстановитель.

Коксовый газ

Коксовый газ, как побочный продукт термической переработки коксующихся углей, является более эффективным газообразным топливом по сравнению с доменным газом. Благодаря достаточно высокой калорийности и высокой температуре горения, коксовый газ можно применять во всех металлургических процессах и энергетических установках. В таблице 1.7 показан состав коксового газа.

Таблица 1.7

Компоненты	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C _n H _m	N ₂	O ₂
Содержание в %	2 - 4	6 - 8	55 - 62	24 - 28	2 - 3	3 - 6	0,4 – 0,8

Коксовый газ имеет теплоту сгорания 17800 – 18300 КДж/кг, и плотность 0,4 – 0,55 кг/м³. Он способен взрываться при определённых соотношениях в смеси с воздухом. Коксовый газ является хорошим сырьём для химической промышленности, для выработки химических удобрений. Ресурсы коксового газа постоянно возрастают и находятся в прямой зависимости от объёма производства кокса.

Коксовый газ в основном применяется для металлургического производства - доменные печи, плавильные печи, нагревательные печи прокатных станков, энергетические установки.

Светильный газ

Светильный газ получается путём сухой перегонки газовых каменных углей при высоких температурах. Газ отличается высоким содержанием метана и пониженным содержанием водорода.

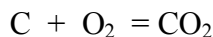
Состав светильного газа: 5,0% CO₂, 5,0% CO, 36%CH₄, 5,0% C_m H_n, 42,0% H₂, 7,0%N₂. Q_p^H = 20112 кДж /м³.

Генераторные газы

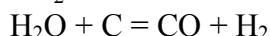
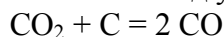
Представляют собой продукты безостаточной газификации твёрдого топлива. Газификация может быть проведена при помощи кислорода, вводимого с воздухом или водяного пара. Аппарат, в котором твёрдое топливо превращается в газообразное, называется газогенератором, а процесс газификации - газогенераторным.

Газогенератор представляет собой шахту – железный кожух рис 1.1. Изнутри шахта футерована шамотным кирпичом. Топливо загружается сверху через загрузочное устройство. Дутьё (воздух, водяной пар) поступает снизу под колосниковую решётку. Образующийся при газификации золу и шлак удаляют снизу. Полученный генераторный газ отводят из верхней части генератора.

Загруженное в газогенератор твёрдое топливо опускается навстречу газовому потоку. Поступающий воздух (или водяной пар) проходит сначала слой шлаков, при этом он несколько подогревается и распределяется по сечению шахты газогенератора. Затем воздух (или водяной пар) попадает в слой раскалённого кокса и вступает в реакцию с углеродом:



Диоксид углерода и пары воды, захватываемые газовым потоком, восстанавливаются углеродом раскалённого кокса в оксид углерода и водород:



Следует отметить, что при газификации топлива в реакциях газообразования всегда принимают участие пары воды.

При продувке слоя топлива воздухом образуется воздушный газ. Он содержит большое количество оксида углерода 34,7%, незначительное количество диоксида углерода и 65,3 % N₂.

Если вместо воздуха к раскалённому углероду подвести водяной пар, то получим водяной газ. Водяной газ содержит: 3 – 7% CO₂, 3 – 5% N₂ и 0,5 – 1,0% CH₄. Теплота сгорания его составляет 9818 – 10475 кДж/м³.

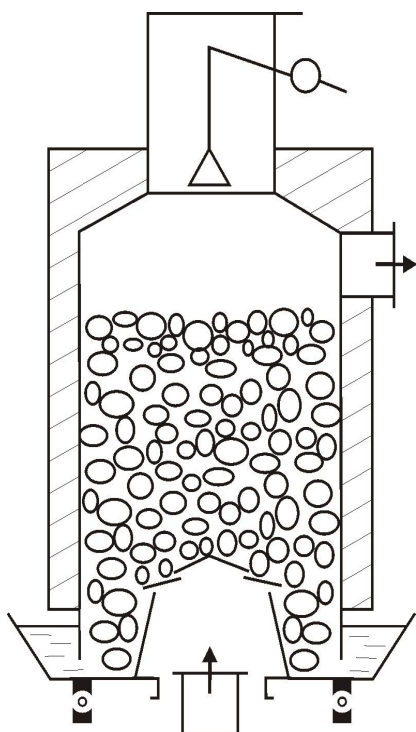


Рис.1.1- Схема газогенератора

1.2 Общая характеристика топлива

К общей характеристики топлива относятся классификация по происхождению и агрегатному состоянию, химический состав и количество тепла, которое выделяется при сгорании топлива.

1.2.1 Классификация топлива

В основном топливо классифицируют по его происхождению и агрегатному состоянию. В соответствии с этим топливо всех видов подразделяют на естественное и искусственное, каждое из которых в свою очередь подразделяют на твёрдое, жидкое и газообразное. Общая квалификация различных видов топлива приведена в таблице 1.8.

Таблица 1.8

Агрегатное состояние топлива	Происхождение	
	Естественное	Искусственное
Твёрдое	Дрова, торф, бурый уголь, каменный уголь, антрациты, горючие сланцы.	Древесный уголь, кокс, угольная пыль
Жидкое	Нефть	Бензин, керосин, мазут, спирт, каменноугольная смола и др.
Газообразное	Природный газ	Коксовый, доменный, светильный, генераторный, водяной газы

1.2.2 Химический состав топлива.

Кроме сжигания, топливо в некоторых случаях подвергают нагреванию для технологической переработки (например, для получения кокса). Количество выделяемого при горении тепла и физико – химические процессы при нагревании в значительной степени зависят от химического состава топлива. Топливо, подавляющего большинства разновидностей – органического происхождения, поэтому основным его составляющими являются углерод и водород. В составе топлива обычно находятся кислород, азот и сера также в связанном виде. Перечисленные элементы образуют различные соединения, составляющие основу топлива. Кроме того, в топливе всегда присутствуют вода и зола.

Зола – это негорючая минеральная часть топлива, состоящая из Al_2O_3 , SiO_2 , CaO , Fe_2O_3 и др.

Содержащаяся в топливе сера может встречаться в виде органической серы (S_o), колчеданной (S_k) и сульфатной (S_c). Органическая сера связана с другими составляющими органической части топлива, колчеданная сера связана с железом в виде FeS_2 , а сульфатная сера входит в сернокислые соединения типа $CaSO_4$, $FeSO_4$. Общее количество серы, таким образом, равно:

$$S_{об} = S_o + S_k + S_c$$

Органическая и колчеданная сера участвует в процессах горения топлива. Сульфатная сера в горении не участвует.

Влага, которая содержится в топливе, подразделяется на гигроскопическую, химически связанную и внешнюю, которая удерживается механически и теряется при сушке.

Чтобы установить состав топлива, проводят технический и химический анализ. При техническом анализе определяют влагу, летучие и золу. Химический анализ можно выполнить как по элементарному составу (C, H, O, N, S), так и путём определения содержания отдельных химических соединений (CO , CO_2 , CH_4 и др.). Первый метод анализа применяют для твёрдого и жидкого топлива, второй – для газообразного.

Элементарный анализ проводят с целью определения содержания углерода, водорода, кислорода, азота и серы в процентах по массе. Однако такой метод анализа не даёт возможности судить о том, из каких соединений этих элементов состоит топливо. Элементарный анализ (табл.1.9) даёт представление о топливе как о механической смеси отдельных элементов, что достаточно для проведения необходимых расчётов сжигания топлива.

Таблица 1.9

Индексы	Элементы						
	C	H	O	N	S	A	W
о	Органическая масса						
г	Горючая масса						
с	Сухая масса						
р	Рабочее топливо						

В соответствии с элементарным анализом в топливе различают органическую массу, горючую массу, сухую массу и рабочее топливо. Органическая масса топлива даёт возможность судить о его природе, горючая масса – о топливе как о горючем.

При записи результатов анализа пользуются указанными в приведённой схеме индексом, например C^o обозначает содержание углерода в органической массе; S^r – содержание серы в горючей массе; A^c – содержание золы в сухой массе и W^p – содержание влаги в рабочем топливе. Естественно, что состав рабочего топлива записывают так:

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + A^p + W^p = 100 \%$$

Перерасчёт состава угля из одной массы в другую легко выполнить по следующим выражениям (%);

$$x^o = x^r \frac{100}{100 - S^r};$$

$$x^o = x^c \frac{100}{100 - (S^c + A^c)};$$

$$x^o = x^p \frac{100}{100 - (S^p + A^p + W^p)};$$

$$x^r = x^c \frac{100}{100 - A^c};$$

$$x^r = x^p \frac{100}{100 - (A^p + W^p)};$$

$$x^c = x^p \frac{100}{100 - W^p};$$

где x^c - содержание какого-либо элемента в сухой массе, %
 x^p - содержание какого-либо элемента в рабочем топливе, %;
 x^r - содержание какого-либо элемента в горючей массе, %;
 x^o - содержание какого-либо элемента в органической массе, %.

Пример 1.1

Определить состав рабочего топлива по следующим данным:

$C^o = 80,0\%$; $H^o = 8,0\%$; $O^o = 9,0\%$; $N^o = 3,0\%$; $S^c = 1,5\%$; $A^c = 10\%$; $W^p = 2,0\%$.

$$S^p = S^c \frac{100 - W^p}{100} = 1,5 \frac{100 - 2}{100} = 1,47\%$$

$$A^p = A^c \frac{100 - W^p}{100} = 10 \frac{100 - 2}{100} = 9,8\%$$

$$C^p = C^o \frac{100 - (S^p + A^p + W^p)}{100} = 80 \frac{100 (1,47 + 9,8 + 2,0)}{100} = 80 * 0,8673 = 69,4 \%$$

$$\begin{aligned}
 H^p &= 8 * 0,8673 = 6,94\% \\
 O^p &= 9 * 0,8673 = 7,80\% \\
 N^p &= 3 * 0,8673 = 2,59\% \\
 W^p &= 2,0
 \end{aligned}$$

Итого 100 %

Химический анализ газообразного топлива можно выполнить путём последовательного поглощения отдельных составляющих различными реактивами. Его результаты, выраженные в объёмных процентах, показывают содержание составных частей газообразной смеси CO_2 , CO , CH_4 , O_2 , C_mH_n . Количество азота N_2 определяют по разности.

Подобный анализ по химическим соединениям, составляющим топливо, позволяет судить о его свойствах. Анализ с последовательным поглощением отдельных составляющих характеризует состав сухого топлива, так как влага, содержащаяся в газе, в процессе анализа не учитывается. Вместе с тем в газах в большинстве случаев содержится влага, которую обычно определяют как массу воды в единице объёма сухого газа W (г/м³). В связи с этим бывает необходимо пересчитывать состав сухого газа с учетом влаги, т. е. определять состав влажного газа.

Подобный пересчёт выполняют следующим образом:

1 кмоль H_2O составляет 18 кг и занимает объём 22,42 м³, следовательно, 1 кг водяного пара занимает объём:

$$V = \frac{22,42}{18} = 1,242 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Количество водяного пара W будет занимать объём, равный $\frac{1,242}{1000} W \text{ м}^3$, а в пересчёте на 100 м³ газа объём водяного пара составит:

$$\frac{100 * 1,242}{1000} W = 0,1242 W.$$

Исходя из этого, состав влажного газа можно получить следующим образом:

$$CO_2^{вл} = CO_2^c \frac{100}{100 + 0,1242W} \quad \%;$$

$$CO^{вл} = CO^c \frac{100}{100 + 0,1242W} \quad \%;$$

$$H_2O^{вл} = \frac{0,1242 W * 100}{100 + 0,1242W} \quad \% .$$

Итого 100%

1.2.3 Теплота сгорания топлива

При сжигании топлива выделяется тепловая энергия. Количество выделившегося тепла тесно связано с химическим составом топлива.

Количество тепла, которое выделяется при сжигании единицы топлива, называется теплотой сгорания топлива, её размерность кДж/кг; кДж/м³ или кДж/кмоль. В технике различают высшая и низшая теплота сгорания топлива.

Высшая теплота сгорания Q_p^B соответствует условию, что все водяные пары, образовавшиеся при горении, доводятся до жидкого состояния при 273 °К. При этом возвращается следующее количество тепла:

Скрытая теплота испарения 1 кг H₂O равна 2258,41 кДж
Теплота нагрева 1кг H₂O от 273до 373°К равна 418,68 кДж

Итого 2677,09 кДж

Низшая теплота сгорания Q_p^H соответствует условию, что содержащиеся в продуктах сгорания водяной пар охлаждён от 373 до 293 °К. При этом освобождается количество тепла, равное

$$1,0 * 2,0087 (373 - 293) = 160,70 \text{ кДж/кг,}$$

где 2,0087 кДж/(кг°С) – теплоёмкость паров воды.

Низшая теплота сгорания топлива больше соответствует действительному положению, так как практически при сжигании топлива пары воды в газообразном состоянии уносятся с продуктами сгорания. Количественная разница между Q_p^B и Q_p^H на 1кг H₂O составляет:

$$Q_p^B - Q_p^H = 2677,09 - 160,70 = 2516,39 \text{ кДж/кг}$$

Так как в продуктах сгорания содержится влага W_1 и вода, полученная от сгорания водорода $W_2 = H_2O / H_2 = 18/2 H = 9H$, разность между высшей и низшей теплотой сгорания на 1 кг топлива составляет

$$Q_p^B - Q_p^H = 2516,39 (W_1 + W_2) = 2516,39 (W_1 + 9H) \quad \text{кДж/кг;}$$

или, если W_1 и H выражены в процентах, то

$$Q_p^B - Q_p^H = 25,1639 (W^p + 9H^p) \text{ кДж/кг;}$$

При использовании топлива для практических целей необходимо определить его теплоту сгорания. Теплоту сгорания топлива можно измерять путём сжигания навески или определённого объёма топлива в специальных приборах – калориметрах. В инженерной практике теплоту сгорания топлива часто определяют расчётным путём на основании данных элементарного анализа с использованием тепловых эффектов реакций горения отдельных составляющих топлива.

Теплоту сгорания твёрдого и жидкого топлив на основании элементарного анализа обычно определяют по формулам, полученным эмпирическим путём. Для отечественных видов твёрдого и жидкого топлива достаточно точные результаты даёт формула

Д.И. Менделеева

$$Q_p^B = 4,187[81 C^p + 300H^p - 26(O^p - S^p)] \quad \text{кДж/кг.}$$

При определении низшей теплоты сгорания формула Д.И. Менделеева приобретает вид:

$$Q_p^H = 4,187[81 C^p + 300H^p - 26(O^p - S^p) - (6 W^p + 9H^p)] \quad \text{кДж/кг.}$$

Для каменных углей иногда применяют формулу Дюлонга, по которой определяют высшую теплоту сгорания топлива

$$Q_p^B = 4,187[80,8C^p + 344,6(H^p - O^p/8) + 25C^p] \quad \text{кДж/кг.}$$

Пример1.2

Определить низшую теплоту сгорания каменного угля следующего состава:

$$C^p = 80\%, O^p = 3\%, H^p = 6\%, S^p = 1\%, A^p = 6\%, W^p = 4\%.$$

Для определения используем формулу Д.И.Менделеева.

$$Q_p^H = 4,187[81*80 + 300*6 - 26(3 - 1) - (6*4 + 9*6)] = 34383,64 \text{ кДж/кг.}$$

Теплота сгорания газообразного топлива может быть с достаточной точностью получена расчётным путём, если известны соединения, составляющие горючую массу топлива и теплота сгораний этих соединений (таблица 1.10).

Таблица 1.10

Реакция	Тепловой эффект реакции		
	КДж/кмоль	КДж/кг	КДж/м ³
$C + O_2 = CO_2$	+408860	34070	-
$CO + 0,5 O_2 = CO_2$	+285640	-	12645
$CO + (H_2O)_n = CO_2 + H_2$	+ 43590	-	-
$C + (H_2O)_n = CO + H_2$	-118897	- 9902	-
$H_2 + 0,5 O_2 = (H_2O)_ж$	+286223	+143112	+12770
$H_2 + 0,5 O_2 = (H_2O)_n$	+241800	+121025	+10760
$C H_4 + 2 O_2 = CO_2 + (2H_2O)_n$	+805560	-	+35800
$C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + (2H_2O)_n$	+1341514	-	+59037
$H_2S + 1,5O_2 = SO_2 + (H_2O)_n$	+519188	-	-

Следовательно, если известен состав газообразного топлива, то не представляет труда подсчитать его теплоту сгорания.

Пример 1.3

Определить низшую теплоту сгорания газа, содержащего 20% CO₂, 6% CO, 60% H₂, 23% CH₄, и 9% N₂.

$$Q_p^H = \frac{285640 * CO + 241800 * H + 805560 * CH_4}{22,4} = \frac{285640 * 0,06 + 241800 * 0,6 + 805560 * 0,23}{22,4} = 15513,26 \text{ кДж/м}^3$$

Чтобы сравнить топливо различных видов, введено понятие условного топлива, характеризуемого теплотой сгорания 29310 кДж/кг. Для перевода любого топлива в условное топливо следует разделить величину его теплоты сгорания на 29310 кДж/кг, т.е. найти эквивалент данного топлива.

1.3 Расчёт горения топлива

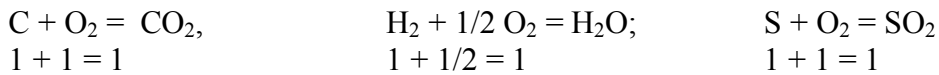
1.3.1 Расход воздуха, состав и количество продуктов сгорания

Горение соответствует процессу окисления – соединению кислорода с горючими элементами топлива происходящему с большой скоростью с выделением тепла и света. Для возникновения горения необходимо, чтобы реагирующие вещества – горючее и кислород – были доведены до температуры воспламенения, т.е. до температуры при которой может происходить реакция горения (таблица 1.11). При расчёте горения топлива определяют количество расходуемого при сжигании воздуха, количество и состав образующихся продуктов горения.

Таблица 1.11.- Температура воспламенения топлива.

Топливо	Температура воспламенения, °С	Топливо	Температура воспламенения, °С
Каменный уголь	400 – 500	Генераторный газ	700 – 800
Антрацит	700 - 800	Доменный газ	700 – 800
Бурый уголь	250 – 450	Коксовальный газ	550 – 650
Кокс	700	Природный газ	700 - 850
Мазут	580		

Эти расчёты могут быть выполнены по данным элементарного состава топлива на основе уравнений горения. При этом по предложению французского учёного Дюлонга, считают, что весь кислород, находящийся в топливе, при определении потребного количества кислорода уменьшают на величину O/8. Процесс горения твёрдого или жидкого топлива можно представить в молекулярных соотношениях следующими уравнениями:



Т. е. 1 кмоль углерода, соединяясь с 1 кмоль кислорода, даёт 1 кмоль диоксида углерода; 1 кмоль водорода, соединяясь с 0,5 кмоль кислорода, даёт 1 кмоль водяного пара; 1 кмоль серы, соединяясь с 1 кмоль кислорода даёт 1 кмоль диоксида серы. На горение 1 кмоль углерода расходуется 1 кмоль кислорода, 1 кмоль водорода - 0,5 кмоль кислорода и 1 кмоль серы - 1 кмоль кислорода. На горение 1 кг углерода потребуется 1/12 кмоль кислорода, 1 кг водорода - $0,5 \cdot 1/2 = 1/4$ кмоль кислорода и 1 кг серы - 1/32 кмоль кислорода, где 12, 2 и 32 соответственно молекулярные массы углерода, водорода и серы. Следовательно, исходя из элементарного состава топлива, количество кислорода, необходимое для сгорания топлива в теоретических условиях, можно получить из уравнения:

$$\text{O}_2 = \frac{1}{12} \cdot \frac{\text{C}}{100} + \frac{1}{4} \cdot \frac{\text{H} - \text{O}/8}{100} + \frac{1}{32} \cdot \frac{\text{S}}{100} \quad \text{кмоль/кг}$$

или

$$\text{O}_2 = \left(\frac{1}{12} \cdot \frac{\text{C}}{100} + \frac{1}{4} \cdot \frac{\text{H} - \text{O}/8}{100} + \frac{1}{32} \cdot \frac{\text{S}}{100} \right) \cdot 22,4 \quad \text{м}^3/\text{кг},$$

где: C, H, O и S – процентное содержание в топливе углерода, водорода, кислорода и серы;

22,4 – объём 1 кмоль кислорода в 1 м³ при нормальных условиях.

Количество азота воздуха, введённого с этим количеством кислорода, будет:

$$\text{N}_2 = \frac{1/12 \text{C} + 1/4(\text{H} - \text{O}/8) + 1/32 \text{S}}{100} \cdot 22,4 \cdot \frac{79}{21};$$

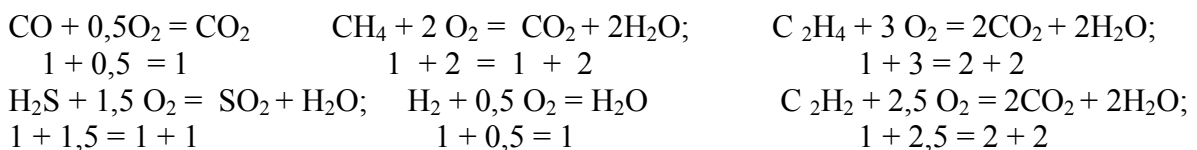
где $\frac{79}{21}$ – объёмное отношение содержания азота и кислорода в воздухе.

Количество воздуха будет

$$\text{L}_0 = \frac{1/12 \text{C} + 1/4(\text{H} - \text{O}/8) + 1/32 \text{S}}{100} \cdot 22,4 + \frac{1/12 \text{C} + 1/4(\text{H} - \text{O}/8) + 1/32 \text{S}}{100} \cdot 22,4 \cdot \frac{79}{21} =$$

$$= 0,089\text{C} + 0,267\text{H} + 0,033(\text{S} - \text{O}) \quad \text{м}^3/\text{кг},$$

При расчёте горения газообразного топлива процент каждого газа, входящего в состав топлива, принимают за 1 кмоль его в 100 кмоль смеси. Исходя из уравнений горения газов:



получают потребное количество кислорода и азота:

$$\text{O}_2 = 0,01(0,5\text{CO} + 2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_4 + 1,5\text{H}_2\text{S} + 0,5\text{H}_2 + 2,5\text{C}_2\text{H}_2 - \text{O}_2) \quad \text{м}^3/\text{м}^3;$$

$$\text{N}_2 = 0,01 \cdot 79/21 (0,5\text{CO} + 2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_4 + 1,5 \text{H}_2\text{S} + 2,5\text{C}_2\text{H}_2 + 0,5\text{H}_2 - \text{O}_2). \quad \text{м}^3/\text{м}^3.$$

Количество воздуха будет:

$$\text{L}_0 = \text{O}_2 + \text{N}_2 = 0,04762(0,5\text{CO} + 2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_4 + 1,5\text{H}_2\text{S} + 0,5\text{H}_2 + 2,5\text{C}_2\text{H}_2 - \text{O}_2) \quad \text{м}^3/\text{м}^3.$$

В приведённых расчётах определялось теоретическое количество воздуха, необходимого для полного сгорания 1 кг, или 1 м³ топлива, при условии полного отсутствия в продуктах горения кислорода. Практически для полного сгорания топлива требуется подвод воздуха в количестве, превышающем теоретически необходимое, так как трудно добиться идеального смешения воздуха с топливом. Отношение практически введенного воздуха к теоретически необходимому, носит название коэффициента избытка воздуха.

$$n = L_n / L_o$$

где: L_n – практически введённое количество воздуха в м³ (на 1 кг, или на 1 м³),

L_o – теоретически необходимое количество воздуха в м³ (на 1 кг, или на 1 м³).

Чем хуже смешение воздуха с топливом, тем больший коэффициент избытка воздуха приходится принимать для полного его сжигания. Наиболее трудно добиться хорошего смешения при сжигании твёрдого топлива и легче при сжигании газообразного. Исходя из этого, коэффициент избытка воздуха при сжигании твёрдого топлива принимают $n = 1,3 - 1,5$ для жидкого $n = 1,1 - 1,15$ и газообразного $n = 1,05 - 1,1$.

Количество и состав продуктов горения топлива определяют аналогично расчёту расхода воздуха, исходя из приведённых выше уравнений горения. При сгорании твёрдого или жидкого топлива 1 кг С даёт 1/12 кмоль, или 1/12 * 22,4 м³ CO₂; 1 кг Н₂ даёт 1/2 кмоль, или 1/2 * 22,4 м³ H₂O; 1 кг S даёт 1/32 кмоль, или 1/32 * 22,4 м³ S O₂. К полученным от соединения с кислородом С, Н и S продуктам горения следует добавить влагу H₂O = W/18 * 22,4 м³ и азот – N₂ = N/28 * 22,4 м³, содержащиеся в топливе и переходящие в продукты горения. Количество продуктов сгорания 1 кг жидкого или твёрдого топлива будет равно:

$$V_o = 0,224 [C/12 + H/2 + W/18 + S/32 + N/28 + (C/12 + \frac{H - O/8}{4} + S/32) * 79/21] =$$

$$= 0,224 [W/18 + \frac{H + O/8}{4} + N/28 + (C/12 + \frac{H - O/8}{4} + S/32) * 1/0,21] \text{ м}^3/\text{кг};$$

где С, Н, S, О, W и N – соответственно содержание в процентах по массе элементарного состава топлива, а

$$0,224 (C/12 + \frac{H - O/8}{4} + S/32) * 79/21 - \text{ количество азота воздуха.}$$

Количество продуктов сгорания 1 м³ газообразного топлива равно:

$$V_o = [CO_2 + CO + 3CH_4 + 4C_2H_4 + 3C_2H_2 + H_2 + 2H_2S + N_2 + W + 79/21(CO/2 + 2CH_4 + 3C_2H_4 + 5/2C_2H_2 + H_2/2 + 3/2 H_2S - O_2)] * 0,01 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

где CO₂, CO, CH₄, C₂H₄, C₂H₂, H₂, H₂S, N₂, W соответствуют элементарному составу газа в объёмных процентах, а

$$79/21(CO/2 + 2CH_4 + 3C_2H_4 + 5/2C_2H_2 + H_2/2 + 3/2 H_2S - O_2) * 0,01 - \text{ количество азота воздуха.}$$

Выше определяли количество продуктов горения при теоретическом количестве воздуха. При коэффициенте избытка воздуха больше 1 в продукты сгорания перейдёт избыточный воздух $L_n - L_o = L_o (n - 1)$ и количество их будет равно:

$$V_n = V_o + L_o(n - 1) \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

В связи с тем, что расчёт горения топлива по элементарному составу трудоёмок и зачастую при проведении теплотехнических расчётов отсутствует полный анализ, обычно пользуются формулами приближённого расчёта горения, приведённые в таблице 1.12.

Таблица 1.12

Определённая величина	Размерность	Формула
Теоретическое количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг твёрдого топлива L_o .	$\text{м}^3/\text{кг}$	$\frac{1,01}{4187} Q_n^p + 0,5$
Теоретическое количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг жидкого топлива L_o .	$\text{м}^3/\text{кг}$	$\frac{0,85}{4187} Q_n^p + 2$
Теоретическое количество воздуха, необходимое для сгорания 1 м^3 газообразного топлива L_o , при $Q_n^p < 16750 \text{кдж}/\text{м}^3$	$\text{м}^3/\text{м}^3$	$\frac{0,875}{4187} Q_n^p$
Теоретическое количество воздуха, необходимое для сгорания 1 м^3 газообразного топлива L_o , при $Q_n^p > 16750 \text{кдж}/\text{м}^3$	$\text{м}^3/\text{м}^3$	$\frac{1,09}{4187} Q_n^p - 0,25$
Теоретическое количество продуктов сгорания, от 1 кг твёрдого топлива V_o .	$\text{м}^3/\text{кг}$	$\frac{0,89}{4187} Q_n^p + 1,65$
Теоретическое количество продуктов сгорания, от 1 кг жидкого топлива V_o .	$\text{м}^3/\text{кг}$	$\frac{1,11}{4187} Q_n^p$
Теоретическое количество продуктов сгорания, от 1 м^3 газообразного топлива V_o , с $Q_n^p < 16750 \text{кдж}/\text{м}^3$	$\text{м}^3/\text{м}^3$	$\frac{0,725}{4187} Q_n^p + 1$
Теоретическое количество продуктов сгорания, от 1 м^3 газообразного топлива V_o , с $Q_n^p > 16750 \text{кдж}/\text{м}^3$	$\text{м}^3/\text{м}^3$	$\frac{1,14}{4187} Q_n^p + 0,25$

Пример 1.4 Определить количество воздуха, необходимое для сгорания природного газа с $Q_n^p = 35600 \text{кдж}/\text{м}^3$ и объём продуктов горения при коэффициенте избытка воздуха $n = 1,05$.

$$L_o = \frac{1,09}{4187} Q_n^p - 0,25 = \frac{1,09}{4187} 35600 - 0,25 = 9,05 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$$L_n = L_o \cdot n = 9,05 \cdot 1,05 = 9,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$$V_o = \frac{1,14}{4187} Q_n^p + 0,25 = \frac{1,14}{4187} 35600 + 0,25 = 9,95 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$$V_n = V_o + L_o(n - 1) = 9,95 + 9,05(1,05 - 1) = 10,4 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

1.3.2 Определение температуры горения топлива.

В расчёт горения топлива входит также определение температура его горения. Различают калориметрическую и действительную температуру горения топлива.

Калориметрической температурой горения называется та температура, которую приобрели образующиеся продукты горения при полном сгорании топлива и при условии, что тепло не уходит в окружающее пространство, т.е. остаётся в продуктах горения. В этом случае теплосодержание продуктов горения 1 кг или 1 м^3 топлива будет равно:

$$Q_n^p = c^{\text{вд}} t_k V_n^{\text{вд}} \quad \text{или} \quad t_k = \frac{Q_n^p}{c^{\text{вд}} V_n^{\text{вд}}}, \quad (1.1)$$

где $c^{вд}$ - средняя теплоёмкость влажных продуктов горения при давлении 760 мм.рт.ст. в пределах температур от 0 °С до t_k в кДж/(м³ град);

t_k – калориметрическая температура горения в °С;

$V_n^{вд}$ - объём влажных продуктов горения на 1 кг или 1 м³ топлива в м³.

Q_n^p можно представить в виде:

$$Q_n^p = t_k(C_{CO_2} V_{CO_2} + C_{CO} V_{CO} + C_{H_2O} V_{H_2O} + \dots),$$

ГДЕ C_{CO_2} , C_{CO} , C_{H_2O} - теплоёмкости кДж/(м³ град);

V_{CO_2} , V_{CO} , V_{H_2O} - объёмы компонентов продуктов горения в м³ а 1 кг, или на 1 м³ топлива.

Так как теплоёмкость зависит от температуры, то в обоих случаях получают одно уравнение с двумя неизвестными. Решение этих уравнений выполняют методом интерполяции. Для практических целей можно пользоваться более простой формулой (1.1), дающей достаточно точный результат. Средние теплоёмкости составляющих продуктов горения и приближённые теплоёмкости продуктов горения в целом приведены в Приложении 1.

Пример 1.5

Определить калориметрическую температуру горения природного газа $Q_n^p = 35600$ кДж/м³ при коэффициенте избытка воздуха $n = 1,05$.

Как посчитано в предыдущем примере, объём продуктов горения

$V_n^{вд} = 10,4$ м³/м³, откуда

$$i^{вд} = \frac{35600}{10,4} = 3420 \text{ кДж/м}^3$$

Задаёмся температурой 2200 °С; при этом теплоёмкость продуктов горения (по приложению 1) равна 1,69 кДж/(м³ град), а $i^{вд} = 1,69 \cdot 2200 = 3720$ кДж/м³, что больше 3420 кДж/м³. Задаёмся температурой 2000 °С, этой температуре $i^{вд} = 1,67 \cdot 2000 = 3340$ кДж/м³, что меньше 3420 кДж/м³.

Очевидно калориметрическая температура горения лежит между 2200 и 2000 °С.

200°С(3720 -3340) = 380 кДж/м³,

Δ t°С(3420-3340)= 80 кДж/м³,

$$\Delta t^\circ\text{C} = \frac{200 \cdot 80}{380} = 43^\circ; \quad t_k = 2000 + 43 = 2043^\circ\text{C}.$$

Калориметрическую температуру горения можно повысить путём подогрева воздуха или воздуха и газа (при работе на газообразном топливе). В этом случае теплосодержание продуктов горения повышается за счёт физического тепла, вносимого подогретым воздухом или воздухом и газом, следовательно, повышается температура горения.

$$t_k = \frac{Q_n^p + c_g t_g + c_v t_v L_n}{i^{вд} \cdot V_n^{вд}} \text{ } ^\circ\text{C} ;$$

где c_g и c_v - теплоёмкости газа и воздуха в кДж/(м³ град);

t_g и t_v - температура нагрева газа и воздуха в °С;

L_n – практическое количество воздуха в м³/ м³;

$i^{вд}$ – теплосодержание отходящих газов кДж/м³, определяется по таблице

(Приложение 1).

Действительно температура горения всегда ниже калориметрической, так как, во первых, при высокой температуре происходит разложение углекислоты и водяного пара, сопровождающееся поглощением тепла, и, во вторых, во время горения часть тепла теряется через кладку в окружающую среду и передаётся материалу помещённому в печи.

Отношение действительной температуры к калориметрической называется пирометрическим коэффициентом. Для нагревательных тепловых агрегатов он лежит в пределах от - 0,5 до 0,85.

Подогрев воздуха и газа часто осуществляют с целью экономии топлива и улучшения условий горения.

Контрольные вопросы по части 1 «Топливо»

- 1 Виды и теплофизические характеристики твёрдого топлива.
- 2 Виды и теплофизические характеристики жидкого топлива.
- 3 Природный газ и его преимущества по сравнению с другими видами топлива.
- 4 Теплофизические характеристики природного газа.
- 5 Классификация топлива. Химический состав топлива.
- 6 Какие элементы входят в состав органической, горючей, сухой и рабочей массы топлива.
- 7 Теплота сгорания топлива.
- 8 Формула Менделеева. Формула Дюлонга.
- 9 Определение количества кислорода для сжигания топлива.
- 10 Определение коэффициента избытка воздуха.
- 11 Определение количества и состав продуктов горения топлива.
- 12 Определение температуры горения топлива.
- 13 Определение идеального газа.

Часть II

Техническая термодинамика

Глава 2 Рабочее тело и основные законы идеального газа

2.1 Основные понятия о термодинамике

Термодинамика – наука, изучающая превращение энергии в различных процессах, сопровождающиеся тепловыми эффектами. Она занимается поисками соотношений между различными свойствами вещества, не изучая при этом его внутреннего строения. Методы термодинамики основаны на универсальном законе природы – законе сохранения энергии. Сущность термодинамики содержится в нескольких простых утверждениях, называемых началами (законами) термодинамики.

В первоначальном виде термодинамика сложилась как учение об основах теории теплового двигателя. В настоящее время основные законы термодинамики научные открытия и исследования широко применяются в самых различных областях знаний. Изучением способов превращения теплоты в механическую работу, т.е. разработкой теории теплоэнергетических установок, занимается один из разделов термодинамики, называемый технической термодинамикой.

Техническая термодинамика как наука окончательно сформировалась к концу XIX века. Начало же его развития следует отнести к моменту изготовления Галилео Галилеем первого термометра (1597 г.).

Ведущее место в создании термодинамики принадлежит работам Р. Майера (1842 г.), Д. Джоуля (1843 – 1846 г.), Э. Х. Ленца (1844 г.) и Гельмгольца, которые раскрыли сущность закона сохранения энергии. С. Карно (1824 г.), Р. Клазиус (1854 г.) и В. Томсон (позднее лорд Кельвин) (1856 г.) открыли второй закон (начало) термодинамики. В Нерст (1906 г.) сформулировал теорему, имеющую важное значение для термодинамики, которую называют третьим законом термодинамики.

В создании молекулярно-кинетической теории тепловых процессов существенную роль сыграли работы Д. Бернулли (1738 г.), М. Ломоносова (1758 г.), Д. Максвелла (1860 г.), Л. Больцмана (1877 г.), У. Гиббса (1880 г.), Д. И. Менделеева (1860 г.).

Большой вклад в теплофизику внесли и российские учёные: Э. Х. Ленц открыл закон перехода электрической энергии в тепловую; И. П. Алымов, М. Ф. Окатов и другие создали классические труды по термодинамике; А. Г. Столетов изучил и систематизировал законы конвективного и лучистого теплообмена; М. В. Кирпичёв и А. А. Гухман разработали теорию теплового моделирования; К. Э. Циолковский заложил основы расчёта многоступенчатого ракетного двигателя по схеме которого работают современные ракеты.

2.2 Агрегатное состояние вещества. Идеальный газ

Молекулы любого вещества, взаимодействуя друг с другом, находятся в непрерывном движении.

Агрегатное состояние вещества определяется величиной межмолекулярных сил взаимодействия и расстояниями между молекулами. В твёрдом и жидком состояниях молекулы вещества находятся на сравнительно небольших расстояниях друг от друга и обладают такой силой притяжения, что тела сохраняют свой объём, а твёрдое тело сохраняет ещё и форму. Силы взаимодействия между молекулами газа, расстояние между которыми значительно больше их размеров, намного меньше сил, действующих между молекулами твёрдого и жидкого тел. Поэтому любое количество газа даже самое малое заполняет весь объём, в который его заключают, как бы велик этот объём не был.

Способность газа заполнять весь объём, в который его помещают, подтверждает, что молекулы газа находятся в постоянном беспорядочном и хаотичном движении.

Так же как и любое тело, газ обладает внутренней энергией всех видов движения микрочастиц. Она складывается из энергии поступательного, вращательного и

колебательного движения молекул, энергии молекулярного взаимодействия, энергии внутриатомного и внутриядерного взаимодействия и др.

Следует сказать, что для изучения термодинамических процессов нет необходимости знать, из каких форм движения материи складывается внутренняя энергия.

Наиболее распространёнными газами применяемыми в технике являются: кислород O_2 , азот N_2 , оксид углерода CO , диоксид углерода CO_2 , метан CH_4 , водяной пар H_2O и др. Из газовых смесей наиболее важными являются: воздух, природный газ, продукты сгорания топлива в топках тепловых агрегатов и в двигателях внутреннего сгорания.

Упрощённой моделью газообразного тела является так называемый *идеальный газ*, у которого объём занимаемый его молекулами, мал по сравнению с объёмом всего рассматриваемого газа: молекулы газа рассматриваются как беспорядочно движущиеся материальные точки, распределённые равномерно в объёме газа. Силами взаимодействия между молекулами идеального газа можно пренебречь.

Идеальный газ – это модель, которая отражает свойства реальных газов с определённым приближением. Изучение законов идеального газа помогает определять поведение реального газа в различных условиях. Степень расхождения свойств идеального и реального газов зависит от условий, в которых находится газ. Чем ниже давление и выше температура, тем ближе свойства реального газа к свойствам идеального. Все газовые законы наиболее просто формулируются для идеального газа.

В дальнейшем все выводы и рассуждения будут относиться к идеальному газу. Отдельные случаи, относящиеся к реальному газу, будут оговорены.

2.3 Рабочее тело и параметры его состояния

Техническая термодинамика как наука сформировалась на основе изучения взаимных превращений работы и теплоты в тепловых двигателях (паровых машинах, турбинах и двигателях внутреннего сгорания).

Рабочий процесс теплового двигателя любого типа может быть осуществлён при наличии источника теплоты с температурой T_1 , называемого нагревателем, и охладителя с температурой $T_2 < T_1$, называемого холодильником. При непосредственном соприкосновении нагревателя с холодильником теплота от первого будет переходить второму, но работы никакой не будет совершено. Чтобы совершить работу в тепловом двигателе необходимо привлечь ещё одно тело, которое называют *рабочим телом*. В двигателях внутреннего сгорания рабочим телом является газ, а в паровых турбинах водяной пар. Нагревателем будут продукты сгорания топлива, а охладителем (холодильник) – атмосфера, куда выбрасывается отработавший газ, или конденсатор, принимающий отработавший водяной пар.

При термодинамическом исследовании явлений в зависимости от конкретной задачи выделяется определённая термодинамическая система. Рабочее тело, находящееся в цилиндре и отделённое поршнем от внешней среды, является типичным примером термодинамической системы. Тела, которые в той или иной мере взаимодействуют с системой и оказывают влияние на её свойства, называют внешней средой. К ним можно отнести цилиндр, поршень, воздух окружающий их и т.п. Взаимодействие системы с внешней средой совершается на *контрольной поверхности*, отделяющей систему от внешней среды. Так, например, в цилиндре, заполненном газом, контрольной поверхностью являются внутренние поверхности цилиндра и поршня.

Для изучения состояния идеального газа условно допускается существование системы, идеально теплоизолированной от внешней среды. Такая система абсолютно не обменивается теплотой с внешней средой. Практически такая система существовать не может, т.к. нет абсолютных теплоизоляторов.

Термодинамический процесс - это переход термодинамической системы (рабочего тела) из одного состояния в другое под влиянием внешних воздействий.

Величины, которые характеризуют термодинамическое состояние системы, называют *параметрами состояния*. Важнейшими параметрами являются давление p , температура T и удельный объём v .

Если изменить термодинамическое состояние системы, т.е. подвести или отнять теплоту, сжать газ или дать возможность ему расшириться, то некоторые параметры или все изменят свою величину.

Давление.

Молекулы газа, заключённого в сосуде, находятся в непрерывном хаотическом движении. Они сталкиваются друг с другом и ударяются о стенки сосуда, которые испытывают воздействие сил удара молекул газа. Действие газа на стенки характеризуется давлением p , т. е. силой F действующей нормально к стенке и отнесённой к её площади A

$$p = F/A.$$

В термодинамике всегда пользуются абсолютным давлением.

Свойства газа оказывать давление на стенки сосуда, в котором он находится, является одним из основных его свойств. Именно это свойство позволило использовать газ в качестве рабочего тела в процессах преобразования энергии.

Соотношения между некоторыми единицами давления.

Единицей давления в СИ является паскаль (Па). Это давление, вызываемое силой в 1 Н, равномерно распределённое по поверхности, площадью в 1 м² (1 Па = 1 Н/ м²). Так как эта единица очень мала, то на практике давление измеряют в килопаскалях (кПа = 10³ Па) или мегапаскалях (1 МПа = 10⁶ Па).

Ниже даны соотношения между некоторыми единицами давления, встречающиеся в технической литературе.

1 атм. = 760 мм.рт.ст. = 101325 Па = 101,325 кПа; - физическая атмосфера;

1 ат = 98066,5 Па = 98,066 кПа = 0,1 МПа; - техническая атмосфера

1 мм.вод.ст. = 9,806 Па ;

1мм.рт.ст. = 133,322 Па;

1бар = 100 кПа = 0,1 МПа.

Температура

Температура – величина, характеризующая степень нагретости тела.

С точки зрения молекулярно-кинетической теории степень нагретости тела зависит от скорости хаотического движения молекул этого тела. При подводе теплоты к телу скорость движения молекул увеличивается. При этом тело нагревается, т.е. его температура поднимается. При отводе теплоты движение молекул замедляется, и тело при этом охлаждается, т. е. температура его понижается.

Таким образом, температуру следует рассматривать как меру средней кинетической энергии молекул.

Так как температура является мерой энергии, то с этой точки зрения понятно, что выбор начала отсчёта температуры является вопросом удобства и поэтому нуль температуры выбирается по соглашению. В настоящее время приняты две температурные шкалы: термодинамическая и международная практическая

Международная шкала впервые введена в 1848 г. английским учёным Кельвиным. За нуль абсолютной температуры (К) принята температура вещества (тела) в таком состоянии, в котором отсутствует хаотическое движение его молекул и атомов. По этой шкале температура всегда положительна ($T > 0$).

Согласно молекулярно-кинетической теории, абсолютная термодинамическая температура T , измеряемая в кельвинах, равна

$$T = [2/(3k)] mv^2/2,$$

где m – масса молекулы; v – средняя скорость молекулы; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

За единицу температуры по Международной практической температурной шкале принят градус Цельсия ($^{\circ}\text{C}$). Здесь за нуль температуры принята температура таяния льда. Соотношение между температурами этих шкал определяется как:

$$T = t + 273,15^{\circ},$$

где: T – абсолютная температура, K ;

t – температура, $^{\circ}\text{C}$.

2.4 Уравнение состояния идеального газа

Для вывода уравнения состояния идеального газа следует вспомнить известные из курса физики основные законы идеального газа.

Закон Бойля – Мариотта: при постоянной температуре произведение абсолютного давления на удельный объём данного газа есть величина постоянная:

$$pv = \text{const} . \quad (2.1)$$

Закон Гей – Люссака: при постоянном давлении удельный объём газа изменяется прямо пропорционально изменению абсолютных температур:

$$v_1/v_2 = T_1/T_2 . \quad (2.2)$$

Закон Шарля: при постоянном удельном объёме абсолютные давления газа изменяются прямо пропорционально изменению абсолютных температур:

$$p_1/p_2 = T_1/T_2 \quad (2.3)$$

Уравнение состояния идеального газа можно получить, пользуясь законами Бойля – Мариотта и Гей – Люссака.

Допустим, что газ масса которого равна 1 кг из состояния с параметрами p_1, v_1, T_1 , переходит в другое состояние с параметрами p_2, v_2, T_2 . Допустим, что это изменение происходит сначала при постоянной температуре T_1 промежуточного удельного объёма v' , а затем при постоянном давлении p_2 до конечного удельного объёма v_2 .

По закону Бойля – Мариотта при $T = \text{const}$ имеем

$$p_1 v_1 = p_2 v' , \text{ или } v' = p_1 v_1 / p_2 . \quad (2.4)$$

По закону Гей – Люссака, при $p = \text{const}$

$$v' / v_2 = T_1 / T_2 , \text{ или } v' = v_2 T_1 / T_2 . \quad (2.5)$$

Сравнив выражения (2.4) и (2.5) для v' , получим

$$p_1 v_1 / p_2 = v_2 T_1 / T_2 . \quad (2.6)$$

Преобразив это равенство, имеем

$$p_1 v_1 / T_1 = p_2 v_2 / T_2 = \text{const}, \quad (2.7)$$

или

$$pv / T = \text{const} . \quad (2.8)$$

т. е. отношение произведений абсолютного давления на его удельный объём к абсолютной температуре остаётся постоянным. Для 1 кг газа эту постоянную величину называют *удельной газовой постоянной* и обозначают буквой R .

$$pv / T = R , \quad (2.9)$$

или

$$pv = RT \quad (2.10)$$

Уравнение (2.10) называют уравнением *состояния идеального газа*. Оно связывает между собой величины (V, p и T), характеризующие термодинамическое состояние данного газа. Его называют уравнением Клайперона – по имени учёного предложившего это уравнение.

Зная параметры газа по уравнению (2.10) можно легко определить третий, так как величина R постоянная для каждого газа. В температурных пределах, которые обычно применяют в технике, газовые постоянные подсчитаны для большинства газов и сведены в таблицы.

Физический смысл удельной газовой постоянной R . Рассмотрим числитель левой части уравнения (2.9):

$$pv = \frac{\text{Н} * \text{м}^3}{\text{м}^2 * \text{кг}} = (\text{Н} * \text{м}) / \text{кг} = \text{Дж} / \text{кг}.$$

Как видно из равенства, произведение давления на удельный объём ($p\nu$) можно рассматривать как удельную механическую работу, измеряемую в Дж, полученную в результате расширения 1 кг газа. Если же газ произвёл эту работу при нагревании его на 1 кельвин, то удельная газовая постоянная будет измеряться в джоулях на килограмм-кельвин Дж/(кг*К). Следовательно, удельная газовая постоянная R есть удельная работа расширения 1кг газа при нагревании его на 1 кельвин.

Так как плотность $\rho = 1/\nu$, то газовая постоянная выраженная через плотность имеет вид:

$$R = p/(\rho T)$$

Вторая форма уравнения состояния идеального газа. Для получения уравнения состояния для произвольной массы газа, необходимо умножить обе части уравнения (2.10) на M кг.

$$M p \nu = M R T, \quad (2.11)$$

$M\nu = V$ - объём газа, подставив в (2.11) получим

$$pV = M R T.$$

Третья форма уравнения состояния идеального газа. Используя первую форму уравнения состояния идеального газа (2.10) получим третью форму. Умножив обе части уравнения на молярную массу μ , получим уравнение состояния для 1кмоль идеального газа.

$$\begin{aligned} \mu p \nu &= \mu R T, \\ \mu \nu = V_\mu - \text{молярный объём} \quad p V_\mu &= \mu R T. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Решив уравнение (2.12) относительно μR и подставив числовые значения стандартных условий, получим

$$\mu R = p V_\mu / T = 1,01325 * 10^5 * 22,4/273 = 8314 \text{ Дж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К}),$$

V_μ - число Авогадро – объём моля любого газа;

1 атм = $1,01\ 325 * 10^5$ Па – давление при стандартных условиях.

Так как $\mu R = R_0 = 8314$ одинаково для всех газов, то её называют универсальной газовой постоянной.

$$R_0 = 8314 \text{ Дж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К}). \quad (2.13)$$

Уравнение состояния идеального газа для 1кмоль имеет вид:

$$p V_\mu = R_0 T.$$

Это уравнение называют уравнением Менделеева –Клайперона.

Удельную газовую постоянную R легко определить, разделив универсальную газовую постоянную на молярную массу – $R = R_0/\mu$. Так например для оксида углерода CO $\mu_{\text{CO}} = 12 + 16 = 28$, а $R_{\text{CO}} = 8314/28 = 296,5 \text{ Дж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К})$

2.5 Уравнение состояния реального газа

Молекулы реального газа в отличие от идеального газа имеют конечный объём и взаимодействуют между собой.

В 1873 году голландский физик Ван дер - Ваальс вывел уравнение состояния для реального газа, которое отображает физические особенности газа и имеет вид:

$$p = RT (v - b) - a/v^2,$$

где:

a и b – поправочные коэффициенты к уравнению Клайперона и зависят от природы газа;

a/v^2 - характеризует взаимное притяжение молекул реального газа, измеряется в единицах давления;

b – поправочный коэффициент - представляет собой предельный объём, который бы занял газ при бесконечно большом сжатии и является таким образом собственным объёмом молекулы реального газа, измеряется в единицах объёма. По сравнению с уравнением Клайперона уравнение Ван дер – Ваальса менее удобное, так как a и b различны для разных газов. Однако уравнение Ван дер – Ваальса описывает состояние газа в широких пределах температур и давлений и позволяет качественно определить переход газа в жидкость.

Глава 3 Газовые смеси

3.1 Основные понятия

Рабочее тело часто представляет собой смесь нескольких газов. Предположим все составные части газовой смеси, имеют одинаковые температуры и одинаковые объёмы. Если считать, что каждый компонент входящий в состав смеси, подчиняется уравнению состояния идеального газа, как и вся смесь в целом, то давление отдельных компонентов, находящихся в смеси и химически не реагирующих между собой, подчиняется закону Дальтона, согласно которому давление смеси газов равно сумме парциальных давлений отдельных компонентов смеси.

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n$$

где p_1, p_2, \dots, p_n – парциальные давления компонентов смеси.

Парциальным называют давление компонентов газовой смеси, которое оказывал бы этот компонент, если бы он один находился при температуре смеси во всём объёме, занимаемом смесью. Закон Дальтона справедлив только для идеальных газов.

3.2 Способы задания смеси

Состав рабочей смеси газов определяется массой или объёмом каждой составляющей, входящей в смесь. Состав смеси обычно задают массовыми или объёмными долями. Если смесь массой M состоит из n компонентов, то массовые доли g отдельных компонентов в смеси по определению равны:

$$g_1 = M_1/M; \quad g_2 = M_2/M; \quad \dots; \quad g_n = M_n/M, \quad (3.1)$$

где M_1, M_2, \dots, M_n - массы отдельных компонентов, образующих смесь;

Очевидно, что сумма масс отдельных компонентов газовой смеси равна массе всей смеси

$$M_1 + M_2 + \dots + M_n = M \quad (3.2)$$

Это равенство называют *уравнением массового состава смеси*. Из уравнений (3.1) и (3.2), ясно, что сумма массовых долей отдельных компонентов газовой смеси равна единице.

$$g_1 + g_2 + \dots + g_n = 1 \quad (3.3)$$

Равенство (3.3) называют *уравнением относительного массового состава газовой смеси*.

Если смесь, состоящая из n компонентов, имеет объём V , то объёмные доли r компонентов в смеси определяются равенствами:

$$r_1 = V_1/V; \quad r_2 = V_2/V; \quad \dots; \quad r_n = V_n/V, \quad (3.4)$$

где V_1, V_2, \dots, V_n - парциальные объёмы компонентов, входящих в состав смеси.

Парциальным называют объём компонента, входящего в состав смеси при температуре и давлении смеси. Очевидно, что сумма парциальных объёмов компонентов газовой смеси равна полному объёму смеси.

Уравнение объёмного состава имеет вид:

$$V_1 + V_2 + \dots + V_n = V. \quad (3.5)$$

Сумма объёмных долей компонентов газовой смеси равна единице

$$r_1 + r_2 + \dots + r_n = 1. \quad (3.6)$$

Уравнение (3.5) называется – *уравнение относительного объёмного состава*.

3.3 Свойства смеси

Если задан состав смеси и известны термодинамические свойства компонентов газовой смеси (газовые постоянные, и относительные молекулярные массы) и общее давление смеси, то можно определить термодинамические свойства смеси.

Предположим, газовая смесь состоит из трёх компонентов, заданная по массе. Определяем газовую постоянную смеси, кажущуюся относительную молекулярную массу, удельный объём и плотность.

Уравнение Клапейрона для каждого компонента газовой смеси:

$$p_1 V = M_1 R_1 T; \quad p_2 V = M_2 R_2 T; \quad p_3 V = M_3 R_3 T,$$

где p_1, p_2, p_3 - парциальные давления компонентов смеси;

V - объём смеси;

M_1, M_2, M_3 - массы компонентов газовой смеси;

T - абсолютная температура, одинаковая для всех компонентов;

R_1, R_2, R_3 - удельные газовые постоянные компонентов в смеси.

Суммируя эти выражения, получаем

$$(p_1 + p_2 + p_3) V = (M_1 R_1 + M_2 R_2 + M_3 R_3) T, \quad (3.7)$$

но по закону Дальтона,

$$(p_1 + p_2 + p_3) = p, \text{ подставив в (3.7) имеем}$$

$$p V = (M_1 R_1 + M_2 R_2 + M_3 R_3) T \quad (3.8)$$

Используя массовые доли g_1, g_2, g_3 имеем :

$$p V = M(g_1 R_1 + g_2 R_2 + g_3 R_3) T, \quad (3.9)$$

Выражение в скобках правой части уравнения (3.9) является для данной газовой смеси характерной постоянной. Обозначив её через R , запишем уравнение состояния газовой смеси в такой же форме, как и для чистых газов

$$p V = MRT \quad (3.10)$$

Из уравнений (3.9) и (3.10) очевидно, что газовая постоянная R определяется равенством

$$R = g_1 R_1 + g_2 R_2 + g_3 R_3 = (g_1/\mu_1 + g_2/\mu_2 + g_3/\mu_3) R_0, \quad (3.11)$$

С учётом равенства (3.1) и (3.11) для R можно записать

$$R = (M_1 R_1 + M_2 R_2 + M_3 R_3) / M.$$

Используя газовую постоянную смеси R , можно получить удобную формулу, связывающую r_i, g_i, i - го компонента смеси.

$$p V_i = M_i R_i T,$$

где $i = 1, 2, 3$ - относится к любому из газов смеси.

Разделив это равенство на (3.10) и с учётом (3.1) и (3.4) получим соотношение

$$r_i = g_i R_i / R.$$

Как известно, удельная газовая постоянная R для любого газа может быть определено по его молекулярной массе μ , а каждый газ в смеси имеет свою молярную массу. Кажущаяся молярная масса определяется как:

$$\mu = 8314 / R, \text{ а кажущаяся молярная масса смеси равна:}$$

$$\mu = 8314 / (g_1 R_1 + g_2 R_2 + g_3 R_3) = 1 / (g_1/\mu_1 + g_2/\mu_2 + g_3/\mu_3);$$

так как

$$pV/M = RT, \text{ но } V/M = v,$$

$$\text{поэтому } p v = RT \quad \text{и} \quad v = RT/p \quad (3.12)$$

Газовая постоянная смеси $R = g_1 R_1 + g_2 R_2 + g_3 R_3$.

Подставим значение R в уравнение (3.12), получаем

$$v = g_1 R_1 T / p + g_2 R_2 T / p + g_3 R_3 T / p,$$

так как $R_1 T / p = v_1; \quad R_2 T / p = v_2; \quad R_3 T / p = v_3$, то удельный объём газовой смеси определяется как

$$v = g_1 v_1 + g_2 v_2 + g_3 v_3 = g_1 / \rho_1 + g_2 / \rho_2 + g_3 / \rho_3, \quad (3.13)$$

где v_1, v_2, v_3 и ρ_1, ρ_2, ρ_3 - удельные объёмы и плотности компонентов газовой смеси.

Плотность газовой смеси является обратной величиной газовой смеси;

$$\rho = 1/v = 1/(g_1/\rho_1 + g_2/\rho_2 + g_3/\rho_3) \quad (3.14)$$

Пример 3.2

Дымовые газы имеют состав: CO₂ = 5 кг; CO 2 кг; N₂ = 13 кг.

Определить массовые доли компонентов смеси.

Решение.

Общая масса смеси M = 5 + 2 + 13 = 20 кг. Массовая доля компонентов:

$$g_{\text{CO}_2} = M_{\text{CO}_2}/M = 5/20 = 0,25; \quad g_{\text{CO}} = M_{\text{CO}}/M = 2/20 = 0,1 \quad g_{\text{N}_2} = M_{\text{N}_2}/M = 13/20 = 0,65$$

Глава 4 Теплоёмкость

4.1 Теплоёмкость газов

Для того, чтобы два различных вещества с одинаковой массой нагреть до одинаковых температур, нужно затратить различное количество теплоты. Так, например, на нагревание воды нужно затратить теплоты примерно в девять раз больше, чем на нагревание до той же температуры такого же количества железа.

Следовательно, каждое тело обладает своей, присущей только этому телу теплоёмкостью

Теплоёмкостью (C) системы называют количество теплоты, необходимое для изменения температуры тела на 1 градус:

$$C = Q/T.$$

Средняя и истинная теплоёмкости. Средней теплоёмкостью (C_m) тела в интервале температур от T₁ до T₂ называют количество теплоты Q, необходимое для повышения температуры тела на один градус:

$$C_m = \frac{Q}{T_2 - T_1} \quad (4.1)$$

При уменьшении разности температур T₂ - T₁ средняя теплоёмкость приближается к истинной. Если к телу подведено бесконечно малое количество теплоты dQ и температура тела T повысилась на величину dT, то истинная теплоёмкость C системы определится отношением

$$C = dQ/dT \quad (4.2.)$$

В практических расчётах гораздо удобнее пользоваться средней теплоёмкостью. Единица измерения теплоёмкости – Дж/К.

Для технических расчётов ввели понятие удельной, объёмной и молярной теплоёмкости в зависимости от выбранных единиц.

Удельной теплоёмкостью c называют отношение теплоёмкости (C) системы к массе тела

$$c = C/M = dQ/(MdT)$$

Единица удельной теплоёмкости – Дж/(кг * К).

Объёмной теплоёмкостью вещества называют отношение теплоёмкости (C) системы к объёму тела V

$$c = C/V = dQ/(VdT)$$

Единица объёмной теплоёмкости - Дж/(м³ * К).

Молярной теплоёмкостью тела называют отношение теплоёмкости системы к количеству вещества n

$$c_\mu = C/n = dQ/(ndT).$$

Единица молярной теплоёмкости измеряется - Дж/(кмоль * К).

Все три вида теплоёмкостей связаны между собой следующими зависимостями:

объёмная с удельной

$$c_{об} = c\rho; \quad (4.3)$$

удельная с молярной

$$c = c_\mu/\mu; \quad (4.4)$$

молярная с объёмной

$$c_\mu = \mu c_{об}/\rho \quad (4.5)$$

где ρ – плотность вещества, кг/м^3 ; μ – молярная масса вещества, кг/кмоль .

Значение средних теплоёмкостей для различных газов сведены в таблицы, которые можно найти в справочной литературе.

Теплоёмкости при постоянном объёме и при постоянном давлении.

У газообразных тел в отличие от жидких и твёрдых теплоёмкость в значительной степени зависит от внешних условий, при которых к телу подводят или отводят теплоту. В теплофизике большое значение имеют процессы, совершающиеся при постоянном удельном объёме ($v = \text{const}$) – изохорный процесс (c_v) и при постоянном давлении ($p = \text{const}$) – изобарный процесс (c_p).

При изохорном подогреве газа его объём не увеличивается. Следовательно, он не совершает работы против внешних сил. При изобарном подогреве газ расширяется, преодолевает внешнюю силу, действующую на поршень, т. е. совершает работу. Следовательно, при нагревании одного и того же газа до одинаковой температуры, в одинаковых условиях при изобарном процессе нужно затратить больше теплоты, чем при изохорном.

Теплоёмкость газа зависит от его физической природы, от условий, в которых происходит процесс, а также от температуры (а для реальных газов и от давления). Если исходить из того, что теплоёмкость газов – величина переменная, зависящая от температуры, то это значит, что для нагрева на каждый градус необходимо разное количество теплоты. В этом случае пользуются понятием истинной теплоёмкости.

4.2 Теплоёмкость газовой смеси

Так как теплота, затрачиваемая на нагревание 1 кг газовой смеси, расходуется на нагревание отдельных компонентов, находящихся в смеси, то удельная теплоёмкость смеси равна сумме произведений удельных теплоёмкостей компонентов, составляющих смесь, на их массовые или объёмные доли.

Если состав смеси задан по массе газа, то удельная теплоёмкость смеси определяется из равенства

$$c_{\text{см}} = c_1 g_1 + c_2 g_2 + \dots + c_n g_n \quad (4.6)$$

Если состав смеси задан объёмными долями, то удельная теплоёмкость смеси определяется из равенства

$$c_{\text{см}} = c_1 \Gamma_1 + c_2 \Gamma_2 + \dots + c_n \Gamma_n \quad (4.7)$$

Глава 5 Первое начало (закон) термодинамики

5.1 Основные понятия

Состояние системы. Неравновесное состояние системы характеризуется различными значениями её параметров в каждой точке системы.

Равновесным считают состояние системы, при котором во всех её точках параметры системы имеют одинаковые неизменные во времени значения. Если все точки системы характеризуются одинаковой температурой, то это значит, что система находится в состоянии термического равновесия. Если давление одинаково во всех точках системы, то это означает, что система находится в состоянии механического равновесия.

Допустим, что в сосуде с теплоизоляционными стенками под невесомым поршнем находится некоторое количество газа. В целом система находится в равновесном состоянии. Это означает, что температура газа по всему объёму постоянна и равна температуре окружающей среды. Если пренебречь силой тяжести, действующей на газ в цилиндре, то в равновесном состоянии масса газа распределена по всему объёму сосуда равномерно, и, следовательно, давление во всех точках объёма также одинаково и равно давлению окружающей среды. Опыт показывает, что система, выведенная из равновесия и не подвергающаяся больше внешним воздействиям, самостоятельно вернётся в равновесное состояние. Однако из равновесного состояния в неравновесное система не

может перейти без внешнего воздействия. Параметры состояния при равновесии не остаются постоянными, а испытывают небольшие колебания вблизи своих равновесных (средних) значений. Поэтому о термодинамическом равновесии можно говорить только в том случае, когда число молекул рассматриваемого газа очень велико. Если рабочее тело под воздействием внешних или внутренних факторов выведено из равновесия, то все параметры, характеризующие его состояние, изменяются – начнётся термодинамический процесс изменения состояния рабочего тела.

В термодинамике термодинамический процесс может быть наглядно представлен в виде графика на pV – диаграмме (рис.5.1.), где по оси абсцисс – удельный объём v , а по оси ординат – абсолютное давление p .

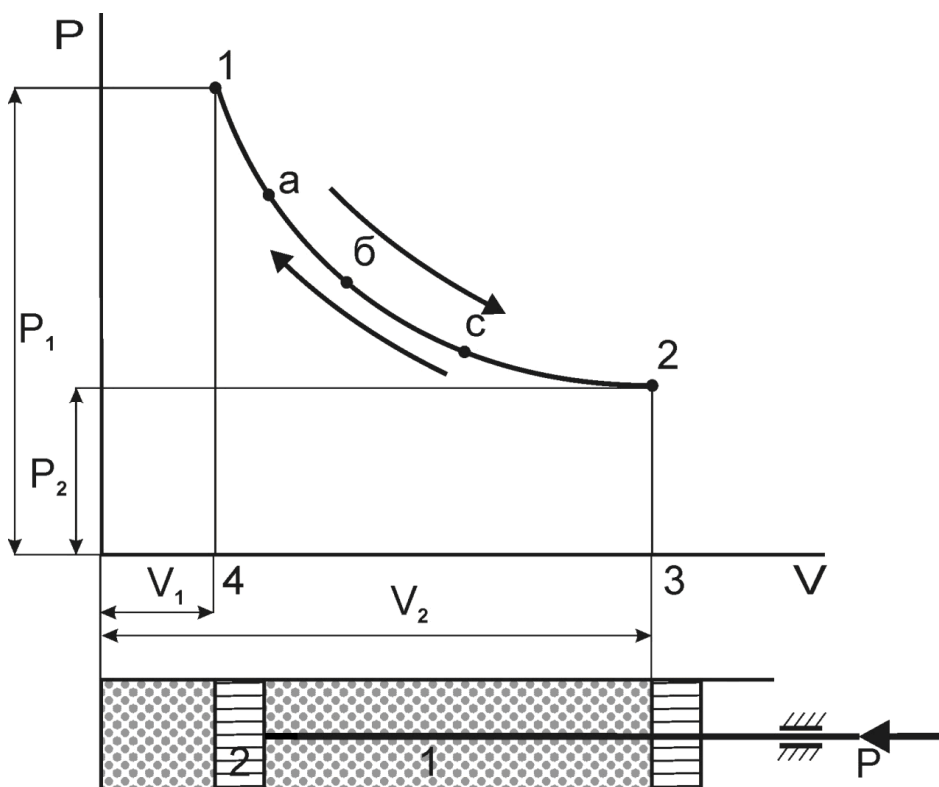


Рис.5.1-Термодинамический процесс на pV – диаграмме

Пусть в рабочем пространстве цилиндра 1, снабжённого поршнем 2 (рис.5.1), заключён 1 кг газа с начальными параметрами p_1, v_1 (точка 1). Примем, что на поршень с внешней стороны действует постоянная сила P и газ находится в состоянии равновесия. Для осуществления процесса необходимо разрушить равновесие системы.

Допустим, что термическим или механическим воздействием равновесие газа нарушено и начался процесс изменения его состояния. При этом в каждый момент времени система уже не находится в равновесном состоянии и давление p и температура T в каждой точке системы будут изменяться. Поэтому состояние системы теперь нельзя точно характеризовать, задавая три параметра p, v и T , а следовательно такой процесс нельзя изобразить графически. Только применяя усреднённые параметры процесс изменения состояния рабочего тела можно изобразить графически.

Если в конечном равновесном состоянии удельный объём увеличился, то такой процесс называют расширением – прямой процесс и характеризуют неравенством $dv > 0$. Если же при изменении состояния газа удельный объём его уменьшился, то такой процесс называется сжатием – обратный процесс - $dv < 0$.

На pV – диаграмме изменение состояния газа (рис.5.1) в каждый момент времени выразится непрерывной последовательностью точек a, b, c и т. д., характеризующих средние значения параметров p и V в соответствующие моменты времени. Процесс, переводящий тело из одного состояния в другое, из точки 1 в точку 2 выразится кривой (1 – 2) средних значений параметров. Точки 1 и 2 характеризуют равновесное состояние системы в начале и в конце процесса. Вид кривой зависит от характера процесса. Такую кривую называют кривой термодинамического процесса.

Обратимость процесса. Процесс, который состоит из непрерывного ряда последовательных равновесных состояний, называют равновесным процессом.

Равновесные процессы являются идеальными процессами, т.к. протекают с бесконечно малыми скоростями и могут быть осуществлены только при бесконечно малой разности давлений и температур газа и внешней среды.

Термодинамика изучает равновесные (идеальные) процессы.

Равновесный процесс, который может быть осуществлён в обратном направлении через тот же ряд последовательных равновесных состояний без каких либо конечных изменений, как в самом газе, так и во внешней среде – называют обратимым процессом. Для того, чтобы процесс был обратимым, он должен быть равновесным.

Изучение обратимых процессов позволяет выявить основные закономерности реальных процессов.

Внутренняя энергия системы. Кинетическую энергию микроскопических тепловых движений молекул и потенциальную энергию их взаимодействия называют внутренней энергией тела.

Система, изолированная от внешней, среды или находящаяся во взаимодействии с ней, располагает определённым количеством внутренней энергии U . Если состояние системы изменилось в результате любого термодинамического процесса, то изменение её внутренней энергии не зависит от того, как протекал этот процесс, а зависит только лишь от конечного и начального состояний рабочего тела. Полное изменение энергии определяется разностью значений энергии в начале и конце взаимодействия тела с внешней средой:

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

где - U_2 и U_1 внутренняя энергия в начале и в конце процесса.

Работа и количество теплоты. Механическая работа, рассматриваемая в термодинамике, является мерой механической энергии. Она производится при перемещении тела в пространстве под действием механической силы. Если газ, находящийся в цилиндре под поршнем, расширяется, то его объём увеличивается ($dV > 0$). При этом происходит перемещение поршня. Такая работа называется положительной. При сжатии ($dV < 0$) работа отрицательная и производится за счёт внешних сил.

Для того, чтобы вычислить механическую работу, совершаемую термодинамической системой, рассмотрим систему, состоящей из M кг газа, находящегося в цилиндре, под поршнем (при $p = const$). Его состояние определяется параметрами p_1, V_1, T_1 , что на диаграмме соответствует точке 1 (рис.5.2). Давление газа p_1 уравновешена внешней силой P , приложенной к штоку поршня. Таким образом, система находится в равновесии. Подведём к системе теплоту Q , которая нарушит равновесное состояние газа. Газ будет расширяться и давить на поршень с силой F , преодолевая силу P . Поршень переместится на расстояние s , совершив при этом работу. Состояние газа в точке 2 определится параметрами p_2, V_2, T_2 .

Совершённую газом работу можно вычислить по общим правилам механики, а можно определить графически, изобразив её на pV – диаграмме. Работа W , совершённая газом под действием силы F , равна произведению этой силы на путь s :

$$W = F s \tag{5.1}$$

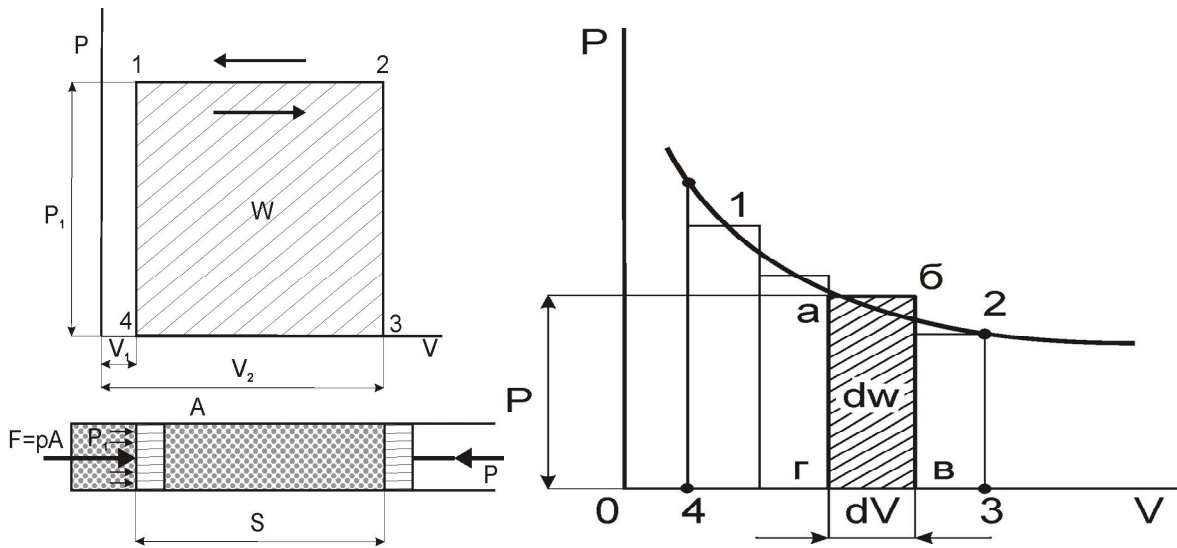


Рис 5.2 - Работа изобарного расширения 5.3 - Работа изотермического расширения

Сила F определяется как:

$$F = pA, \quad (5.2)$$

где $p = p_1 = p_2 = const$

Подставив в формулу (5.1) значение F из формулы (5.2) получим

$$W = pAs, \quad (5.3)$$

но As – объём цилиндра между начальным и конечным положением поршня

В результате

$$Fs = V_2 - V_1 = \Delta V \quad (5.4)$$

$$W = p (V_2 - V_1) \quad (5.5)$$

$$W = p \Delta V \quad (5.6)$$

Построим график на pV – диаграмме, определяющей зависимость между объёмом в цилиндре и абсолютным давлением. Опустим перпендикуляры из точки 1 и 2. Площадь, заключённая в этом контуре (1, 2, 3, 4) – определяет работу расширения газа.

По формуле (5.6) элементарная работа dW определяется как:

$$dW = p dV \quad (5.7)$$

На pV – диаграмме элементарная работа dW изобразится в виде площади бесконечно малого прямоугольника а, б, в, г (рис 5.3). Полная работа расширения M кг газа в процессе 1 – 2 определится суммой элементарных работ и равна определённому интегралу в пределах изменения объёмов от V_1 до V_2 :

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (5.8)$$

Отнеся работу расширения на 1кг газа, получим

$$dw = p dv \quad (5.9)$$

или

$$w = \int_{v_1}^{v_2} p dv \quad (5.10)$$

Количество теплоты – мера тепловой энергии, подведённой к системе или отведённой от неё. Количество теплоты зависит не только от начального и конечного состояния системы, но и от пути по которому происходило изменение его состояния. Количество теплоты, полученное телом, принято считать положительным, а отданное телом – отрицательным. Количество теплоты и работы измеряются в джоулях (Дж).

5.2 Первое начало (закон) термодинамики

Закон сохранения энергии, устанавливает, что энергия не создается, не уничтожается и что одна форма энергии может переходить в другую; при этом превращение совершается таким образом, что определенное количество одной формы энергии переходит в равное количество другой. Первое начало термодинамики по существу является законом сохранения энергии. Оно устанавливает количественную зависимость между подводимой к системе теплотой, её внутренней энергией и совершаемой работой (механической энергией).

Первое начало (закон) термодинамики формулируют так: *вся теплота, подведённая к системе, расходуется на изменение внутренней энергии системы и на совершение внешней работы.*

$$Q = U_2 - U_1 + W, \quad (5.11)$$

где Q – подведённая к системе теплота;

U_1 и U_2 – внутренняя энергия системы в начале и конце процесса;

W – работа, совершённая системой,

или в дифференциальной форме,

$$dq = du + dw. \quad (5.12)$$

Сравнивая равенства (5.9) и (5.12) можно первое начало термодинамики представить в виде

$$dq = du + pdv. \quad (5.13)$$

Следствие первого начала (закона) термодинамики. Запишем первое начало термодинамики, используя понятие о теплоёмкости. Решив уравнение (4.2.) относительно dq , получим количество теплоты, подведённой к 1кг газа при бесконечно малом изменении температуры

$$dq = cdT. \quad (5.14)$$

Поделив почленно равенство (5.13) на dT получим теплоёмкости в общем виде для любого процесса:

$$c = du/dT + pdv/dT$$

При $v = const$, правая сторона уравнения равна нулю - $pdv/dT = 0$ тогда

$$c = c_v = (du/dT)_v \quad (5.15)$$

Решив уравнение (5.15) относительно du и подставив его значение в уравнение первого начала термодинамики (5.13), получим уравнение первого начала термодинамики для любого процесса, выраженное через теплоёмкость:

$$dq = c_v dT + pdv \quad (5.16)$$

При $p = const$. Продифференцировав уравнение состояния $pV = RT$, получим

$$pdV + Vdp = RdT, \quad (5.17)$$

т.к. $p = const$, то $dp = 0$ и $Vdp = 0$ и уравнение примет вид:

$$pdV = Rdt, \quad (5.18)$$

но изобарная теплоёмкость равна $c_p = dq/dT$,

$$dq = c_p dT, \quad (5.19)$$

откуда $dq = c_p dT$ (5.20)
Подставив значение dq из формулы (5.20), а значение pdv из формулы (5.18) в равенство(5.16), получим

$$c_p dT = c_v dT + RdT$$

Разделив последнее равенство почленно на dT , получим зависимость между c_p и c_v любого идеального газа, известную под названием *уравнение Майера*;

$$c_p = c_v + R \quad (5.21)$$

или

$$c_p - c_v = R \quad (5.22)$$

Умножив обе части уравнения на молярную массу:

$$\mu c_p - \mu c_v = \mu R = R_0 = 8314 \text{ Дж/(кмоль} \cdot \text{К)} \quad (5.23)$$

Т. к. $c_p > c_v$, то $c_p/c_v = k > 1$ и называется показателем адиабаты.

k – величина постоянная и зависит от числа атомов в молекуле газа.

Газ	k	
Одноатомный газ	1,67	
Двухатомный газ	1,40	
Трёхатомный газ	1,33	
1	k	

$$c_v = \frac{1}{k-1} R ; \quad c_p = \frac{k}{k-1} R \quad (5.24)$$

5.3 Энтропия

Уравнение первого начала термодинамики:

$$dq = c_v dT + p dv.$$

Разделив обе части уравнения на T , получим

$$dq/T = c_v dT/T + p dv/T, \quad (5.25)$$

а так как из уравнения Клайперона $p v = RT$ следует,

$$p/T = R/v, \quad (5.26)$$

подставив в равенство (5.25) значение p/T из равенства (5.26), то получим

$$dq/T = c_v dT/T + R dv/v.$$

Правая часть этого уравнения представляет собой полный дифференциал некоторой функции переменных T и v . Обозначив эту функцию через s , получим

$$ds = dq/T = c_v dT/T + R dv/v = d(c_v \ln T + R \ln v) \quad (5.27)$$

Другими словами, величина dq/T есть полный дифференциал ds функции s , определяемой для идеального газа выражением в скобках правой части равенства (5.27). Эта величина зависит от состояния газа (температуры и удельного объёма) и называется удельной энтропией.

Проинтегрировав уравнение (5.27) получим:

$$s_2 - s_1 = c_v \ln T_2 / T_1 + R \ln v_2 / v_1 \quad (5.28)$$

Удельная энтропия измеряется в Дж/(кг*К).

По степени использования теплоты судят о работе двигателя и его экономичности. Этот вопрос легко разрешается графическим изображением термодинамического процесса в системе координат, где по оси абсцисс – значения энтропии, а по оси ординат – температура. Теплота процесса на Ts – диаграмме определяется площадью под линией процесса.

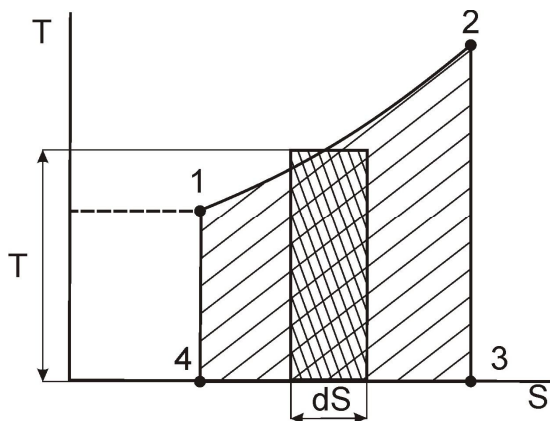


Рис. 5.4 - Произвольный процесс на Ts – диаграмме

Действительно, если линия 1 – 2 на Ts диаграмме (рис.5.4) изображает произвольный процесс, то элементарное количество удельной теплоты процесса dq , равное Tds , численно равно площади имеющей высоту T и основание ds . Вся удельная теплота процесса численно равна пл. 1234 под кривой процесса.

$$\text{Площадь } A = \int_{s_1}^{s_2} T ds = q.$$

Если pv – диаграмма даёт возможность графически определить полученную или затраченную работу, то Ts – диаграмма позволяет судить о степени использования теплоты.

5.4 Энтальпия

Уравнение первого начала (закона) термодинамики (5.12):

$$dq = du + pdv.$$

Напишем это уравнение для произвольного конечного процесса изменения состояния газа, определяемого любой кривой 1 – 2.

$$q = u_2 - u_1 + \int_1^2 pdv.$$

Так как

$$pdv = d(pv) - vdp,$$

то уравнение (5.12) можно записать в виде:

$$dq = du + d(pv) - vdp,$$

или

$$dq = d(u + pv) - vdp$$

$u + pv$ – состоит из внутренней энергии и работы, которую газ способен совершить при изменении своего удельного объёма от 0 до v при постоянном давлении p .

Величина $u + pv$ – называется энтальпией и обозначается i .

$$di = du + d(pv). \quad (5.29)$$

Энтальпия является одной из самых важных функций технической термодинамики.

Первое начало (закон) термодинамики можно записать:

$$dq = di - vdp, \quad (5.30)$$

где $-vdp$ – элементарная удельная работа,

при $p = const$ - $vdp = 0$ и

$$dq_{p=const} = di,$$

$$dq_{p=const} = i_2 - i_1$$

Для определения энтальпии удобно использовать таблицы или диаграммы для газов и паров.

Глава 6 Термодинамические процессы изменения состояния идеального газа

При изменении состояния газа меняются его параметры. Изменения связаны с отводом или подводом тепла и с механическим воздействием на газ. Все параметры связаны между собой уравнением состояния газа $pv = RT$.

Однако бывают термодинамические процессы, при которых одна из величин постоянна. Такими процессами являются: изохорный ($v = const$), изобарный ($p = const$), изотермический ($t = const$), адиабатный ($s = const$) и политропный ($pv^n = const$).

6.1 Изохорный процесс

Уравнение процесса записывается как $v = const$.

Соотношение параметров для процесса представленного на рис 6.1 выражается как

$$p_1 v_1 = RT_1; \quad \text{и} \quad p_2 v_1 = RT_2$$

Разделив первое уравнение на второе, получим уравнение Шарля

$$p_1/p_2 = T_1/T_2,$$

т.е. при изохорном процессе изменение абсолютных давлений прямо пропорционально изменению абсолютных температур.

Если от системы отвести удельную теплоту, то процесс пойдёт в обратную сторону.

Теплота процесса. Из уравнения (5.15)

$$dq_v = c_v dT + p dv, \quad (6.1)$$

но при $v = const, dv = 0$ и $p dv = 0$, в результате уравнение примет вид

$$dq_v = c_v dT.$$

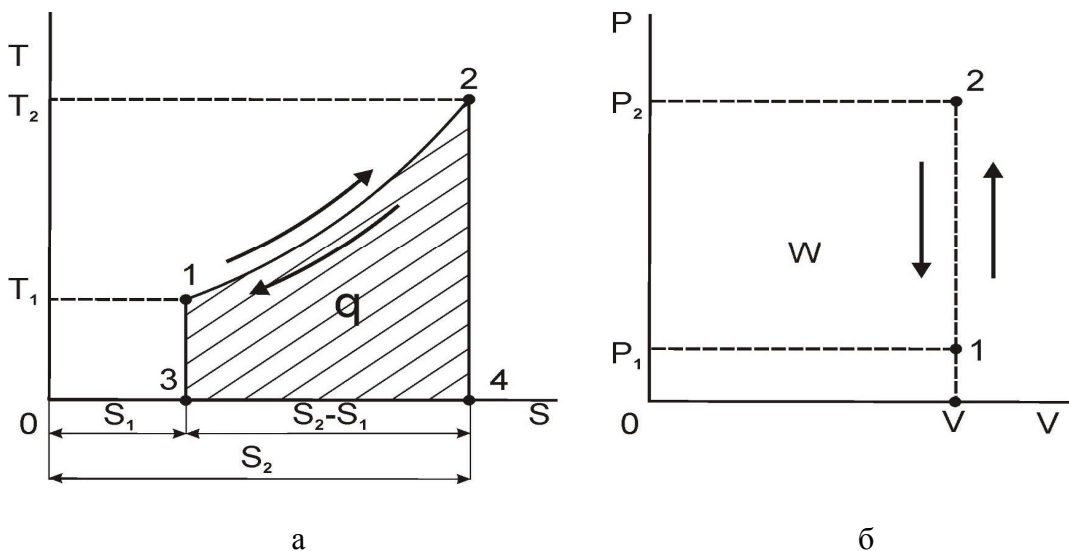
Проинтегрировав это уравнение, получим

$$q_v = c_v(T_2 - T_1).$$

Если $T_2 > T_1$, то процесс положительный, происходит подвод тепла.

Если $T_2 < T_1$, то процесс отрицательный, происходит отвод тепла.

Количество отведённой и подведённой теплоты определяется площадью 1234 (рис.6.1,а), а $(s_2 - s_1)$ разностью отрезков.



а – на Ts – диаграмме, б – на pv-диаграмме
Рис. 6.1 - Изохорный процесс изменения состояния газа

Изменение энтропии. По формуле (5.24) изменение энтропии определяется как

$$s_2 - s_1 = c_p \ln T_2 / T_1 + R \ln v_2 / v_1,$$

т.к. $v_2 = v_1$, то $R \ln v_2 / v_1 = 0$, тогда

$$s_2 - s_1 = c_v \ln T_2 / T_1,$$

c_v – средняя изохорная удельная теплоёмкость в интервале температур от T_2 до T_1 .

Работа процесса. Воспользуемся основным законом термодинамики (5.12) обозначив dq через dq_v

$$dq_v = du + p dv,$$

но при $v = const, dv = 0$ и $p dv = 0$, в результате уравнение примет вид

$$dq_v = du,$$

т. е при изохорном процессе работа не совершается, а всё тепло расходуется на изменение внутренней энергии.

6.2 Изобарный процесс

Уравнение процесса записывается как $p = const$.

Соотношение параметров для процесса представленного на рис 6.2 выражается как

$$p_1 v_1 = RT_1; \quad \text{и} \quad p_1 v_2 = RT_2.$$

Разделив первое уравнение на второе, получим уравнение Гей – Люссака:

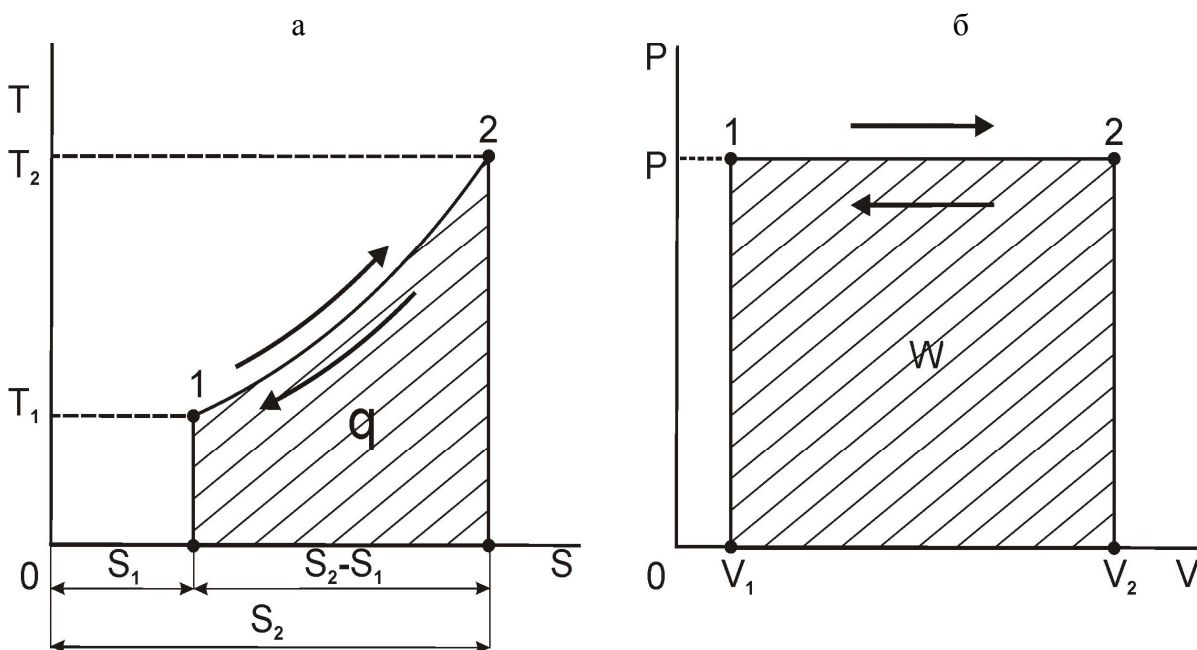
$$v_1 / v_2 = T_1 / T_2$$

Если от системы отвести некоторое количество удельной теплоты, то при постоянном давлении, газ уменьшит свой объём и температуру.

Теплота процесса. Количество подведённой удельной теплоты при изобарном процессе можно выразить как:

$$q_p = c_p(T_2 - T_1),$$

c_p – изобарная удельная теплоёмкость в интервале температур T_2 и T_1 .



а – на Ts – диаграмме. б – на pv -диаграмме
Рис. 6.2 - Изобарный процесс изменения состояния газа

На Ts – диаграмме (Рис. 6.2) количество подведённой или отведённой удельной теплоты определяется площадью, ограниченной кривой 1-2, крайними ординатами и отрезком оси абсцисс, равным $s_2 - s_1$

$$dq_p = di - vdp,$$

но при $p = const$, следовательно, $dp = 0$.

Таким образом $dq_p = di$ или $q_p = i_2 - i_1$ (6.2)

Количество подведённой теплоты равно приращению удельной энтальпии.

Изменение энтропии. Если в формуле (5.24) использовать соотношение параметров изобарного процесса, то изменение энтропии примет вид

$$s_2 - s_1 = c_p \ln T_2/T_1 + R \ln T_2/T_1 = (c_p + R) \ln T_2/T_1$$

Используя уравнение Майера $c_p + R = c_p$, имеем

$$s_2 - s_1 = c_p \ln T_2/T_1. \quad (6.3)$$

Работа процесса. Удельная работа при изобарном процессе определяется как

$$w = p(v_2 - v_1).$$

Удельную работу можно определить используя уравнения состояния газа при $p = const$

$$p_1 v_1 = RT_1 \quad (6.4)$$

$$p_2 v_2 = RT_2 \quad (6.5)$$

Вычитая из уравнения (6.4) уравнение (6.5) получаем

$$p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1)$$

$$w = R(T_2 - T_1).$$

При повышении температуры на 1°C

$$w = R$$

При изобарном процессе большая часть подведённой удельной теплоты расходуется на повышение внутренней удельной энергии, а меньшая на совершение внешней механической работы.

6.3 Взаимное расположение изохоры и изобары на Ts – диаграмме

Рассмотрим термодинамический процесс, протекающий в разных условиях с 1 кг газа. На рис.6.3 представлена Ts – диаграмма изохорного и изобарного процессов. Точка 1 имеет параметры s_1 и T_1 . Подведём к системе удельную теплоту и закончим процесс при температуре T_2 . При этом удельная энтропия изменится для изохорного процесса от s_1' до s_2' , а для изобарного процесса от s_1'' до s_2'' .

Так как c_p больше c_v , то изохора пойдёт круче изобары, поэтому изменение удельной энтропии при изобарном процессе больше, чем при изохорном:

$$(s_2'' - s_1'') = (s_2' - s_1')$$

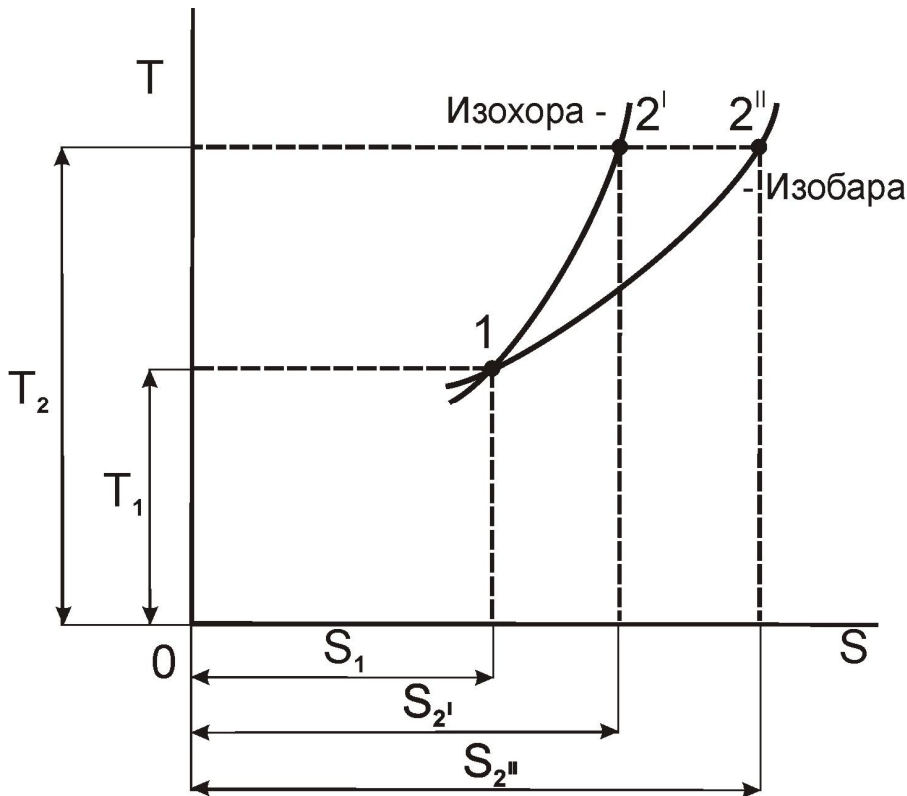


Рис. 6.3 - Совместное расположение изохоры и изобары на Ts – диаграмме

6.4 Изотермический процесс

Уравнения процесса. При изотермическом изменении состояния газа уравнение процесса имеет вид: $T = const$.

Соотношение параметров. Для изотермического процесса протекающего по кривой 1-2 уравнение состояния газа для точек 1 и 2 выразится:

$$p_1 v_1 = RT_1 \quad \text{и} \quad p_2 v_2 = RT_1.$$

Поделив первое уравнение на второе, получим уравнение Бойля – Мариотта,

$$p_1 / p_2 = v_2 / v_1,$$

Теплота процесса. Рассмотрим уравнение первого начала термодинамики

$$dq_T = c_v dT + p dv,$$

но $T = const$, следовательно, $dT = 0$ и $c_v dT = 0$, поэтому

$$dq_T = p dv,$$

т. е. всё подведённое количество удельной теплоты при изотермическом процессе расходуется на совершение внешней механической работы, которая определяется площадью 12 $v_1 v_2$ на $p v$ - диаграмме.

Количество подведённой или отведённой теплоты определяется графически площадью ограниченной точками 1,2 и отрезком $s_2 - s_1$ на Ts – диаграмме.

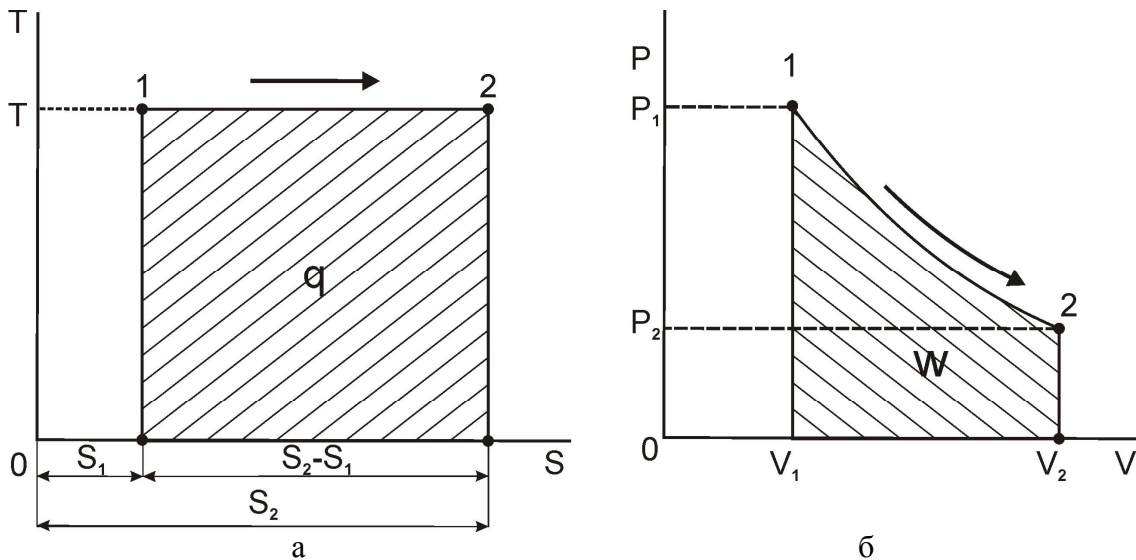


Рис.6.4 - Изотермический процесс изменения состояния газа
 а - Ts – диаграмма; б - pV – диаграмма

Изменение энтропии. Изменение энтропии в изотермическом процессе 1-2 можно вычислить по формуле

$$s_2 - s_1 = R \ln v_2/v_1.$$

Работа процесса. Удельную работу расширения определяют по формуле

$$w = \int_{v_1}^{v_2} p dv.$$

Подставляя значения p из формулы $p v = RT$ и учитывая, что RT можно вынести из под знака интеграла, получим

$$w = RT \int_{v_1}^{v_2} dv/v = RT(\ln v_2 - \ln v_1),$$

или

$$w = RT \ln v_2/v_1, \text{ или} \\ w = RT \ln p_1/p_2$$

Исходя из уравнения состояния газа

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 = RT$$

получим

$$w = p_1 v_1 \ln v_2/v_1 = p_2 v_2 \ln v_2/v_1.$$

Выразим удельную работу через удельную энтропию. Т.к. $dq = Tds$, то интегрируя получим

$$\int_{s_1}^{s_2} T ds = \int_{v_1}^{v_2} p dv = w;$$

Т. к. процесс изотермический, то T можно вынести за знак интеграла и в результате получим:

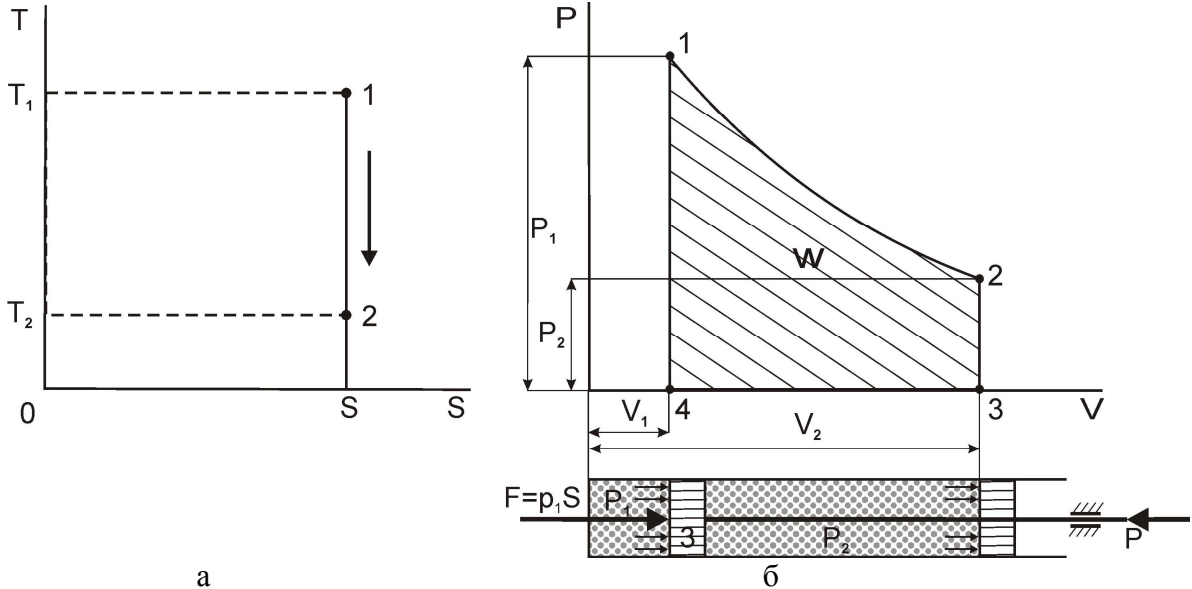
$$w = T \int_{s_1}^{s_2} ds = T(s_2 - s_1).$$

Удельная работа при изотермическом расширении или сжатии равна произведению температуры процесса на изменение удельной энтропии.

6.5 Адиабатный процесс

При адиабатном изменении состояния газа допускают, что к нему не подводят и от него не отводят теплоту.

Процессы же расширения и сжатия протекают только вследствие изменения его внутренней энергии.



а

б

а - Ts – диаграмма; б - pV – диаграмма

Рис.6.5 - Адиабатный процесс изменения состояния газа

В реальных условиях получить адиабатный процесс невозможно, т.к. реальные процессы не являются абсолютно равновесными, и, кроме того, отсутствуют идеальные теплоизоляторы. Однако все быстротекущие процессы можно условно считать адиабатными, так как за малые отрезки времени, в течение которого протекает процесс, теплообмен между рабочим телом и средой незначителен. Адиабатными можно считать процессы в быстроходных двигателях внутреннего сгорания, при истечении газов с большими скоростями.

Уравнение процесса. Так как удельная теплота не подводится к системе и не отводится от неё, то $dq = 0$, а следовательно, $ds = dq/T = 0$. Поэтому удельная энтропия системы остаётся постоянной и уравнение процесса имеет вид

$$s = const$$

Соотношение параметров. При адиабатном процессе все три параметра входящие в уравнение Клайперона переменны.

Предположим, что в рабочем пространстве стенки, дно и поршень цилиндра абсолютно не теплопроводны, поэтому теплообмен между системой и внешней средой отсутствует.

Состояние газа в точке 1 определяется параметрами p_1, v_1, T_1 . Внешняя сила P , приложенная к штоку поршня, равна внутренней силе F , с которой газ давит на внутреннюю поверхность поршня. Система, таким образом, находится в равновесии. При увеличении или уменьшении силы P газ будет соответственно сжиматься или расширяться, изменяя при этом свои параметры. Допустим, что сила P уменьшилась. Газ адиабатно расширился, давление, и температура его понизились (Рис.6.5.а), удельный объём при этом увеличился (Рис.6.5.б). В точке 2 состояние газа определяется параметрами p_2, v_2, T_2 .

Определим соотношение параметров во время адиабатного изменения состояния газа. Для этого напишем уравнение первого начала термодинамики, в виде

$$dq = c_v dT + pdv,$$

но $dq = 0$, следовательно,

$$c_v dT + pdv = 0 \quad (6.6)$$

Продифференцировав уравнение Клайперона ($pv = RT$), получим:

$$pdv + vdp = RdT$$

Решим полученное уравнение относительно dT :

$$dT = (pdv + vdp)/R.$$

Подставив значение dT в уравнение (6.6), получим:

$$(c_v/R)(pdv + vdp) + pdv = 0$$

Разделим полученное равенство на c_v/R и вынесем за скобки pdv

$$(1 + R/c_v)pdv + vdp = 0 \quad (6.7)$$

Подставим значение газовой постоянной R из равенства $c_p - c_v = R$ в равенство (6.7) и сделав преобразования, получим:

$$(c_p/c_v)pdv + vdp = 0, \quad (6.8)$$

или т.к. $c_p/c_v = k$

$$k pdv + vdp = 0,$$

разделив обе слагаемые на pv получим:

$$k dv/v + dp/p = 0,$$

проинтегрировав, получим:

$$pv^k = const. \quad (6.9)$$

Уравнение (6.9) называют уравнением адиабатного процесса, а кривую 1-2 – адиабатой. Уравнение можно переписать в виде:

$$p_1/p_2 = (v_2/v_1)^k, \quad (6.10)$$

т. к. по уравнению Клайперона

$$p_1 = RT_1/v_1 \text{ и } p_2 = RT_2/v_2,$$

то подставив значения p_1 и p_2 , получим,

$$T_1/T_2 = (v_2/v_1)^{k-1} \quad (6.11)$$

Используя уравнение (6.10) и (6.11) можем получить уравнение,

$$T_1/T_2 = (p_1/p_2)^{(k-1)/k}.$$

Теплота процесса. Адиабатный процесс протекает без подвода и отвода тепла, т. е. при $dq = 0$.

Применительно к адиабатному процессу уравнение первого начала имеет вид:

$$\begin{aligned} du + pdv &= 0, \\ du &= -pdv \end{aligned} \quad (6.12)$$

Из уравнения (6.12) видно, что при адиабатном изменении состояния газа удельная работа внешних сил равна изменению удельной внутренней энергии газа. При адиабатном сжатии затраченная внешняя удельная работа идёт на увеличение внутренней удельной энергии газа (давление и температура повышаются).

Работа процесса. Графически работа адиабатного процесса определяется площадью 1234. При $dq = 0$,

$$c_v dT = -pdv.$$

Интегрируя данное выражение, получаем

$$\int_{T_1}^{T_2} c_v dT = c_v(T_2 - T_1) = - \int_{v_1}^{v_2} pdv = -w.$$

Таким образом, удельная работа при адиабатном процессе следующая:

$$w = u_1 - u_2 = c_v(T_1 - T_2), \quad (6.13)$$

т. к. $c_v = R/(k - 1)$, то

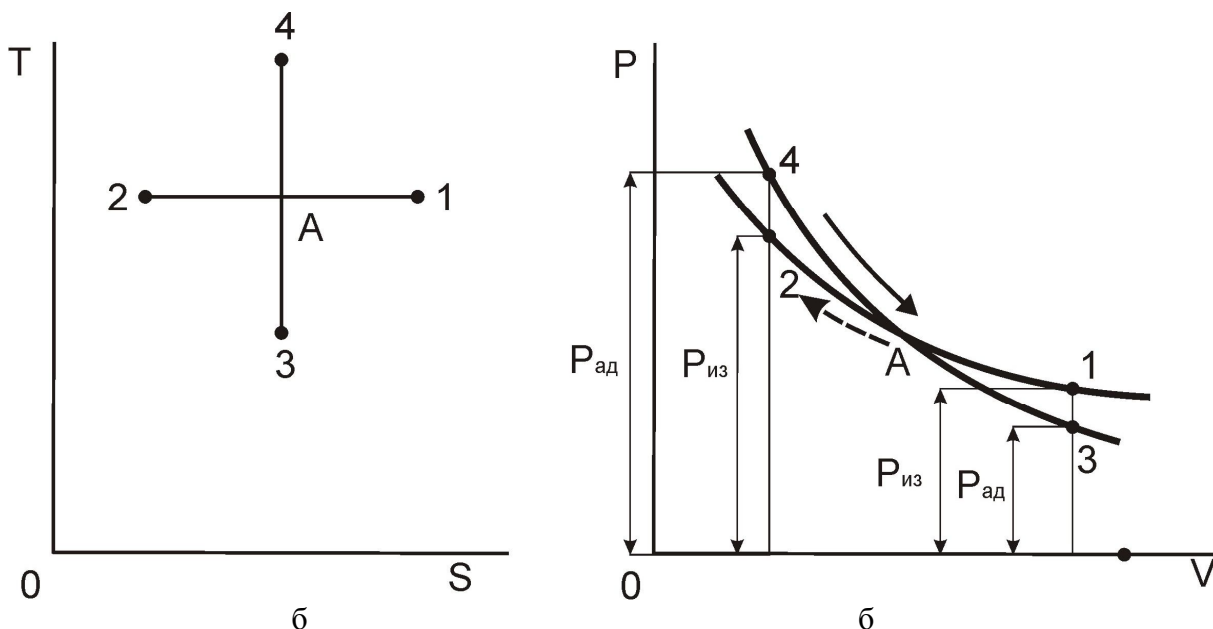
$$w = R/(k - 1)(T_1 - T_2) \quad (6.14)$$

или с учётом уравнения Клайперона,

$$w = 1/(k - 1)(p_1 v_1 - p_2 v_2) \quad (6.15)$$

6.6 Взаимное расположение изотермы и адиабаты на Ts – диаграммах

Пусть в двух цилиндрах одинакового размера находится по 1 кг газа одного состава. Системы находятся в равновесии. Их состояние характеризуется точкой A . Рис. (6.6) Предположим, что одна система расширяется по изотерме, а другая - по адиабате.



а – на Ts – диаграмме. б – на pV -диаграмме
Рис. 6.6 - Совместное расширение изотермы и адиабаты

На Ts – диаграмме изотерма представляет собой прямую линию, параллельную оси абсцисс (Рис. 6.6,а), поскольку изотермический процесс протекает при $T = const$. Если газ расширяется, то изотерма от начальной точки A направлена вправо (линия $A-1$), т.е. процесс протекает с увеличением удельной энтропии. При изотермическом сжатии газа процесс протекает с уменьшением удельной энтропии и изотерма направлена от точки A влево (линия $A-2$).

Поскольку адиабатный процесс протекает при $dq = 0$, то и изменение удельной энтропии в этом процессе также равна нулю,

$$s = const$$

Поэтому на Ts – диаграмме адиабата изображается прямой, параллельной оси ординат. При расширении газа адиабата направлена вниз от начальной точки A (линия $A-3$) и процесс протекает с понижением температуры, тогда как при сжатии газа адиабата направлена вверх и процесс протекает с повышением температуры (линия $A-4$).

На pV -диаграмме (Рис.6.6,б) видно, что при адиабатном расширении давление газа падает быстрее (линия $A-3$), чем при изотермическом (линия $A-1$). Это объясняется тем, что адиабатный процесс протекает без подвода теплоты, расширение газа происходит исключительно вследствие падения его внутренней энергии. При этом температура газа понижается. При изотермическом процессе расширение газа происходит как за счёт падения его внутренней энергии, так и за счёт подведённой теплоты. Температура газа (по условию изотермического процесса) остаётся постоянной. А так как температура газа связана с его давлением, то и давление его падает меньше, чем при адиабатном процессе.

Если от точки A газ сжимать, то адиабата $A-4$ расположится круче изотермы $A-2$. Это объясняется тем, что при адиабатном сжатии теплота не отводится и температура газа

повышается, а следовательно, и давление возрастает быстрее, чем при изотермическом сжатии. Поэтому $p_{ад} > p_{из}$.

6.7 Политропный процесс

Уравнение процесса. В действительных процессах происходит изменение всех параметров. Кривые, описывающие реальные процессы называют политропными. Их уравнение имеет вид

$$pv^n = const,$$

где n – постоянная для данного процесса величина, называется показателем политропы. Изменяя значения показателя политропы можно получить кривые, характеризующие рассмотренные случаи изменения состояния газа. Так, при $n = 0$ политропный процесс становится изобарным, при $n \rightarrow \infty$ – изохорным; при $n = 1$ – изотермическим, а при $n = k$ – адиабатным. Если $n > k$ (рис.6.7.), то при расширении политропа пойдёт круче адиабаты, указывая, что расширение протекает с отводом теплоты и процесс уже не адиабатный. Если же $n < k$, то политропа пойдёт выше изотермы, а это означает, что теплота системе сообщается больше, чем при изотермическом процессе, но меньше, чем при изобарном.

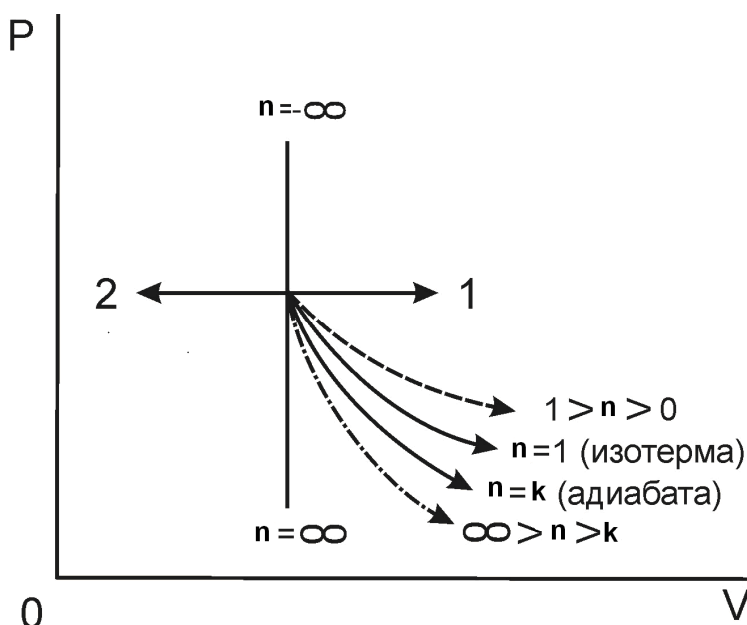


Рис. 6.7 - Кривые политропного процесса с различными показателя политропы.

Соотношение параметров. Так как уравнение политропы аналогично уравнению адиабаты, то, заменив показатель адиабаты на показатель политропы, получим уравнения:

$$p_2/p_1 = (v_1/v_2)^n \quad (6.13)$$

$$T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{(n-1)/n} \quad (6.14)$$

$$T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{(n-1)} \quad (6.15)$$

Теплота процесса. Количество удельной теплоты при политропном процессе

$$dq = c_n dT \quad (6.16)$$

Удельная теплоёмкость определяется формулой $c_n = c_v(n - k)/(n - 1)$ (6.17)

Работа процесса. Выражение для удельной работы можно получить из уравнений

$$w = [R/(n - 1)] (T_1 - T_2); \quad (6.18)$$

$$w = [1/(n - 1)] (p_1 v_1 - p_2 v_2). \quad (6.19)$$

Глава 7 Второе начало (закон) термодинамики

7.1 Круговой процесс теплового двигателя

Состояние тела, характеризуемое давлением и удельным объёмом, на pV – диаграмме изображается точкой. Изменение состояния тела на такой диаграмме изображается кривой термодинамического процесса. Последовательный ряд таких процессов, во время которых тело, испытав ряд изменений, возвращается в первоначальное состояние, называют круговым процессом или циклом.

В основе расчётов современных тепловых двигателей лежат идеальные круговые процессы преобразования теплоты в механическую работу, т. е. идеальные циклы. В идеальных циклах процессы протекают обратимо. В них отсутствуют потери, связанные с наличием трения и отсутствием идеальных теплоизоляторов.

Процесс подвода теплоты в идеальных циклах рассматривается без изменения химического состава рабочего тела. В реальных циклах подвод теплоты осуществляется в процессе сгорания топлива. При этом в двигателях внутреннего сгорания рабочим телом являются продукты сгорания топлива, а в паровой турбине – пар высокого давления.

Процесс отвода теплоты в идеальных циклах рассматривается как отдача его холодильнику. В реальных циклах отвод теплоты осуществляется выпуском отработавшего пара или газа. Процессы адиабатного сжатия протекают без теплообмена между рабочим телом и средой. Процессы же расширения и сжатия в реальных циклах протекают с теплообменом и не могут полностью соответствовать адиабатным.

Рассмотрим круговой обратимый процесс, изображённый на рис. 7.1.

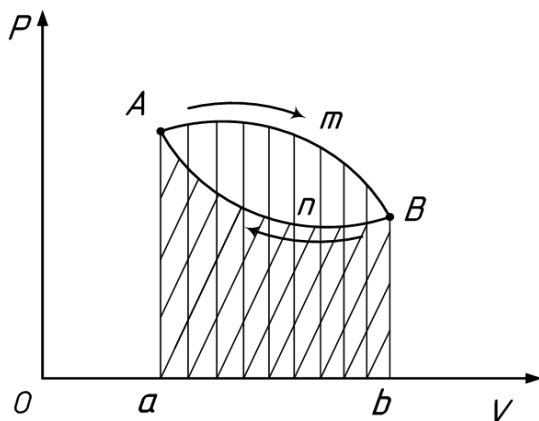


Рис. 7.1 - Круговой процесс на pV – диаграмме

Допустим, что под действием подведённой теплоты Q_1 состояние тела изменилось по линии $A-m-B$. При этом совершена положительная работа W_1 , численно равная пл. $AmBbaA$. Под воздействием внешних сил тело из точки B возвращается в свое первоначальное состояние (в точку A) по линии $B-n-A$. В точке A цикл замыкается. На сжатие тела затрачена отрицательная работа W_2 внешних сил, численно равная пл. $AnBbaA$. Линия кругового процесса на pV – диаграмме представляет собой замкнутый контур $AmBnA$, площадь которого равна разности площадей $AmBbaA$ и $AnBbaA$.

Для получения полезной работы нужно, чтобы работа расширения была больше работы сжатия. Полезная работа равна разности работ расширения и сжатия:

$$W = W_1 - W_2$$

Чем ниже располагается линия сжатия $B-n-A$ по отношению к линии расширения $A-m-B$, тем больше полезная работа W . Рассмотренный круговой цикл, направление которого совпадает с направлением часовой стрелки, называют прямым. Он является общим для всех тепловых двигателей. Направление обратного кругового цикла противоположно направлению часовой стрелки. По обратным циклам работают холодильные машины.

Термический К П Д цикла. Для непрерывной работы двигателя, превращающего теплоту в механическую работу, необходимо иметь источник, сообщаящий телу теплоту Q_1 и холодильник, получающий от тела теплоту Q_2 .

Механическая работа, согласно первому началу термодинамики, будет равна:

$$Q_1 - Q_2 = \Delta U + W.$$

Но приращение внутренней энергии ΔU в круговом процессе равно нулю, т.к. тепло возвращается в своё первоначальное состояние. Поэтому

$$Q_1 - Q_2 = W,$$

Термический определяется как

$$\eta_t = W / Q_1 = (Q_1 - Q_2) / Q_1 \quad (7.1)$$

или

$$\eta_t = 1 - Q_2 / Q_1 \quad (7.2)$$

Термический КПД цикла служит оценкой степени использования теплоты в круговом процессе. Чем больше его величина, тем большая часть теплоты, сообщённой рабочему телу, превращается в полезную работу и тем совершеннее цикл. Если бы была возможность получить замкнутый цикл по кривой $A-m-B-b-a-A$, то при таком цикле количество теплоты Q_2 было бы равно нулю и термический КПД равнялся бы единице. Однако совершить такой цикл невозможно, так как процесс по линии должен был бы протекать при температуре, равной абсолютному нулю (-273°C), что практически в двигателях осуществить невозможно. Поэтому $\eta_t < 1$.

Из всех идеальных циклов самым совершенным является цикл Карно, предложенный в 1824 г. французским учёным Сади Карно.

Цикл Карно. Цикл Карно обратим, и состоит из четырёх процессов: двух изотермических и двух адиабатных.

Пусть система (идеальный газ) помещена в цилиндр, стенки и поршень которого абсолютно теплоизолированы. Дно цилиндра в зависимости от процесса либо термически изолируется от внешней среды, либо попеременно сообщается то с источником теплоты, имеющим температуру T_1 , то с холодильником, имеющим температуру $T_2 < T_1$. На рис.7.2. графически изображён цикл Карно. Начальное состояние системы определяется точкой a с параметрами p_1, v_1, T_1 . Рассмотрим все четыре процесса, образующие цикл Карно.

Первый процесс – изотермическое расширение. Дно цилиндра находится в термическом контакте с источником теплоты. Система получает удельную теплоту в количестве q_1 и изотермически расширяется по линии $a-b$, совершая при этом удельную работу вследствие подведённой извне теплоты. В точке b источник теплоты убирается от цилиндра, и система термически изолируется (дно цилиндра перекрывается идеальным теплоизолирующим материалом).

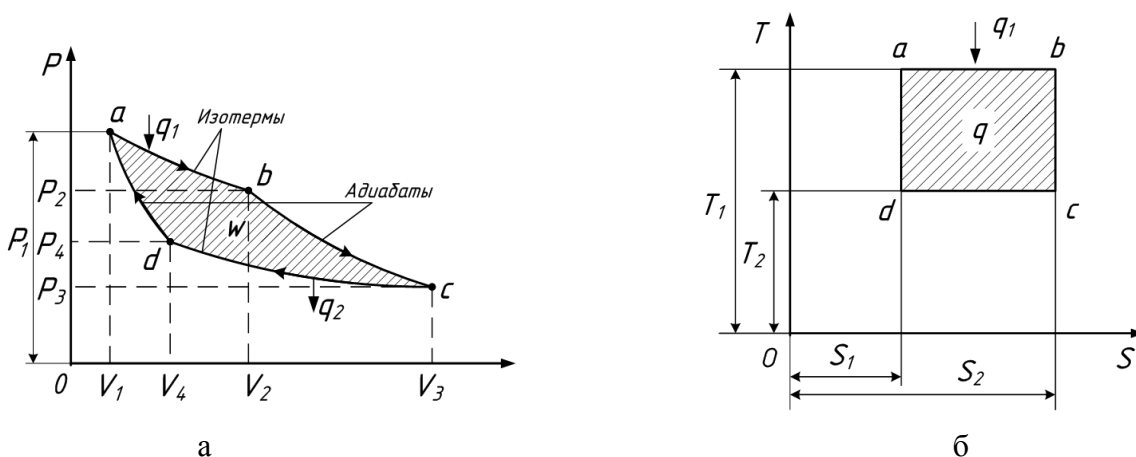


Рис.7.2 - Цикл Карно на $p-v$ - и $T-s$ - диаграммах

Второй процесс - адиабатное расширение. Газ расширяется по линии $b - c$, без теплообмена с внешней средой, поршень перемещается и газ совершает удельную работу за счёт своей внутренней удельной энергии. При этом температура и давление падают. Движение поршня прекращается в точке c , когда температура системы достигнет температуры холодильника T_2 . После этого цилиндр приводится в термический контакт с холодильником и начинается третий процесс.

Третий процесс – изотермическое сжатие. Поршень возвращается обратно в первоначальное положение настолько медленно, что газ остаётся при температуре холодильника. При этом над газом совершается работа внешними силами. Объём его уменьшается, температура остаётся постоянной, а давление возрастает. В точке d система термически изолируется.

Четвёртый процесс – адиабатное сжатие. Сжатие газа внешними силами продолжается, но без теплообмена. Объём его уменьшается, а температура и давление повышаются. Когда температура достигнет температуры источника теплоты T_1 , процесс сжатия прекращается и цикл Карно замыкается. Таким образом, на диаграмме цикл Карно изображается замкнутой кривой $a-b-c-d-a$. При этом совершается удельная работа w , численно равная площади, ограниченной этой кривой.

На Ts – диаграмме (рис.7.2,б) пл. $abcd$ численно равна количеству удельной теплоты, преобразованной в полезную удельную работу. Площади на обеих диаграммах должны быть равны. Термический К.П.Д. цикла Карно определяется по формуле:

$$\eta_t = 1 - T_2/T_1 \quad (7.3.)$$

Из формулы видно, что:

1. термический КПД цикла Карно не зависит от свойств рабочего тела, а определяется только значениями абсолютных температур T_2 и T_1 (теорема Карно);
2. значения термического КПД цикла Карно возрастает с увеличением T_1 и уменьшением T_2 ;
3. термический КПД цикла Карно всегда меньше единицы, так как равным единице он мог бы быть или при $T_2 = 0$, или при $T_1 = \infty$, что недостижимо даже в идеальном цикле.

Цикл Карно эталон, к которому необходимо стремиться при создании реальных машин.

Для повышения термического КПД цикла Карно необходимо увеличивать перепад температур между источником тепла и холодильником. Реальный тепловой двигатель тем совершеннее, чем ближе его КПД к КПД цикла Карно, протекающего в тех же температурных границах.

7.2 Сущность второго начала термодинамики.

Второе начало термодинамики изучает условия, при которых происходят преобразования одного вида энергии в другой. Оно устанавливает определенные количественные соотношения для процессов самопроизвольного распространения теплоты в физических телах. Второе начало термодинамики имеет много формулировок, но наиболее удобны следующие три эквивалентные формулировки:

- 1 Для превращения теплоты в механическую работу необходимо иметь источник тепла и холодильник с температурой ниже температуры источника, т.е. необходим температурный перепад.
- 2 Вся теплота, подведённая к двигателю, не может быть полностью превращена в работу. Часть этой теплоты переходит к внешним телам, имеющим более низкую температуру.
- 3 Теплота не может сама собой переходить от менее нагретого тела к более нагретому телу без затраты внешней работы.

Первые две формулировки относятся к двигателям, в которых теплота переходит в работу. Так, например, в паросиловой установке горячим источником являются продукты

сгорания топлива, отдающие теплоту рабочему телу (воде). Полученный в паровом котле пар поступает на рабочие лопатки турбины. Здесь он, расширяясь, производит работу и охлаждается. Отработанный пар направляется в конденсатор, где отдаёт оставшуюся в нём теплоту охлаждающей воде (холодильнику). В двигателях внутреннего сгорания теплота сжигаемого топлива сообщается продуктом сгорания (рабочему телу). Отработанный газ при более низкой температуре отводится в атмосферу. Третья формулировка имеет непосредственное отношение к холодильным установкам. Чтобы иметь внутри холодильника температуру ниже температуры окружающей среды, необходимо затратить определённое количество энергии.

Глава 8 Водяной пар

В зависимости от физических условий (температуры и давления) все вещества могут находиться в твёрдом, жидком и газообразном состоянии (фазах). Переход из одного состояния в другое называют фазовым превращением или фазовым переходом. Переход жидкой фазы в газообразную называется парообразованием, а переход газообразной фазы в жидкую – конденсацией.

8.1 Процесс парообразования.

Испарение. Испарением называют процесс парообразования с поверхности раздела жидкой и газообразной фаз, происходящий при любой температуре. Часть молекул при этом покидает поверхность жидкости и образует над ней пар. При испарении вылетающие молекулы преодолевают силы притяжения оставшихся на поверхности молекул, т.е. совершают против этих сил работу. Вся эта работа совершается молекулами за счёт кинетической энергии их теплового движения. Не все молекулы способны совершать работу, а только те, которые обладают достаточно большой кинетической энергией.

Процесс испарения без подвода теплоты к жидкости сопровождается её охлаждением. Это объясняется тем, что в жидкости остаётся всё меньше молекул, имеющих большие скорости, вследствие чего уменьшается средняя скорость движения оставшихся в ней молекул, и температура жидкости падает.

Если поддерживать температуру жидкости постоянной, т.е. непрерывно подводить к жидкости тепло, то число оторвавшихся от жидкости молекул, в единицу времени будет постоянным. В силу хаотичности движения молекул пара, одновременно с их переходом из жидкой в газообразную фазу, происходит обратный процесс – конденсация. При конденсации часть молекул пара снова возвращаются в жидкость. Если испарение происходит в закрытом сосуде, то количество пара будет увеличиваться до тех пор, пока не наступит динамическое равновесие, т.е. количество жидкости и пара станет постоянным. Это означает, что число частиц, покидающих жидкость в единицу времени, равно числу частиц возвращающихся за это же время в жидкость.

Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называется насыщенным. При равновесии устанавливается постоянная плотность пара, которая отвечает вполне определённому давлению. Это давление называется упругостью насыщенного пара. Упругость насыщенного пара возрастает с повышением температуры. Чем выше температура, тем больше число молекул жидкости переходит в газообразное состояние и тем выше плотность, следовательно, и упругость пара, при которой наступает равновесие. Пар, находящийся в соприкосновении с жидкостью и насыщающий пространство над её поверхностью, называется влажным насыщенным паром. Влажный насыщенный пар представляет собой смесь пара и мельчайших капель воды. Вода в этой смеси может находиться в виде взвешенных частиц (капель), или струек, стекающих по стенкам сосуда. Находящаяся в равновесии с паром вода является примером насыщенной жидкости. Количество частиц жидкости в паре определяет степень сухости или влажности пара.

Кипение. Кипением называют парообразование, характеризующееся возникновением новых поверхностей раздела жидкой и паровой фаз внутри жидкости,

нагретой несколько выше температуры насыщения. Внешним проявлением этого является образование большого числа пузырьков, поверхности которых и служат границами раздела фаз.

Температура и давление, при котором происходит кипение, связаны между собой. Их называют температурой и давлением насыщения и обозначают как t_n и p_n . Чем выше давление, при котором кипит жидкость, тем соответственно выше её температура кипения.

Если увеличить подвод тепла к кипящей жидкости, то парообразование будет протекать интенсивней. Однако температура воды и пара всё же остаётся постоянной до тех пор, пока последняя капля жидкости не испарится. Пар, не содержащий в своём составе частиц воды, но имеющий температуру и давление насыщения, называют сухим насыщенным паром.

Паросодержание насыщенного пара. Количество сухого пара, так же как и количество влаги в процессе парообразования, может изменяться от нуля до единицы.

Если в 1 кг пара заключается x кг сухого насыщенного пара и $(1 - x)$ кг влаги, то x называется паросодержанием или степенью сухости пара, $(1 - x)$ – влагосодержанием или степенью влажности пара. Физическая величина x является одним из главных параметров влажного насыщенного пара, и его состояние не может быть определено, если не известна степень сухости пара. В технических расчётах x и $(1 - x)$ выражаются в долях единицы, а иногда в процентах. Так если влажный насыщенный пар имеет степень сухости $x = 0,85$, то его влагосодержание $(1 - x) = 1 - 0,85 = 0,15$, т. е. пар состоит из 85% сухого пара и 15% воды. Состояние насыщенного пара очень неустойчиво. Малейшее изменение условий, в которых он находится, приводит к конденсации, либо к парообразованию.

Перегретый пар. Если к сухому насыщенному пару подводить тепло при постоянном давлении, то температура его будет повышаться, объём увеличиваться, и сухой насыщенный пар перейдёт в состояние перегретого. Степень перегретого пара Δt определяется как:

$$\Delta t = t - t_n$$

где t – температура перегретого пара, t_n – температура насыщенного пара.

Водяной пар получают в паровых котлах различных размеров и типов. Перегрев пара осуществляется в пароперегревателях, куда он поступает из котла во влажном насыщенном состоянии. В пароперегревателях пар сначала подсушивается, т. е. влага, находящаяся в нём, превращается в пар, а затем перегревается до заданной температуры. Чем выше температура перегрева, тем ближе он по своим свойствам к идеальному газу.

8.2 Процесс парообразования на $p\nu$ – диаграмме.

При рассмотрении процесса парообразования на $p\nu$ – диаграмме примем следующие обозначения, существующие в теплофизике: все параметры жидкости при 0°C отмечают индексом «ноль» (v_0, s_0, i_0 и т.п.); параметры при температуре насыщения – одним штрихом (v', s', i' и т.п.); параметры сухого насыщенного пара – двумя штрихами (v'', s'', i'' и т.п.); параметры влажного насыщенного пара – индексом x (v_x, s_x, i_x и т.п.); параметры перегретого пара – без индекса.

Допустим, что в цилиндре под поршнем (рис.8.1) находится 1 кг воды, которую необходимо превратить в пар. К поршню цилиндра с внешней стороны приложена нагрузка – сила P , обеспечивающая постоянное давление внутри цилиндра. На диаграмме по оси абсцисс отложены удельный объём воды и образовавшегося пара, а по оси ординат – давление в цилиндре. Следует сделать оговорку, что кривые на диаграмме не соответствуют действительному соотношению объёмов воды и пара. Это объясняется тем, что объём воды при невысоких давлениях пренебрежимо мал по сравнению с объёмом насыщенного пара того же давления. Таким образом, если построить диаграмму, соблюдая точные пропорции и отметить удельный объём воды отрезком абсциссы,

порядка нескольких миллиметров, то удельный объём сухого насыщенного пара пришлось бы отмечать отрезком, порядка нескольких метров.

Рассмотрение диаграммы следует начинать с подогрева жидкости от 0°C до температуры кипения. Однако в этом интервале изменение объёма воды, столь мало, что отобразить это на диаграмме не представляется возможным. Поэтому рассматривать процесс парообразования на $p-v$ – диаграмме начнём с момента кипения воды, не рассматривая процесс его предварительного подогрева.

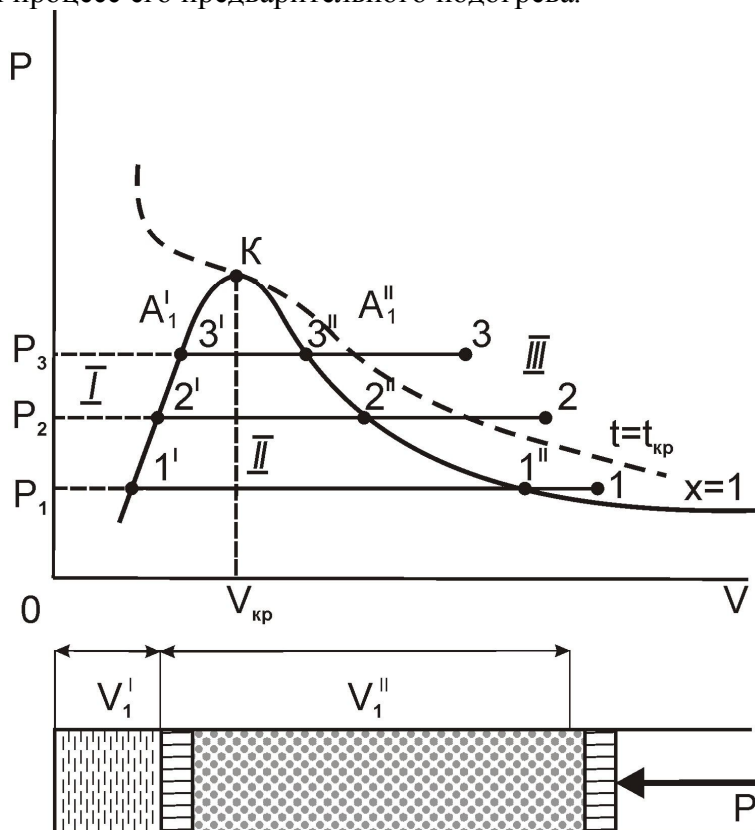


Рис.8.1 - Изменение состояния водяного пара на $p-v$ – диаграмме

Начало процесса на диаграмме изображается точкой $1'$. Это означает, что 1 кг воды при температуре и давлении насыщения (t_1 и p_1) занимает в цилиндре удельный объём v_1' . Практически в цилиндре в этот момент находится однофазная среда, состоящая из воды. При дальнейшем подводе теплоты к цилиндру происходит постепенно превращение воды в пар. Процесс парообразования при постоянном давлении протекает по изобаре $1' - 1''$. Эта изобара совпадает с изотермой, т.к. подведенное в это время тепло расходуется не на повышение температуры воды и пара, а только на преодоление сил притяжения между молекулами и на работу расширения пара. В это время в цилиндре находится двухфазная среда: вода + пар, которая является влажным насыщенным паром. Образующийся пар, расширяясь, передвигает поршень слева на право, увеличивая свой удельный объём в цилиндре. Чем меньше остаётся в цилиндре воды, тем больше в нём образуется пара. Пар становится суше, и удельный объём его увеличивается. В точке $1''$ последняя частица жидкости превращается в пар. Эта точка интересна тем, что она фиксирует момент, когда 1кг воды в цилиндре превращается в 1кг сухого насыщенного пара. В цилиндре опять находится однофазная среда – сухой насыщенный пар при температуре и давлении насыщения с параметрами p_1 , v_1'' , t_1 . Из точки $1''$ процесс может идти в направлении перегрева пара или, наоборот, в направлении его конденсации. Если к цилиндру продолжать подвод удельного количества теплоты при постоянном давлении, то процесс превращения сухого насыщенного пара в перегретый пойдёт по изобаре $1'' - 1'''$. Изобара уже не будет одновременно изотермой, как это было при парообразовании по линии $1' - 1''$,

потому что подведённое к сухому насыщенному пару удельное количество теплоты затрачивается на повышение его температуры, т.е. на перегрев пара. Если от сухого насыщенного пара (точка 1'') отводить удельное количество тепла при постоянных давлении и температуре, то 1 кг сухого насыщенного пара, постепенно конденсируясь по линии 1''-1' превратится в 1 кг воды (точка 1').

Таким образом, процесс, протекающий слева направо, является процессом парообразования, а справа налево по линии 1''-1' – процессом конденсации.

Рассмотрим процесс превращения 1 кг воды в пар, но при давлении $p_2 > p_1$. С повышением давления повышается и температура кипения. Вода, нагреваясь до температуры кипения $t_2 > t_1$, увеличивает свой удельный объём (за счёт собственного расширения при нагревании) до $v_2' > v_1'$. Поэтому точка 2' определяющая начало кипения воды (рис. 8.1), расположена правее точки 1' при соответствующей ординате, отвечающей давлению p_2 . Дальнейший процесс испарения воды, протекающий по изобаре 2'-2'' аналогичен только, что рассмотренному процессу при давлении p_1 (изобара 1'-1''). Очевидно, что с повышением давления плотность сухого насыщенного пара увеличивается, а его удельный объём (величина, обратная плотности) уменьшается. Поэтому точка 2'' находится левее точки 1''.

Если провести процесс испарения 1 кг воды при давлении $p_3 > p_2$, то испарение закончится быстрее, чем при давлении p_2 . Удельный объём сухого насыщенного пара в точке 3'' будет меньше, чем удельный объём сухого насыщенного пара в точке 2''.

Таким образом, из диаграммы видно, что с повышением давления отрезки (1'-1'', 2'-2'', 3'-3''), лежащие между точками начала кипения воды и полного её испарения, укорачиваются. При определённой температуре и соответствующем ей давлении разность удельных объёмов воды и пара станет равной нулю. Точки начала кипения и конца парообразования совпадут в некоторой точке K .

Пограничные кривые. Если точки начала кипения воды 1', 2', 3' и точку K соединить между собой, то получим плавную кривую линию A' , называемую левой или нижней пограничной кривой. Соединяя точно так же точки полного испарения воды 1'', 2'', 3'' и точку K , получим ещё одну плавную кривую – линию A'' , называемую правой или верхней пограничной кривой.

Кривая A' является линией нулевого паросодержания, или линией жидкости на границе испарения. Это значит, что при любых значениях p и v в любой точке линии A' паросодержание $x = 0$. Кривая A'' является линией сухого насыщения пара. Эта – линия, на которой при любых значениях p и v'' паросодержание $x = 1$.

Пограничными эти кривые называют потому, что они являются границами, делящими диаграмму на три следующие области:

I – область жидкости, расположенную слева от кривой A' .

II – область насыщенного пара между кривыми A' и A'' .

III – область перегретого пара, находящуюся правее кривой A'' .

Критическое состояние вещества. Через точку K можно провести единственную изотерму, которую называют критической изотермой, а температуру – критической температурой ($t_{кр}$). На рисунке изотерма показана пунктиром. Точке K на этой изотерме соответствует соответственно $p_{кр}$, $v_{кр}$, $t_{кр}$ – их называют критическими параметрами.

Итак, при температуре, равной или выше критической, вода ведёт себя как газ. При повышении давления удельный объём уменьшается. Вещества, находящиеся в критическом состоянии, являясь однофазным, обладает свойствами газообразных и жидких тел одновременно.

Критическая изотерма делит область перегретого пара на две части. Слева от него находится перегретый пар, имеющий температуру ниже критической. Его легко можно перевести в жидкость. Для этого при постоянной температуре повышают давление и перегретый пар, пройдя двухфазное состояние (вода + насыщенный пар), превращается в жидкость. Справа от критической изотермы находится пар, по своим свойствам

приближающийся к идеальному газу. Для того чтобы перевести его в жидкое состояние, сначала снижают температуру ниже критической и соответственно снижается давление пара. Затем изотермически сжимают и переводят в двухфазное состояние (вода + пар), после чего насыщенный пар переводится в воду.

В настоящее время эти процессы настолько изучены, что, изменяя параметры вещества, переводят жидкость в газ и газ в жидкость минуя даже двухфазное состояние.

8.3 Процесс парообразования на Ts – диаграмме

На рис. 8.2 изображена Ts – диаграмма водяного пара. Её строят, откладывая значения энтропии начала и конца кипения для различных температур. Полученные при построении диаграммы пограничные кривые A' и A'' так же, как и на $p-v$ -диаграмме, сходятся в критической точке K и делят диаграмму на те же три области: I – область жидкости; II – область влажного насыщения пара и III – область перегретого пара.

При рассмотрении процесса парообразования на $p-v$ -диаграмме можно было бы пренебречь подогревом жидкости от 0°C до температуры кипения, потому что увеличение её объёма в этот период незначительно и такое приближение можно считать справедливым. В Ts – диаграмме по оси абсцисс отложены значения энтропий. На приращение энтропии в период подогрева жидкости затрачивается большое количество теплоты, которым пренебречь нельзя, поэтому рассмотрение Ts – диаграммы начнём с определения удельного количества теплоты, необходимого для подогрева 1кг воды от 273К до температуры кипения.

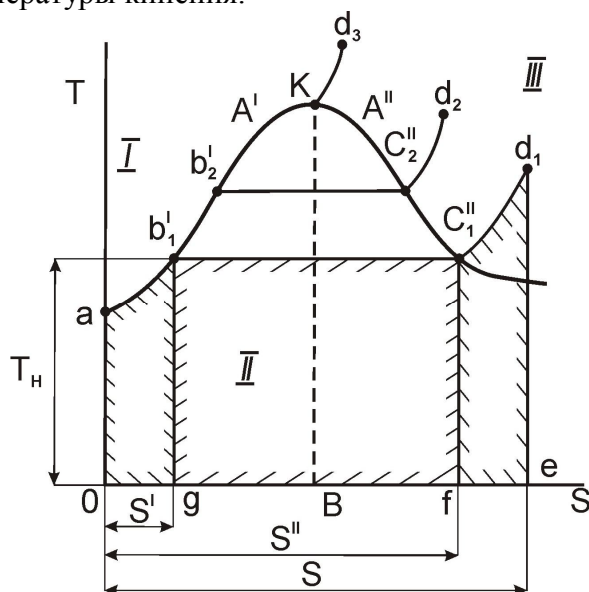


Рис.8.2 - Изменение состояния водяного пара на TS - диаграмме

Теплота жидкости. На диаграмме (рис. 8.2) начало подогрева воды характеризуется точкой a с параметрами $s_0 = 0$ и $T = 273\text{K}$. За начало отчёта диаграммы обычно принимают состояние воды при $T = 273\text{K}$; при этой температуре условно допускается, что для любого давления $u_0 = 0$, $i_0 = 0$ и $s_0 = 0$. Следует отметить, что выбор начала координат не играет существенной роли, так как в расчётах обычно пользуются разностями величин u , i и s , и начало отсчёта, таким образом, исключается.

Процесс подогрева жидкости протекает при постоянном давлении по изобаре ab'_1 которая практически сливается с нижней пограничной кривой. На подогрев воды затрачивается удельное количество теплоты q , численно равное пл. $0ab'_1g0$. Эту теплоту называют удельным количеством теплоты жидкости. Первое начало термодинамики можно выразить таким образом:

$$q = p(v' - v_0) + (u' - u_0), \quad (8.1)$$

где $p(v' - v_0)$ – удельная работа расширения воды при её нагревании от 273К до температуры кипения;

$(u' - u_0)$ – изменение внутренней удельной энергии воды при её нагревании от температуры 273К до температуры кипения. Однако расширение жидкости при её нагревании в этом интервале температур столь незначительно, что удельную работу расширения можно считать равной нулю. Тогда равенство (8.1) можно представить как:

$$q = (u' - u_0)$$

Но по условию внутренняя энергия воды при температуре 273К равна нулю, т.е. $u_0 = 0$

Поэтому $q = u'$ (8.2)

Таким образом всё удельное тепло расходуется на увеличение внутренней энергии.

Удельную теплоту q можно выразить через удельную энтальпию:

$$q = (i' - i_0),$$

где i' – удельная энтальпия воды при температуре кипения

i_0 – удельная энтальпия воды при температуре 273 К.

По принятому условию $i_0 = 0$, поэтому:

$$q = i' \quad (8.3)$$

Сравнивая формулы (8.2) и (8.3) получим: $u' = i'$ (8.4)

Нагревание жидкости от 273К до температуры кипения сопровождается приращением удельной энтропии. Принимаем удельную энтропию жидкости при 273К равной нулю ($s_0 = 0$), а удельную теплоёмкость жидкости постоянной и используя равенство (6.3), можно определить удельную энтропию воды при температуре кипения:

$$s' = \ln T_n / 273$$

Теплота парообразования. После подогрева воды до температуры кипения её необходимо превратить в сухой насыщенный пар при постоянной температуре и давлении. Количество теплоты, затраченное на превращение 1 кг воды, нагретой до температуры кипения, в 1 кг сухого насыщенного пара, называют удельной теплотой фазового превращения и обозначают r . На TS – диаграмме удельная теплота фазового превращения изображается пл. $gb'ic''ifg$, одна сторона которого измеряется отрезком оси ординат, равным температуре насыщения T_n , а вторая – отрезком оси абсцисс, равным приращению удельной энтропии $s_1 = s'' - s'$:

$$r = T_n s_1$$

Удельная теплота фазового превращения r затрачивается на изменение удельной внутренней энергии и на совершение удельной работы.

$$r = (u'' - u') + p(v'' - v'), \quad (8.5)$$

где u'' и v'' – удельная внутренняя энергия и удельный объём сухого насыщенного пара при температуре насыщения T_n ;

u' и v' – удельная внутренняя энергия и удельный объём жидкости при температуре и давлении кипения.

$(u'' - u') = \varphi$ – называют удельной внутренней теплотой (φ);

$p(v'' - v') = \psi$ – удельная внешняя теплота (ψ).

Таким образом,

$$r = \varphi + \psi$$

или используя формулу (8.5.) получим:

$$r = (u'' + pv'') - (u' + pv') \quad (8.6)$$

или

$$r = i'' - i'$$

Полная удельная теплота сухого насыщенного пара λ складывается из удельной теплоты жидкости q и удельной теплоты фазовых превращений r :

$$\lambda'' = q + r \quad \text{или} \quad \lambda'' = q + \varphi + \psi.$$

Т.к. q и φ затрачиваются на увеличение удельной внутренней энергии воды и пара, а ψ – на совершение внешней удельной работы:

$$\lambda'' = u + pv \quad (8.7)$$

Теплота перегрева. Удельная теплота, подведённая к сухому насыщенному пару при постоянном давлении, затрачивается на повышение его температуры от T_n (температура насыщения) до заданной температуры перегрева T_n . Эту величину называют удельной теплотой перегрева пара (q_n):

$$q_n = c_{pm}(T_n - T_n)$$

или

$$q_n = i - i''$$

где i и i'' - удельные энтальпии перегретого и сухого насыщенного пара.

Полная теплота перегретого пара определяется как

$$\lambda = q + r + q_n \quad (8.8)$$

8.4 Определение параметров состояния воды и водяного пара.

Вода. Удельный объём воды при температуре 273К и давлении 0,1 МПа равен $v_0 = 0,001 \text{ м}^3/\text{кг}$. Так как плотность является величиной, обратной удельному объёму, $\rho = 1/v$, то плотность воды при 273К $\rho = 1000 \text{ кг/ м}^3$.

Давление насыщения воды при температуре 273К $p_0 = 610,76 \text{ Па}$. Значения удельных внутренней энергии энтальпии для воды при температуре 273К при любых давлениях условно считают равными нулю ($u_0 = 0, i_0 = 0, s_0 = 0$).

Параметры состояния воды при температуре кипения (удельную энтальпию i' , удельную энтропию s' , удельный объём v' и плотность ρ) обычно берут из справочных таблиц водяного пара.

Влажный насыщенный пар. Удельный объём влажного насыщенного пара (рис.8.3) в какой-то промежуточной точке (например, в точке c) можно определить, рассуждая следующим образом: в точке c доля сухого пара есть x , а для воды $(1-x)$. Исходя из этого объём 1 кг смеси v_x в точке c состоит из объёма $v''x$ сухого пара и объёма $v'(1-x)$ воды,

$$v_x = v''x + v'(1-x) \quad (8.9)$$

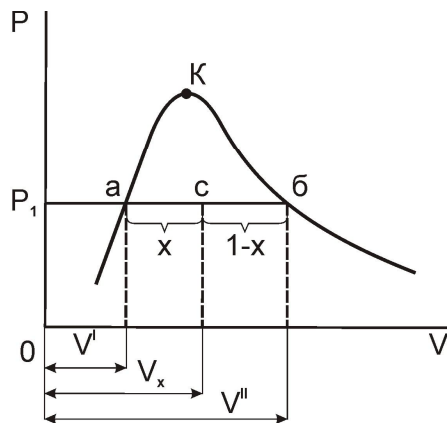


Рис. 8.3 - Соотношение воды и пара в области насыщения

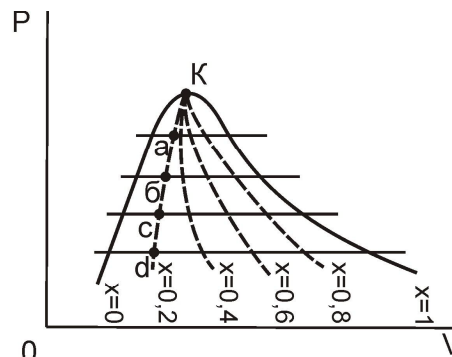


Рис.8.4 - Кривые постоянной сухости пара

Из уравнения (8.9) можно определить степень сухости пара (паросодержание) x :

$$x = (v_x - v') / (v'' - v')$$

Значение удельных объёмов воды v' и сухого насыщенного пара v'' определяют по таблице. При большом паросодержании и невысоком давлении удельный объём, занимаемый жидкостью $v'(1-x)$, очень мал по сравнению с удельным объёмом сухого пара $v''x$. Поэтому обычно им пренебрегают. Для большинства теплофизических расчётов принимают $v_x \approx v''x$. Таким образом, удельный объём влажного насыщенного пара приблизительно равен удельному объёму сухого насыщенного пара того же давления, умноженному на степень сухости.

Плотность влажного насыщенного пара определяется как величина обратная его удельному объёму:

$$\rho_x = 1/v_x \approx 1/v''x = \rho''/x.$$

По такой же схеме определяют остальные параметры влажного насыщенного пара ($r_x, \lambda_x, u_x, s_x, i_x$).

Удельное количество теплоты фазового превращения: $r_x = r x$

Удельное количество влажного насыщенного пара: $\lambda_x = q + r x$

Удельная энтальпия влажного насыщенного пара: $i_x = i' + x(i'' - i') = i' + x r.$

Удельная внутренняя энергия: $u_x = i_x - p v_x.$

Удельная энтропия влажного насыщенного пара: $s_x = s' + x(s'' - s') = s' + x r / T_n,$

где s' – удельная энтропия воды при температуре кипения.

Кривые постоянной сухости. Если на $p v$ – диаграмме (рис.8.4) соединить между собой точки a, b, c, d , соответствующие определённому значению x (например $x = 0,2$) и принадлежащие различным изобарам, то получится кривая постоянного паросодержания $x = 0,2$. Прделавав это построение для различных значений x ($x = 0,4, x = 0,6$ и т.д.), получим семейство кривых постоянной сухости ($x = \text{const}$).

Аналогично можно построить кривые сухости и на $T s$ – диаграмме.

Наличие этих кривых на диаграмме даёт возможность определить для любого состояния пара все его основные параметры: давление, объём, температуру и степень сухости.

8.5 $i s$ – диаграмма

На энтропийной $T s$ -диаграмме количество теплоты, сообщённое телу или отнятое от него, изображается площадью лежащей под кривой процесса. На практике это усложняет быстрый и точный расчёт. Если на оси ординат энтропийной диаграммы вместо температуры откладывать удельные энтальпии i , то удельная работа при $s = \text{const}$ и количество удельной теплоты при $p = \text{const}$ будут изображаться на этой диаграмме отрезками линий, а не площадями.

$i s$ – диаграммы были созданы во Всесоюзном теплотехническом институте и в настоящее время имеют широкое применение при расчёте паровых и газовых турбин.

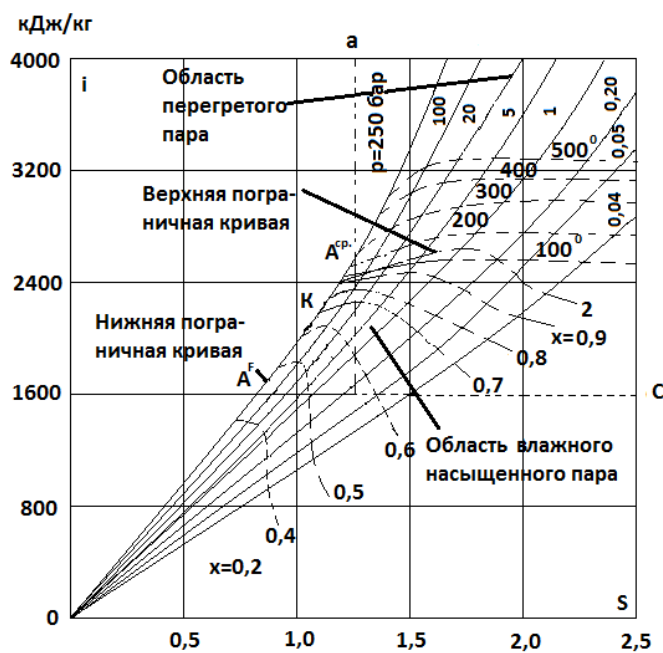


Рис.8.5 - is – диаграмма состояния водяного пара

Условно энтропию и энтальпию при 273K (0°C) считают равными нулю. Это состояние на диаграмме изображено началом координат. На диаграмме нанесены две пограничные кривые, сливающиеся в критической точке K . На нижней пограничной кривой A' ($x = 0$) отложены значения удельной энтальпии i' и удельной энтропии s' для различных состояний воды при температуре кипения. На верхней пограничной кривой A'' ($x = 1$) отложены значения i'' и s'' для различных состояний сухого насыщенного пара при температуре кипения. Пограничные кривые делят is – диаграмму на две области. Выше этих кривых расположена область перегретого пара, ниже – область влажного насыщенного пара.

Семейство изобар в области насыщения представляет собой пучок расходящихся прямых линий, начинающихся в нулевой точке. Чем больше давление, тем выше лежат изобары. Так как процесс парообразования протекает при постоянной температуре, то в области насыщения изобары являются одновременно и изотермами. В области перегретого пара от верхней пограничной кривой изобары и изотермы расходятся. Изобары отклоняются влево, а изотермы – вправо. В области больших энтропий, т.е. низких давлений и относительно высоких температур, где перегретый пар по своим свойствам близок к идеальному газу, постоянной температуре отвечает постоянная энтальпия. Здесь изотермы идут горизонтально и совпадают с линиями $i = const$. В области влажного насыщенного пара расположены линии постоянного паросодержания $x = const$ (см. пункт), также как в pv – и Ts – диаграммах.

Процессы расширения пара в паросиловых установках обычно заканчиваются в области насыщенного пара невысокой влажности $x = 0,7 - 0,75$. Поэтому для увеличения масштаба рабочей части is – диаграммы оси координат переносят выше (рис.8.5.- пунктирные оси координат). Левая часть диаграммы, лежащая вне новых осей координат отбрасывается. Получается диаграмма «с утопленным нулём». Такими диаграммами пользуются в паротурбинной технике. Однако полная диаграмма необходима для анализа работ некоторых агрегатов (насосов для котлов высокого давления, аккумуляторов пара и др.). На is – диаграмму наносят также изохору – линии постоянного удельного объёма

$v = \text{const}$. Они идут несколько круче изобар.

Состояние перегретого пара обычно определяется двумя параметрами: давлением и температурой. На is – диаграмме это состояние определяется точкой пересечения соответствующих изобары и изотермы. Состояние влажного насыщенного пара может быть определена точкой пересечения изобары с линией постоянного паросодержания $x = \text{const}$.

Глава 9 Истечение и дросселирование газового потока

9.1 Основные понятия

При конструировании многих машин типа турбин стремятся использовать возможно более высокие скорости рабочего газа. Высокие скорости потока, или струи газа, получают, реализуя его способность расширяться при течении по каналу переменного сечения.

Для получения направлений струи газа при его истечении применяют специальные насадки с каналами переменного сечения. Насадки, в которых внутренняя энергия преобразуется в кинетическую энергию движения, называют соплами. При движении газа по соплу его давление падает, а скорость увеличивается. Некоторые процессы истечения протекают с повышением давления за счёт снижения скорости. Для таких случаев используют насадки, называемые диффузорами. В практике применяют цилиндрические, суживающиеся и расширяющиеся сопла.

9.2 Истечение газа из сопла.

Располагаемая работа. При исследовании газового потока обычно принимают, что установившееся течение осуществляется без теплообмена (адиабатно), т. е. процесс протекает при постоянных параметрах в любом сечении сопла - стационарное течение газа. Первое начало термодинамики при стационарном движении будет выражено как:

$$dq = d(u + pv) + d(c^2/2); \quad (9.1)$$

dq - удельная теплота, подведённая к 1 кг газа на рассматриваемом участке его движения;

du – изменение внутренней энергии газа;

$d(c^2/2)$ – приращение удельной кинетической энергии газа при его перемещении на рассматриваемом участке.

Т.к. $u + pv = i$, то
$$dq = di + d(c^2/2). \quad (9.2)$$

При адиабатном процессе $dq = 0$, поэтому

$$d(c^2/2) = - di. \quad (9.3)$$

Из равенства следует, что при движении газа по каналу без теплообмена с внешней средой приращение его удельной кинетической энергии происходит вследствие уменьшения его удельной энтальпии.

Рассмотрим процесс истечения газа из сопла. На рис. 9.1 представлен сосуд, в котором находится газ под давлением p_1 . В стенке сосуда имеется суживающееся сопло с плавным очерченным входом. Истечение газа происходит в область с постоянным давлением $p_2 < p_1$. Пусть некоторое количество газа занимает объём, заключённый между сечениями CD и EF . Рассмотрим истечение 1 кг газа через сопло из сосуда в пространство с давлением p_2 . Допустим, что вместе с рассматриваемым удельным объёмом газа по его обеим сторонам движутся два невесомых поршня: большой поршень с площадью сечения A_1 и малый с площадью сечения A_2 . Истечение газа из сопла происходит под влиянием разности давлений $p_2 - p_1$. При этом совершается удельная работа w внешних сил, затраченная на проталкивание, и внешняя работа расширения $w_{расш}$ 1 кг газа при его течении по соплу. Удельная работа внешних сил w может быть представлена как разность полезной для истечения удельной работы w_1 и удельной работы w_2 сил сопротивления истечению, т.е.

$$w = w_1 - w_2 = p_1 A_1 s_1 - p_2 A_2 s_2, \quad (9.4)$$

где $p_1 A_1$ – сила, действующая внутри сосуда на площадь A_1 большого поршня, проталкивающая газ по соплу;
 $p_2 A_2$ – сила, действующая с наружной стороны сопла на площадь A_2 малого поршня препятствующая истечению газа из сопла;
 s_1 и s_2 – расстояния, на которые передвинутся поршни при истечении из сопла 1 кг газа.
 Заменяв произведения $A_1 s_1$ и $A_2 s_2$ – удельные объёмы, v_1 и v_2 получим:

$$w = p_1 v_1 - p_2 v_2.$$

Полная удельная работа

$$w_{\text{полн}} = w_{\text{расш}} + p_1 v_1 - p_2 v_2. \quad (9.5)$$

Применяя уравнение 6.11. удельную работу адиабатного расширения определяем как

$$w_{\text{расш}} = [(1/(k-1))(p_1 v_1 - p_2 v_2), \\ w_{\text{полн}} = [k/(k-1)] p_1 v_1 [1 - (p_2/p_1)^{(k-1)/k}]. \quad (9.6)$$

Полная удельная работа называется располагаемой работой. Она затрачивается на приращение кинетической энергии газа при его движении по каналу.
 Если считать, что потери на трение отсутствуют, то вся располагаемая удельная работа истечения преобразуется в удельную кинетическую энергию газа

$$w_{\text{полн}} = (c_2^2 - c_1^2)/2, \quad (9.7)$$

c_1 и c_2 – скорости газа перед соплом и в устье сопла.

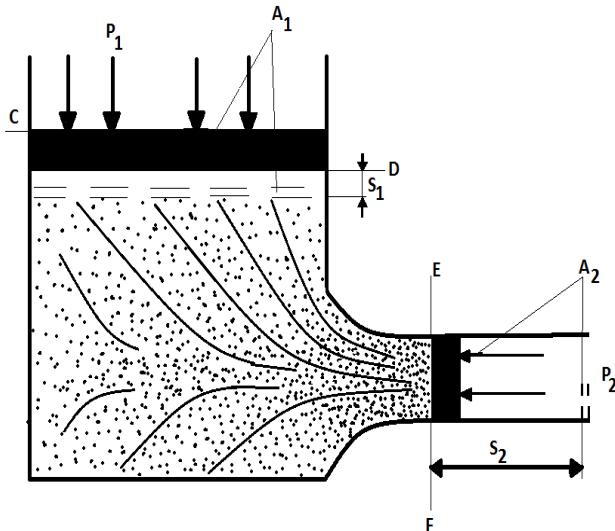


Рис.9.1 - Схема истечения газа из сопла

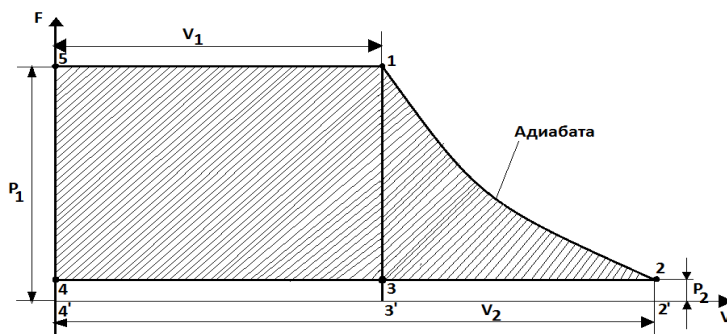


Рис.9.2 - Истечение газа из сопла на pv – диаграмме

На pv – диаграмме (рис.9.2) располагаемая удельная работа определяется пл. 1245,
 Удельная работа внешних сил $w_1 = p_1 v_1$ равна пл. 134'51.
 Удельная работа сил сопротивления истечению $w_2 = p_2 v_2$ равна пл. 224'42.
 Удельная работа расширения $w_{\text{расш}}$ пл. – 122'3'1.

Скорость истечения газа. Начальная скорость и начальная удельная кинетическая энергия струи до истечения малы и обычно ими пренебрегают. Тогда равенство (9.7) можно записать в виде

$$w_{полн} = c_2^2/2,$$

а скорость истечения газа из устья сопла равна:

$$c_2 = \sqrt{2 w_{полн}} \quad (9.8)$$

или используя формулу (9.7) получим:

$$c_2 = \sqrt{2 [k/(k-1)] p_1 v_1 [1 - (p_2/p_1)^{(k-1)/k}]}. \quad (9.9)$$

Скорость истечения газа можно выразить через удельные энтальпии, используя равенство 9.3. и проинтегрировав:

$$(c_2^2 - c_1^2)/2 = i_1 - i_2$$

Пренебрегая скоростью c_1 , то,

$$c_2 = \sqrt{2(i_1 - i_2)} \quad \text{м/с}, \quad (9.10)$$

$(i_1 - i_2) = h$ – называется теплоперепадом и определяется по is – диаграмме (кДж/кг),

$$c_2 = \sqrt{2h} \quad \text{м/с}. \quad (9.11)$$

Массовый расход газа. Зная скорость истечения газа из сопла, можно определить массовый расход газа m ,

$$m = A_2 c_2 / v_2, \quad (9.12)$$

Значение удельного объёма v_2 для адиабатного процесса определяют по формуле:

$$v_2 = v_1 (p_1/p_2)^{1/k} \quad (9.13)$$

Подставив в формулу (9.12) значение скорости c_2 из выражения (9.9), а значение удельного объёма v_2 из равенства (9.13) получим формулу для вычисления массового расхода газа m в кг/сек. через выходное отверстие с площадью сечения A_2 .

$$m = A_2 \sqrt{2 * k/(k-1) * p_2 / v_1 [(p_2/p_1)^{2/k} - (p_2/p_1)^{(k+1)/k}]} \quad (9.14)$$

Критическое давление при истечении. Из формулы (9.14) видно, что расход газа m зависит от отношения p_2/p_1 . Если принять, что $p_1 = p_2$, т.е. $p_2/p_1 = 1$, то по формуле (9.14) расход газа будет равен нулю.

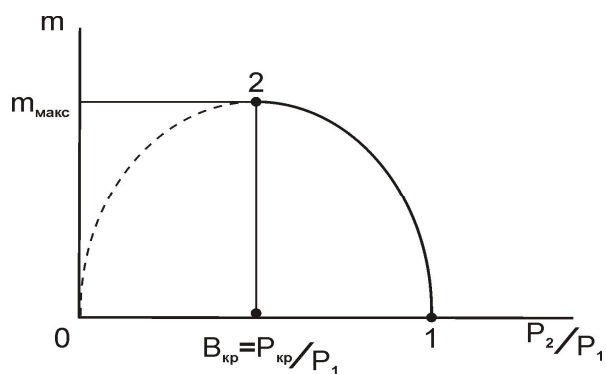


Рис.9.3 - Кривая расхода газа в зависимости от отношения давления p_2/p_1

Если в формулу (9.14) подставлять значения p_2/p_1 последовательно от 1 до 0, то получим кривую представленную на рис. 9.3. С понижением давления p_2 , при заданном и постоянном давлении p_1 , расход газа возрастает (кривая 1-2) и приобретает максимальное значение m_{max} , когда отношение давлений p_2/p_1 становится близким к 0,5, т. е. при $p_2 \approx 0,5 p_1$ (точка 2 на рис. 9.3). При дальнейшем уменьшении отношения p_2/p_1 по формуле (9.14) расход должен уменьшаться по кривой 2 – 0, а при $p_2/p_1 = 0$ расход должен быть равен нулю (точка О). В действительности же при уменьшении отношения p_2/p_1

расход, увеличиваясь достигает максимума и остаётся постоянным независимо от уменьшения давления среды, в которую вытекает газ.

Это можно объяснить, рассматривая физическую природу процессов истечения. Возмущения из окружающей среды (изменение давления среды) в виде волнового процесса проникают в глубь сопла. Давление в устье сопла изменяется в соответствии с изменением давления в окружающей среде. Это может происходить до тех пор, пока скорость течения газа в канале сопла остаётся меньше скорости распространения малых возмущений (скорости звука). Если скорость истечения станет равной скорости звука, возмущения из окружающей среды не будут передаваться в глубь сопла и дальнейшее уменьшение давления в среде не приведёт к снижению давления в выходном сечении сопла. Такое давление называют критическим и обозначают $p_{кр}$. Оно является наименьшим возможным давлением в указанном сечении и примерно равно $0,5p_1$. При этом отношение p_2/p_1 также остаётся постоянным. Его называют *критическим отношением давлений* при истечении и обозначают $\beta_{кр}$. Таким образом,

$$p_{кр}/p_1 = \beta_{кр},$$

Итак, несмотря на понижение давления среды, куда вытекает газ при критическом давлении в устье сопла скорость и удельный объём газа, достигнув критических значений, остаются постоянными. Вследствие этого остаётся постоянным и массовый расход. Точное значение критического отношения давлений можно определить исходя из формулы (9.14). Дифференцируя и приравнивая производную нулю, получим

$$p_{кр}/p_1 = \beta_{кр} = [2/(k+1)]^{k/(k-1)} \quad (9.15)$$

Критическое отношение давлений величина постоянная и зависит только от показателя адиабаты т. е. природы газа.

Наименование	k	$\beta_{кр}$
Двухатомный газ	1,4	0,528
Перегретый пар	1,3	0,546
Сухой насыщенный пар	1,135	0,577

Критическая скорость при истечении $c_{кр}$. Скорость истечения газа при критическом отношении давлений называют критической скоростью. Она равна скорости распространения звука $c_{зв}$ в вытекающем газе. Критическую скорость можно определить по формуле (9.9), если отношение давлений p_2/p_1 заменить его критической величиной $p_{кр}/p_1$ из формулы (9.15).

$$c_{кр} = \sqrt{2[k/(k+1)] p_1 v_1} \quad (9.16)$$

Из формулы (9.16) видно, что значение $c_{кр}$ зависит от природы газа, т. е. от показателя адиабаты k и от начальных параметров газа p_1 и v_1 .

Максимальный расход газа (m_{max}). Для вычисления максимального расхода при критическом отношении давлений необходимо в формуле (9.14) отношение p_2/p_1 заменить его критическим значением $p_{кр}/p_1$ из формулы (9.15):

$$m_{max} = A_2 \sqrt{2 * k/(k+1) * 2/(k+1)^{2/(k-1)} * p_1/v_1} \quad (9.17)$$

Из всего сказанного о критических параметрах следует, что при понижении давления p_2 ниже $p_{кр}$ скорость в устье сопла остаётся неизменной. Поэтому перепад давлений $p_{кр} - p_2$ не может быть использован для увеличения кинетической энергии потока газа. При выходе из сопла газ расширяется от давления $p_{кр}$ до давления p_2 . Однако это расширение не приводит к увеличению используемой кинетической энергии струи, так как истечение протекает неорганизованно и газ перемешивается с окружающей средой.

На рис.9.4 изображена pv – диаграмма, где показан неиспользованный перепад давлений $p_{кр} - p_2$, вследствие которого уменьшается располагаемая удельная работа на

величину пл. 2'233'2'. При полном расширении газа располагаемая удельная работа могла бы иметь значение, численно равное 12341.

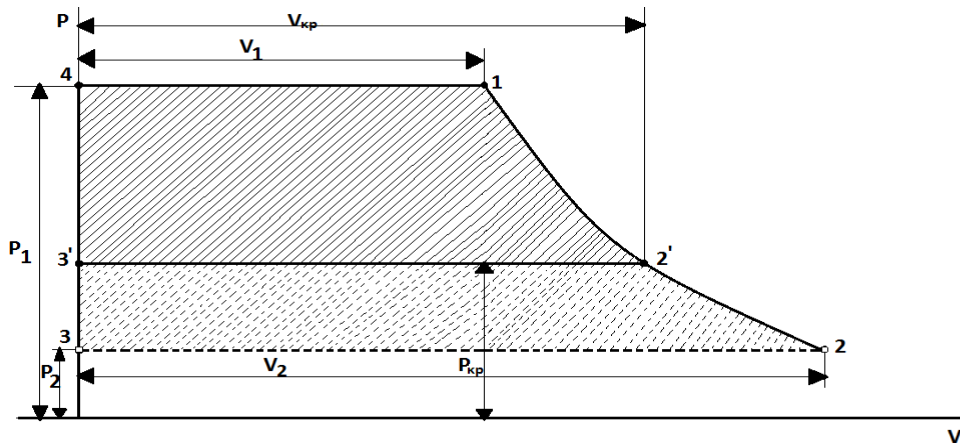


Рис.9.4 - Неиспользованный перепад давления при истечении через суживающее сопло на $p-v$ – диаграмме

Сопло Лавалья. Для полного использования внутренней энергии газа необходимо за соплом получить сверхзвуковую скорость. Для этого необходимо за соплом иметь давление меньше критического. Это достигается за счёт применения комбинированного сопла, называемого соплом Лавалья.

На рис. 9.5 представлена схема сопла Лавалья и график изменения давления газа и скорости его истечения. Первая часть – суживающаяся (до диаметра $d_{мин}$ с площадью сечения $A_{мин}$) работает как дозвуковое сопло, вторая часть расширяющаяся (до диаметра d_2 с площадью сечения A_2) – как сверхзвуковое.

Скорость звука определяется как

$$c_{зв} = \sqrt{kpv}, \text{ т.к. } pv=RT, \text{ то } c_{зв} = \sqrt{kRT},$$

где k – показатель адиабаты.

Скорость звука находится в прямой зависимости от температуры среды.

Протекая во второй части сопла, газ адиабатно расширяется. При этом его температура и давление падают, а скорость истечения возрастает. Однако в первой части сопла она не достигает скорости звука, несмотря на то, что скорость звука с понижением температуры среды падает. В горловине сверхзвукового сопла, т.е. в наименьшем сечении сопла ($A_{мин}$) устанавливаются критическое давление $p_{кр}$ и критическая скорость $c_{кр}$, равная скорости звука в среде. При движении по расширяющейся части сопла происходит дальнейшее расширение газа. Возрастает его скорость и удельный объём, а давление понижается. Понижается и скорость звука в среде, в которую газ вытекает, а скорость истечения газа становится больше скорости звука в среде. При выходе из сопла давление становится равным давлению среды, в которую газ вытекает, а скорость истечения газа становится больше скорости звука в среде $c_{газа} > c_{зв}$.

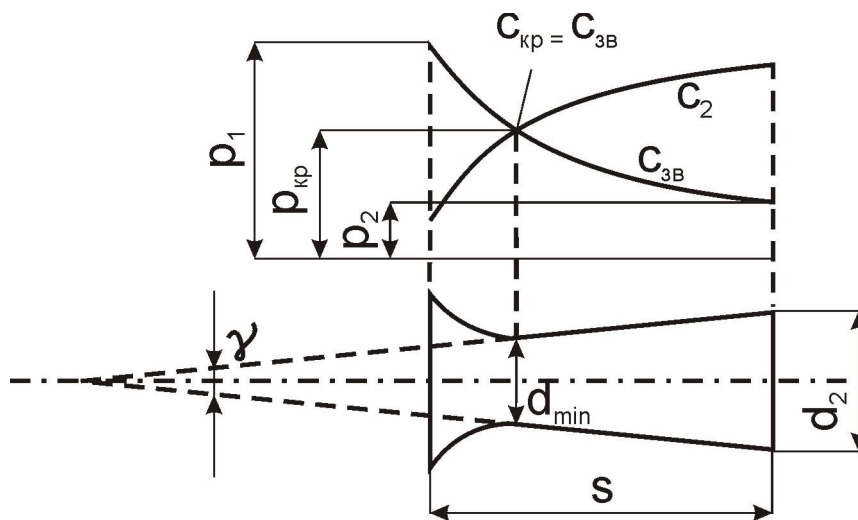


Рис.9.5 - Схема сопла Лавали и график изменения давления газа и скорости его истечения

Применение расширяющегося сопла позволило увеличить скорость истечения за счёт более полного использования перепада давлений. При этом массовый расход m_{max} остаётся постоянным, так как расход газа через сопло определяется минимальным сечением сопла площадью A_{min} и критическими параметрами $c_{кр}$ и $v_{кр}$, которые не зависят от расширяющейся части сопла.

Увеличить массовый расход вытекающего газа через сопло Лавали можно, повысив начальное давление и увеличив минимальное сечение площадью A_{min} сопла. Максимальный массовый расход газа m_{max} можно определить по формуле (9.16)

9.3 Дросселирование потока газа

Дросселирование – это процесс изменения состояния газа при адиабатном расширении в момент прохождения его через местное гидродинамическое сопротивление (дроссель), к которому относятся вентили, не полностью открытые краны, задвижки, клапаны, сужение трубопроводов и пористые перегородки.

Рассмотрим движение газа по трубопроводу с поперечным сечением площадью A_1 . Внутри трубопровода установлена диафрагма, имеющая суженное отверстие небольшого размера. Пусть по трубопроводу (рис.9.6) течёт газ от сечения I – I к сечению II – II через отверстие в диафрагме. Процесс истечения адиабатный.

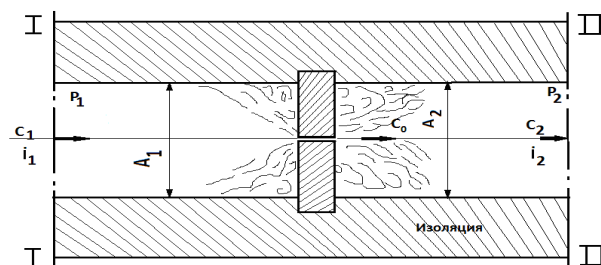


Рис.9.6 - Дросселирование потока газа

В суженном отверстии диафрагмы скорость газа возрастает от c_1 до c_0 , а давление понижается, как в обычном процессе истечения через сопло. В правой половине трубопровода после суженного отверстия скорость газа почти полностью понизится до

своего первоначального уровня. Считая, что $A_1 = A_2$, имеем $c_1 \approx c_2$. Давление же p_2 за диафрагмой восстановится только частично и будет меньше, чем было перед диафрагмой. Это объясняется тем, что при прохождении газа через суженное отверстие возникают потери энергии на вихреобразование и трение. Проинтегрировав уравнение (9.3), получим:

$$c_2^2 - c_1^2 / 2 = i_1 - i_2,$$

Принимая для сечения I – I и II – II $c_1 \approx c_2$, получим $i_1 = i_2$, т. е. удельная энтальпия газа не изменяется в результате его дросселирования.

При дросселировании реальных газов, особенно при высоких давлениях наблюдается снижение температуры. Это явление называется эффектом Джоуля – Томсона.

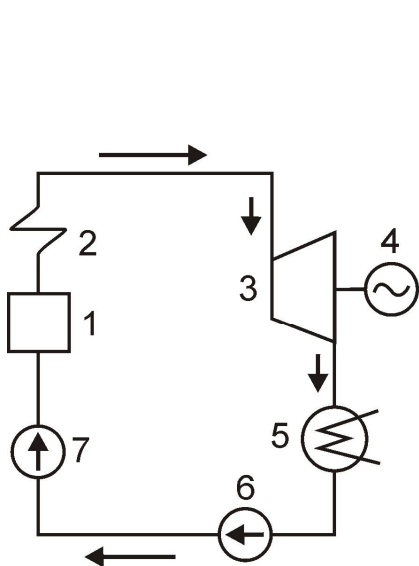
В технике низких температур, охлаждение, получаемое при дросселировании, служит основой большинства низкотемпературных процессов, а при сжижении газов играет решающую роль. Поэтому в специальных редуционно – охлаждающих установках, когда необходимо уменьшить давление рабочего тела, широко применяют процесс дросселирования. Дросселирования применяют также при измерении и регулировании расхода газа.

Глава 10 Цикл паросиловой установки

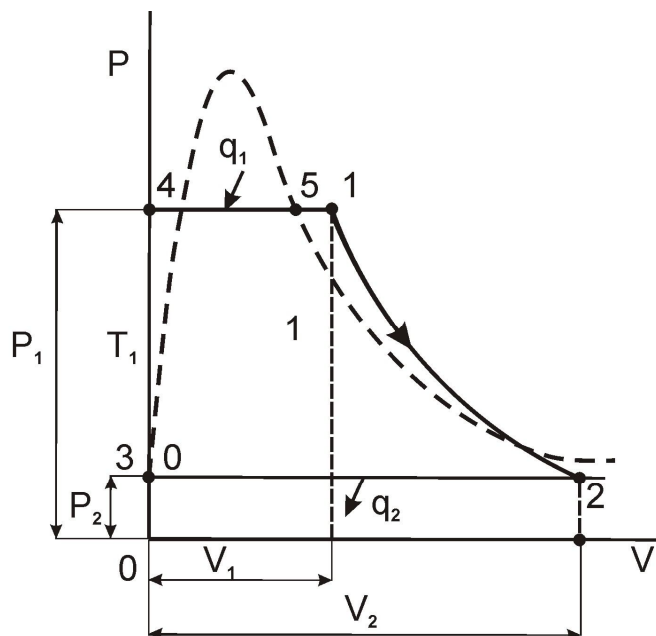
10.1 Схема паросиловой установки

В настоящее время основную часть электроэнергии (около 80%) вырабатывают на паросиловых установках, рабочим телом является вода в жидком и парообразном состоянии.

Паросиловой установкой называют совокупность устройств, в которых протекают процессы преобразования тепла, полученного при сгорании топлива, в механическую работу.



10.1 - Элементарная схема паросиловой установки



10.2 - Идеальный цикл Ренкина

Рассмотрим процессы изменения состояния рабочего тела в паросиловой установке по схеме 10.1. В схему включены только те агрегаты, в которых происходит изменение состояния рабочего тела. К паровому котлу 1 подводится теплота. Вода, находящаяся в котле, нагревается и превращается в насыщенный влажный пар. Насыщенный влажный пар поступает в пароперегреватель 2, подсушивается и перегревается до заданной температуры. Готовый к работе пар направляется в турбину 3, где он, расширяясь,

совершает работу. Механическая работа передаётся на вал генератора 4, а отработавший пар из турбины направляется в конденсатор 5, где он конденсируется. Затем конденсатный 6 и питательный 7 насосы направляют конденсат (питательную воду) в котёл для следующего цикла, повышая при этом давление до заданного значения.

10.2 Идеальный цикл Ренкина.

Идеальным циклом паросиловой установки является цикл Ренкина. Цикл состоит из четырёх процессов – двух изобарных и двух адиабатных (Рис.10.2). Пар из пароперегревателя с параметрами p_1, v_1, t_1 попадает в двигатель (точка 1), где расширяется по адиабате 1-2 до параметров p_2, v_2, t_2 и совершает при этом работу. Отработавший пар с параметрами p_2, v_2, t_2 попадает в конденсатор – холодильник (точка 2), где от него отводится удельная теплота q_2 при постоянном давлении и соответствующей постоянной температуре (изобара 2-3). Пар при этом конденсируется. Конденсат с конечным давлением p_2 забирается насосом (точка 3), повышающим давление до начального значения p_1 (линия 3-4), и подаётся в котлоагрегат. Температура воды на входе в котлоагрегат практически равна температуре на выходе воды из конденсатора t_2 и значительно ниже температуры кипения, соответствующей давлению воды p_1 на выходе из насоса.

Вода практически несжимаема, поэтому при повышении давления в насосе от p_2 до p_1 объём воды становится почти неизменным. Адиабату сжатия 3-4 можно считать одновременно и изохорой, а линия сжатия в насосе сливается с осью ординат. Процесс 4-1 является процессом образования и перегрева пара при начальном давлении p_1 . Полезная удельная работа $w_{пол}$, совершённая 1 кг пара за цикл, равна разности удельных энтальпий:

$$w_{пол} = i_1 - i_2$$

Часть её расходуется на подачу конденсата насосом. Однако значение этой работы столь мало по сравнению с работой, получаемой при расширении пара, что практически можно пренебречь.

КПД цикла Ренкина. По общему определению термический КПД η_t любого цикла равен:

$$\eta_t = (q_1 - q_2)/q_1 = w_{пол}/q_1 \quad (10.1)$$

К.П.Д. цикла Ренкина определяется выражением

$$\eta_t = w_{пол}/q_1 = (i_1 - i_2)/(i_1 - i_6),$$

где i_6 - удельная энтальпия воды на входе в насос и на выходе из него.

10.3 Способы повышения экономичности паросилового цикла.

Экономичность паросилового цикла (значение его КПД) в значительной степени зависит от начальных параметров рабочего тела p_1 и t_1 и его конечного давления p_2 . Эту зависимость можно установить с помощью *is*-диаграммы и формулы, определяющей КПД идеального цикла Ренкина. Рассмотрим различные значения экономичности паросилового цикла.

Влияние начальных параметров пара p_1 и t_1 . На рис.10.3 показаны три варианта работы турбины с различными начальными давлениями пара $p_1''' > p_1'' > p_1'$ при постоянных p_2 и t_1 . С повышением начального давления полезная работа цикла (отрезки $w' = 1' 2'$; $w'' = 1'' 2''$; $w''' = 1''' 2'''$) возрастает, т.е. $w''' > w'' > w'$. Количество же подведённой за цикл удельной теплоты несколько уменьшается $q' > q'' > q'''$, при этом из формулы 10.1 видно, что термический КПД цикла возрастает.

На рис.10.3 видно, что с повышением давления влажность отработанного пара повышается. Так при начальном давлении p_1' пар выходит из турбины ещё в перегретом состоянии (точка 2'). При давлении $p_1'' > p_1'$ степень сухости x'' отработанного пара понижается и точка 2'' находится в области влажного насыщенного пара вблизи верхней пограничной кривой. При давлении же $p_1''' > p_1''$ степень сухости x''' отработанного пара ещё более понижается (точка 2''').

Пар высокой влажности быстро изнашивает лопатки турбины. С повышением начального давления необходимо повышать и температуру перегрева пара. Однако повышение начальной температуры пара приводит к снижению прочности металлических деталей, работающих длительное время в области высоких температур. Следует отметить, что достижения отечественной металлургии дают возможность повышение начальной температуры (в настоящее время она достигает 560°C).

Влияние конечного давления пара. Чем ниже давление пара p_2 на выходе из турбины, тем больше работа, произведённая паром, и выше КПД всей паросиловой установки. Однако конечное давление p_2 равно давлению в конденсаторе, определяется температурой охлаждающей воды конденсатора. Чем ниже температура, тем больше отбирается теплоты.

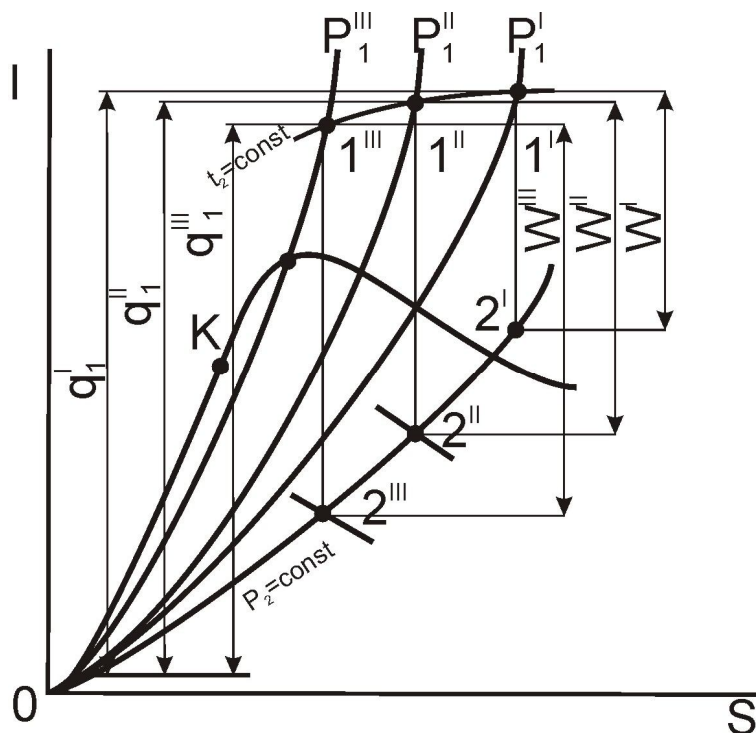


Рис.10.3 - Влияние давления перегретого пара на повышение экономичности паросилового цикла

Очевидно, чем ниже температура пара и охлаждающей воды в конденсаторе, тем ниже и давление p_2 , соответствующая температуре t_2 . Но повысить КПД большим снижением p_2 невозможно из-за отсутствия естественных охладителей, имеющих температуру ниже среднегодовой температуры воды $10 - 15^{\circ}\text{C}$.

Кроме того, понижение расчётного конечного давления при заданной температуре охлаждающей воды вызывает увеличение поверхности и стоимости конденсатора, увеличение количества охлаждающей воды, а, следовательно, и увеличения расхода электроэнергии на её прокачку. Поэтому выбор расчётного давления в конденсаторе базируется на технико-экономических расчётах.

Промежуточный перегрев пара. Применение пара высокого давления увеличивает влажность пара в конце расширения. Для устранения этого недостатка применяют промежуточный перегрев пара (рис.10.4). Пар, после частичного расширения в турбине отводится в пароперегреватель, где он вторично перегревается до температуры несколько ниже первоначальной. После этого пар направляется в последние ступени турбины. Промежуточный газовый пароперегреватель 2 устанавливают в газоходах котельного агрегата, обычно за основным пароперегревателем 1. Это приводит к повышению термического КПД и увеличению срока службы турбины.

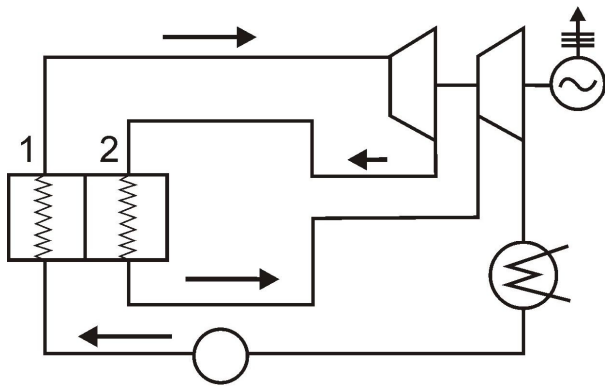


Рис.10.4 - Элементарная схема паросиловой установки с промежуточным перегревом

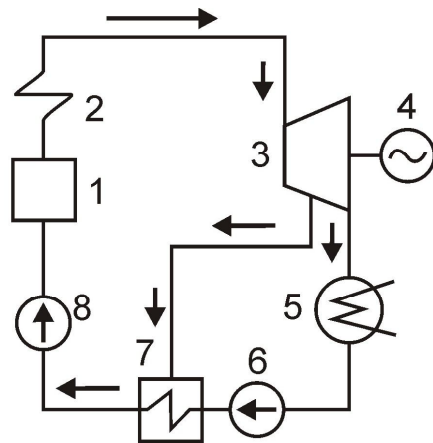


Рис.10.5 - Схема паросиловой установки с регенеративным подогревом питательной воды

Регенеративный подогрев питательной воды. В теплофизике слово регенерация означает возвращение части отходящего тепла для дальнейшего его использования в тепловой установке. Регенеративным подогревом питательной воды называют подогрев конденсата, поступающего из конденсатора в котёл. На рис.10.5 приведена элементарная схема паросиловой установки с регенеративным подогревом питательной воды. Для подогрева питательной воды (конденсата) на её пути установлен регенеративный подогреватель 7. В качестве теплоносителя отбирают часть пара и направляют его в подогреватель. Подогретый горячим паром конденсат подаётся в котёл питательным насосом 8. В зависимости от начальных параметров p_1 и t_1 температуру конденсата доводят до 145 – 245 °С. Такой подогрев питательной воды называют регенеративным, а цикл регенеративный. Экономичность регенеративного подогрева питательной воды оценивается величиной экономии топлива. КПД регенеративного цикла выше, чем КПД цикла Ренкина, и увеличивается с увеличением числа оборотов.

Контрольные вопросы по части II «Техническая термодинамика»

- 1 Определение идеального газа.
- 2 Рабочее тело и параметры его состояния.
- 3 Закон Бойля – Мариотта.
- 4 Закон Шарля.
- 5 Закон Гей – Люссака.
- 6 Уравнения состояния идеального газа. Удельная газовая постоянная. Физический смысл удельной газовой постоянной. Универсальная газовая постоянная.
- 7 Основные понятия газовой смеси. Свойства смеси.
- 8 Определение теплоёмкости. Средняя и истинная теплоёмкость.
- 9 Теплоёмкость газовой смеси.
- 10 Равновесное и неравновесное состояние системы. Обратимость процесса.
- 11 Внутренняя энергия системы. Работа и количество теплоты, рассматриваемые в термодинамике.
- 12 Определение первого начала (закона) термодинамики.
- 13 Теплоёмкость при постоянном давлении. Теплоёмкость при постоянном объёме.
- 14 Определение энтальпии.
- 15 Определение энтропии.

- 16 Термодинамические процессы изменения состояния идеального газа при постоянном удельном объёме.
- 17 Термодинамические процессы изменения состояния идеального газа при постоянном удельном давлении.
- 18 Термодинамические процессы изменения состояния идеального газа при постоянной температуре.
- 19 Адиабатный процесс.
- 20 Политропный процесс.
- 21 Круговой процесс. Полезная работа. Термический К.П.Д.
- 22 Цикл Карно. Термический К.П.Д.
- 23 Сущность второго начала термодинамики.
- 24 Процесс парообразования. Испарение. Кипение. Перегретый пар. Паросодержание насыщенного пара.
- 25 Циклы паросиловой установки. Цикл Ренкина.
- 26 Чем отличается цикл Карно от цикла Ренкина?

Часть III

Основы теплопередачи

Теплопередачей называют науку, изучающую закономерности процессов теплообмена между телами и распространения теплоты внутри тела. В теории теплопередачи рассматривается два основных вопроса:

1. Определение количества тепла, которое передаётся от одного тела к другому или переходит из одной части тела в другую при заданных условиях
2. Определение температуры в разных участках тела, участвующего в процессе теплообмена.

Необходимым и достаточным условием теплообмена является разность температур. Тепло передаётся тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Теплопроводность – процесс распространения тепловой энергии в твёрдом теле при непосредственном соприкосновении отдельных частиц тела, имеющих различные температуры.

Конвекция – процесс переноса энергии при перемещении жидкости или газа из области с одной температурой в область, имеющую другую температуру.

Излучение (лучистый теплообмен) – процесс передачи энергии электромагнитными волнами. Представляет собой двойное преобразование энергии: более нагретое тело излучает энергию в виде электромагнитных колебаний, другое менее нагретое тело поглощает энергию и нагревается.

Обычно теплообмен между телами совершается всеми тремя способами одновременно. Сочетание может быть разнообразным и один способ преобладать над другим.

Процессы теплообмена могут протекать как при установившемся (стационарном) режиме, так и при неуставившемся (нестационарном) режиме. При стационарном режиме температура в любой точке не зависит от времени. Стационарному режиму всегда предшествует нестационарный.

Глава 11 Теплопроводность

11.1 Основные понятия

Теплопроводность – вид теплообмена, при котором перенос тепловой энергии в неравномерно нагретой среде происходит в отсутствии макроскопического движения среды. В газах передача теплоты теплопроводностью осуществляется хаотически движущимися молекулами; в металлах – в основном электронами, в диэлектриках – вследствие колебаний атомов (или молекул), образующих кристаллическую решётку. Теплопроводность в основном осуществляется в твёрдых телах как внутри одного, так и между телами при их соприкосновении друг с другом. Теплопроводность может осуществляться также и через слой жидкости или газа. Однако жидкости и газы являются плохими проводниками тепла теплопроводностью.

Температурное поле. Процесс теплообмена теплопроводностью, так же как и другие виды теплообмена, осуществляется только при условии, что в различных точках тела температура неодинакова. Совокупность значений температуры во всех точках рассматриваемого пространства в данный момент времени называют температурным полем. Математически температурное поле выражается как

$$t = f(x, y, z). \quad (11.1)$$

Температурное поле может быть функцией трёх, двух и одной координаты.

$t = f(x, y, z)$ – трёхмерное температурное поле;

$t = f(x, y)$ - двухмерное температурное поле;

$t = f(x)$ - одномерное температурное поле.

Температурный градиент. Поверхность, во всех точках которой температура одинакова, называют изотермической.

Если пересечь ряд изотермических поверхностей плоскостью, то на ней будет получено семейство изотерм. Они так же, как и изотермические поверхности не пересекаются между собой, не обрываются внутри тела, а оканчиваются на поверхности тела или замыкаются внутри него. Температура тела изменяется лишь в направлениях, пересекающих изотермические поверхности (рис.11.1) При этом наибольшее изменение температуры на единицу длины получается в направлении нормали n к изотермической поверхности.

Предел отношения изменения температуры Δt к расстоянию между изотермами по нормали Δn называют градиентом температур (рис.11.1)

$$\lim(\Delta t / \Delta n)_{n \rightarrow 0} = dt/dn = \text{grad } t. \quad (11.2)$$

Градиент температуры – вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности. Его положительным направлением считается направление в сторону увеличения температуры. Единица измерения градиента – градус на метр ($^{\circ}\text{C}/\text{м}$).

Тепловым потоком (мощностью теплового потока) Φ называют количество тепла, проходящее в единицу времени через произвольную поверхность. Вектор теплового потока всегда направлен в сторону уменьшения температуры. Единица теплового потока – ватт (вт).

Плотность теплового потока характеризует интенсивность теплового потока и равна

$$q = \Phi / A. \quad (11.3)$$

Единица измерения плотности – ватт на квадратный метр ($\text{вт}/\text{м}^2$).

Так как тепло передаётся от более нагретого тела к менее нагретому, то вектор плотности теплового потока всегда направлен в сторону уменьшения температуры.

Зависимость плотности потока от градиента температур выражается через формулу

$$q = - \lambda dt/dn = - \lambda \text{ grad } t. \quad (11.4)$$

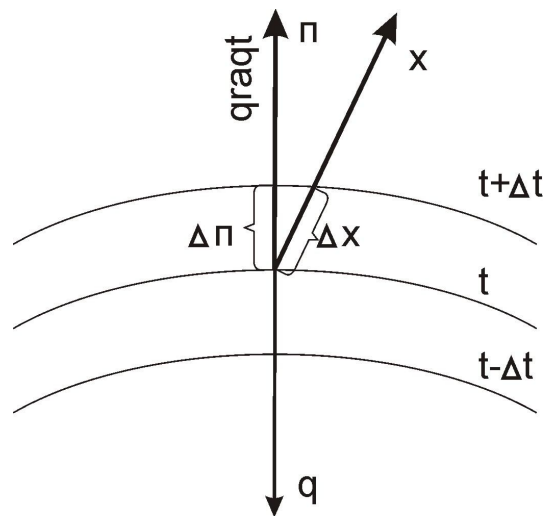


Рис.11.1 - Расположение изотерм и температурного градиента

Соотношение (11.4) выражает основной закон теплопроводности и называется законом Фурье. Знак минус в правой части соотношения, означает, что векторы теплового потока и градиента температур направлены в разные стороны.

Коэффициент λ называется коэффициентом теплопроводности и характеризует способность вещества проводить тепло. Единица измерения коэффициента теплопроводности – $\text{вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ или $\text{вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Теплопроводность равно плотности теплового потока через однослойную стенку при разности температур 1°C .

Значение теплопроводности для каждого тела находят экспериментально и сводят в таблицы, которыми пользуются при расчётах.

11.2 Теплопроводность стенки

Плоская однослойная стенка. На рис. 11.2 показана плоская однослойная стенка толщиной δ из однородного материала. Примем, что теплопроводность материала λ не зависит от температуры. На наружных поверхностях стенки поддерживаются постоянные температуры $t_1 > t_2$; температура изменяется только в направлении оси x , перпендикулярно плоскости стенки, т.е. температурное поле одномерно, а градиент температуры равен dt/dx .

Уравнение Фурье для этого слоя имеет вид

$$q = -\lambda dt/dx, \quad (11.5)$$

или
$$dt = -(q/\lambda)dx. \quad (11.6)$$

Величину теплового потока найдём, проинтегрировав уравнение (11.6)

$$\int_1^2 dt = -(q/\lambda) \int_1^2 dx. \quad (11.7)$$

Если в уравнение ввести $x_2 - x_1 = \delta$ - толщина стенки, получим

$$q = \lambda/\delta (t_1 - t_2) = (\lambda/\delta)\Delta t \quad (11.8)$$

или
$$q = (t_1 - t_2)/(\delta/\lambda).$$

Уравнение (11.8) является расчётной формулой теплопроводности плоской стенки. Оно связывает q , λ , δ , Δt .

Зная любые три величины, можно всегда найти четвёртую.

(δ/λ) – называется термическим сопротивлением стенки (R).

Определив по формуле (11.8) плотность теплового потока, можно определить общее количество тепла Q в джоулях, переданное через площадь поверхности плоской стенки за время τ :

$$Q = qA\tau = (\lambda/\delta)\Delta tA\tau, \quad (11.9)$$

где A - площадь поверхности.

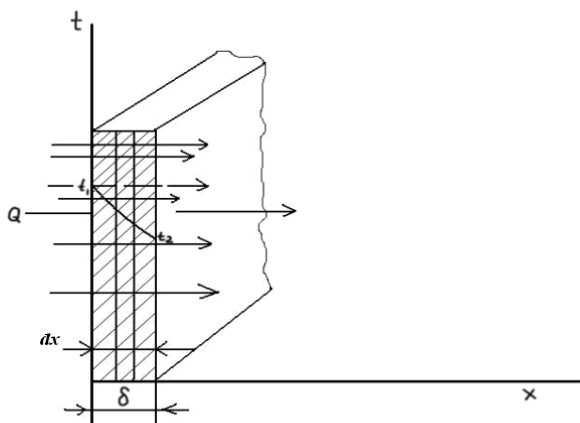


Рис.11.2 - Плоская однослойная стенка

Плоская многослойная стенка. В практике большое значение имеет процесс передачи тепла через плоскую стенку, состоящую из нескольких слоёв материала с различной теплопроводностью.

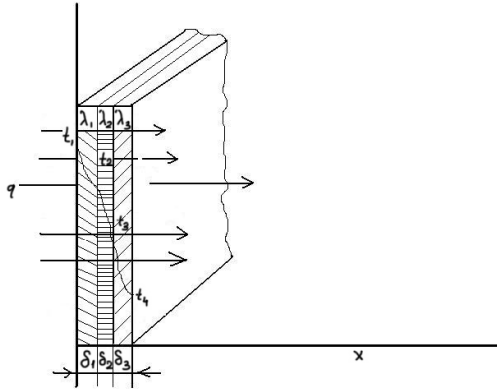


Рис11.3 - Плоская трёхслойная стенка

Рассмотрим передачу тепла теплопроводностью через плоскую трёхслойную стенку (рис.11.3.). Все слои такой стенки плотно прилегают друг к другу. Толщины слоёв обозначены $\delta_1, \delta_2, \delta_3$. А теплопроводность каждого материала $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ соответственно. Известны также температуры наружных поверхностей t_1 и t_4 . Температуры t_2 и t_3 неизвестны. Так как рассматривается стационарный режим, то плотность теплового потока q , проходящего через каждый слой стенки, по значению постоянна и для всех слоёв одинакова, но на своём пути она преодолевает местное термическое сопротивление (δ/λ) . Поэтому для каждого слоя имеем:

$$q = (t_1 - t_2) / (\delta_1 / \lambda_1); \quad q = (t_2 - t_3) / (\delta_2 / \lambda_2); \quad q = (t_3 - t_4) / (\delta_3 / \lambda_3).$$

Из этих равенств можно определить q

$$\begin{aligned} t_1 - t_2 &= q \delta_1 / \lambda_1; \\ t_2 - t_3 &= q \delta_2 / \lambda_2; \\ t_3 - t_4 &= q \delta_3 / \lambda_3. \end{aligned} \quad (11.10)$$

Складывая, левые и правые части равенства получим:

$$t_1 - t_4 = q(\delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \delta_3 / \lambda_3)$$

или

$$q = \frac{t_1 - t_4}{(\delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \delta_3 / \lambda_3)}, \quad (11.11)$$

Из уравнения (11.11) следует, что общее термическое сопротивление многослойной стенки равно

$$R = \delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \delta_3 / \lambda_3 \dots + \dots \delta_n / \lambda_n.$$

По формулам (11.10) и (11.11) можно определить значения неизвестных t_2 и t_3 ;

$$\begin{aligned} t_2 &= t_1 - q \delta_1 / \lambda_1; \\ t_3 &= t_2 - q \delta_2 / \lambda_2 = t_1 - q(\delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2) \text{ или} \\ t_3 &= t_4 + q \delta_3 / \lambda_3. \end{aligned} \quad (11.12)$$

Цилиндрическая стенка. Поверхности стенок тепловых машин и теплообменных аппаратов часто ограничены двумя концентрично расположенными цилиндрическими поверхностями (трубы, корпуса аппаратов, цилиндры двигателей и т. д.). Передача теплоты теплопроводностью в цилиндрической стенке происходит по тем же законам, что и в плоской. На рис.11.4 показан отрезок трубы длиной l . Внутренний и наружный диаметры трубы равны соответственно d_1 и d_2 . A_1 и A_2 – площади внешней и внутренней поверхности трубы, которым соответствуют температуры t_1 и t_2 соответственно. Тепловой поток Φ направлен изнутри наружу по нормали (по радиусам её сечений). Величина её остаётся постоянной для всех слоёв стенки.

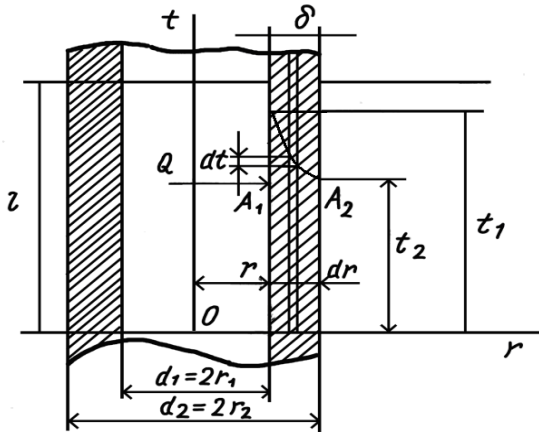


Рис.11.4 - Цилиндрическая однослойная стенка

Для того чтобы воспользоваться формулой Фурье, выведенной для плоской стенки, выделим внутри стенки элементарный цилиндрический слой радиусом r и толщиной dr . Внутреннюю и внешнюю площадь слоя будем считать одинаковыми.

Количество теплоты Q в джоулях для элементарного слоя определяем по формуле

$$Q = -\lambda A \tau dt/dr.$$

Примем: $l = 1$ м., площадь $A = 2\pi r l$, $\tau = 1$ с.

$$q' = -\lambda 2\pi r dt/dr, \tag{11.13}$$

откуда

$$dt = -[q'/(2\pi r)](dr/r). \tag{11.14}$$

Проинтегрировав равенство (11.14) и сделав ряд преобразований получим

$$q' = [\pi(t_1 - t_2)] / [(1/2 \lambda) \ln d_2/d_1], \tag{11.15}$$

$(1/2 \lambda) \ln d_2/d_1 = R$ – линейное термическое сопротивление.

Если толщина стенки цилиндрической трубы мала по сравнению с её радиусом, то для расчёта термического сопротивления можно считать стенку плоской и пользоваться соответствующими формулами.

Глава 12 Конвективный теплообмен

12.1 Основные понятия

Конвекцией называют процесс переноса тепла микрочастицами газа и жидкости. Поэтому конвекция возможна лишь в среде, частицы которой могут легко перемещаться.

Конвективным называют теплообмен, обусловленный совместным действием конвективного и молекулярного переноса тепла. Конвективный теплообмен между движущейся средой и поверхностью, которая отделяет её от другой среды (твёрдого тела жидкости или газа) называют теплоотдачей.

Главной задачей теории конвективной теплоотдачи является определение теплового потока Φ , который проходит через поверхность твёрдого тела, омываемого потоком. При практических расчётах пользуются законом Ньютона:

$$\Phi = \alpha A(t_{жс} - t_{см}), \quad (12.1)$$

где: $t_{жс}$ – температура среды;
 $t_{см}$ – температура поверхности стенки;
 A – площадь поверхности;
 Φ – тепловой поток.

Коэффициент пропорциональности α , учитывающий конкретные условия теплообмена между жидкостью и поверхностью тела, называют коэффициентом теплоотдачи.

При $A = 1 \text{ м}^2$, плотность теплового потока q равна:

$$q = \alpha (t_{жс} - t_{см}) \quad (12.2)$$

или
$$q = \frac{(t_{жс} - t_{см})}{1/\alpha}.$$

Величину $1/\alpha$ называют, термическим сопротивлением теплоотдачи. Решив уравнение 12.2 относительно коэффициента теплоотдачи, получим:

$$\alpha = q / (t_{жс} - t_{см}).$$

Из равенства видно, что α – плотность теплового потока q отнесённая к разности температур. Единица измерения α – Вт/(м² * °С) или Вт/(м² * К).

При $(t_{жс} - t_{см}) = 1^\circ\text{С}$, $\alpha = q$.

Коэффициент теплоотдачи зависит от многих факторов, основными из которых являются:

- 1 Причина возникновения течения жидкости;
 - 2 Физические свойства жидкости;
 - 3 Режим течения жидкости (ламинарный или турбулентный);
- Форма и размеры теплоотдающей поверхности.

По причине возникновения движения жидкости бывают свободными и вынужденными.

12.2 Свободное движение жидкости

Свободное тепловое движение возникает в неравномерно прогретой среде, точнее в жидкости, где имеются области с направленным вниз градиентом температур. В этом случае некоторые слои жидкости имеют более высокие температуры, чем слои, находящиеся над ними и поэтому вследствие теплового расширения возникает разность плотностей, что приводит к всплыванию более плотных элементов жидкости. Возникающее таким образом свободное движение называют естественной или тепловой конвекцией. Так, например, теплообмен между внутренним и внешним стёклами оконной рамы осуществляется естественной конвекцией.

12.3 Вынужденное движение.

Вынужденное движение жидкости обусловлено действием посторонних возбудителей (вентиляторов, насосов и т. п.). С их помощью можно создавать большие скорости движения среды или изменять их в широких пределах и тем самым регулировать интенсивность теплообмена. Движение может быть ламинарным или турбулентным. При ламинарном течении частицы жидкости движутся не перемешиваясь. Перенос тепла по нормали к направлению течения осуществляется теплопроводностью. Ввиду того, что теплопроводность жидкости весьма мала, интенсивность теплообмена при ламинарном течении невелика.

При турбулентном течении тепло внутри потока распространяется как теплопроводностью, так и перемешиванием почти всей массы жидкости, за исключением вязкого подслоя. Где молекулярный перенос тепла преобладает над турбулентным. Теплообмен при турбулентном течении отличается большей интенсивностью, чем при ламинарном течении.

Основными физическими свойствами теплоносителей являются теплопроводность λ , удельная теплоёмкость c , коэффициент температуропроводности $\alpha = \lambda/\rho c$ и коэффициент вязкости μ .

Формы и размеры теплоотдающей поверхности существенно влияют на теплоотдачу. Из любых простых форм тела (трубы, плиты и т.д.) можно составить большое количество теплоотдающих поверхностей. Каждая поверхность создаёт свои специфические условия движения теплоносителя и теплоотдачи.

Глава 13 Теплообмен излучением

13.1 Основные понятия

При любых температурах выше абсолютного нуля все тела обладают способностью непрерывно посылать в окружающее пространство электромагнитные волны различной длины. Электромагнитные волны представляют собой поток элементарных частиц, называемых фотонами, обладающих энергией, импульсом и нулевой массой покоя. Источниками фотонов являются атомы и молекулы излучающего тела. При излучении фотоны отрываются от атомов и молекул излучающего тела и движутся в пространстве со скоростью света (в вакууме). Попадая на другое тело, фотоны передают свой импульс и свою энергию атомам и молекулам этого тела, преобразуясь при этом в другую форму материи.

Электромагнитные волны принято классифицировать в зависимости от длины волны, а также от источников излучения.

Вид излучения	Длина волны, м
γ – излучения	$1 \cdot 10^{-15} - 1 \cdot 10^{-11}$
Рентгеновское	$1 \cdot 10^{-12} - 1 \cdot 10^{-9}$
Ультрафиолетовое	$20 \cdot 10^{-9} - 0,4 \cdot 10^{-6}$
Видимое (световое)	$0,4 \cdot 10^{-6} - 0,8 \cdot 10^{-6}$
Тепловое (инфракрасное)	$0,8 \cdot 10^{-6} - 0,8 \cdot 10^{-3}$
Радиоволны	$10^{-2} - 10^{-3}$

Изучение различных тел зависит от природы тела, его температуры и состояния поверхности. Большинство твёрдых и жидких тел излучают энергию всех длин волн в интервале от 0 до ∞ , т. е. эти тела имеют сплошной спектр излучения. Некоторые тела излучают энергию с прерывистым спектром, т. е. в определённых интервалах. К ним относятся нагретые газы и пары.

Излучение, определяемое только температурой и оптическими свойствами излучающего тела, называют тепловым излучением или радиацией.

Все тела обладает свойствами теплового излучения и каждое из них излучает энергию в окружающее пространство. Тепловые лучи, поглощённые другим телом, преобразуются в энергию хаотического теплового движения атомов и молекул и повышают температуру тела. Таким образом, теплообмен излучением осуществляется в результате двойного взаимного превращения энергии: тепловая – лучистая – тепловая. Интенсивность излучения повышается с повышением температуры излучающих тел.

Потоком излучения Φ называют излучение, проходящее в единицу времени через произвольную поверхность:

$$\Phi = Q/\tau. \quad (13.1)$$

Единица измерения потока – ватт (Вт).

Поверхностной плотностью q потока излучения называют отношение потока излучения к площади поверхности и измеряется в Вт/м²

$$q = \Phi/A.$$

Из всего потока излучения Φ , падающего на поверхность тела, часть Φ_A поглощается телом, часть Φ_R отражается от него, а часть Φ_D пропускается сквозь тело, т. е.

$$\Phi = \Phi_A + \Phi_R + \Phi_D.$$

Поделим обе части уравнения на Φ

$$\Phi_A/\Phi + \Phi_R/\Phi + \Phi_D/\Phi = 1. \quad (13.2)$$

Обозначим:

$\Phi_A/\Phi = A$ – поглощательная способность тела;

$\Phi_R/\Phi = R$ – отражательная способность тела;
 $\Phi_D/\Phi = D$ – пропускательная способность тела.
 Учитывая равенство (13.2) получим:

$$A + R + D = 1. \quad (13.3)$$

Равенство (13.3) называется уравнением теплового баланса.

Если $A = 1$ (при $R = D = 0$), то тело поглощает всё падающее на него излучение, ничего не поглощая и не пропуская. Такое тело называется абсолютно чёрным. Нефтяная сажа наиболее подходит к абсолютно чёрному телу – $A = 0,9 - 0,96$.

Если $R = 1$ (при $A = D = 0$), то тело отражает весь поток излучения. Если угол падения равен углу отражения, тело называют зеркальным. Если же излучение отражается во все направления, то поверхность тела называют абсолютно белым.

Если $D = 1$ (при $A = R = 0$), то тело пропускает всё падающее излучение и называется абсолютно прозрачным или диатермичным. Все одно и двухатомные газы можно считать диатермичными телами. В противоположность им трёхатомные и многоатомные газы поглощают и излучают тепловую энергию.

В реальных условиях абсолютно чёрных, белых и прозрачных тел не существует. Для всех реальных тел коэффициенты A, R, D всегда меньше единицы.

Реальные тела обладают лишь той или иной степенью черноты, белизны и прозрачности.

Тело, спектральная поглощательная способность которого не зависит от длины волны падающего излучения, называют серым.

Цвет тела определяется способностью поглощать и отражать свет с различными длинами волн.

13.2 Основные законы теплового излучения

Закон Кирхгофа. При термодинамическом равновесии отношение излучательной способности тела к его поглощательной способности не зависит от природы тела, а является одинаковой для всех тел функцией температуры и равно излучательной способности абсолютно чёрного тела при той же температуре.

$$\Phi_1/A_1 = \Phi_2/A_2 = \dots = \Phi_0/A_0 = f(T), \quad (13.4)$$

где Φ_0 и A_0 – излучательные и поглощательные способности абсолютно чёрного тела, а аналогичные величины Φ_1, A_1, Φ_2, A_2 соответственно относятся к первому, второму и т. д. телам.

Закон Стефана – Больцмана. Поток излучения абсолютно чёрного тела прямо пропорционален четвёртой степени его температуры.

$$\Phi_0 = \sigma_0 T^4,$$

где $\sigma_0 = 5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² К⁴) – константа излучения абсолютно чёрного тела.

Обычно это уравнение записывают так

$$\Phi_0 = C_0 (T/100)^4,$$

где $C_0 = 5,7$ Вт/(м² К⁴) – постоянная излучения абсолютно чёрного тела.

Закон Стефана – Больцмана применим также и для серых тел. У серых тел, так же как и у чёрных, излучательная способность пропорциональна абсолютной температуре в четвёртой степени:

$$\Phi = C (T/100)^4,$$

C – коэффициент излучения серого тела, Вт/(м² К⁴) – определяется природой, температурой, состоянием поверхности тела и всегда меньше C_0 .

Отношение коэффициента излучения серого тела к постоянной излучения абсолютно чёрного тела при той же температуре называется степенью черноты и обозначается ε :

$$\varepsilon = C/C_0,$$

Так как $C_0 > C$, то всегда степень черноты серого тела $\varepsilon < 1$.

13.3 Излучение газов и паров

Для различных газов излучательные и поглощательные способности различны. Так одно и двухатомные газы (водород, кислород, азот, гелий и др.) практически прозрачны для теплового излучения. Значительной излучательной и поглощательной способностью, имеющей практическое значение, обладают трёх и многоатомные газы (углекислый газ, водяной пар, аммиак и др.).

Если твёрдые тела поглощают и излучают энергию только поверхностью, то газы всем объёмом и только в определённых интервалах длин волн $\Delta\lambda$. Их спектр излучения и поглощения имеет избирательный характер. В большей части спектра газы являются прозрачными для теплового излучения. С увеличением температуры газа его излучательная и поглощательная способности повышаются. Особый интерес в теплофизике представляют собой водяной пар и CO_2 , поскольку они образуются при горении топлива.

14 Теплопередача и понятия о теплообменных аппаратах

14.1 Теплопередача

Теплообмен между горячей и холодной средой через разделительную твёрдую стенку является одним из наиболее важных и часто используемых в технике процессов. Например, получение пара заданных параметров в котлоагрегатах основано на процессе передачи теплоты от одного теплоносителя другому. Такой теплообмен называют теплопередачей.

Для примера рассмотрим однослойную стенку (рис.14.1), толщина которой равна δ . Теплопроводность материала стенки равна λ . Температуры сред, омывающих стенку слева и справа, известны и равны $t_{c1} > t_{c2}$. Требуется определить плотность теплового потока q , проходящего через стенку от греющей среды к нагреваемой. Пользуясь формулами (11.8) и (12.2).

$$\begin{aligned} q &= \alpha_1(t_1 - t_{cm1}); \\ q &= \lambda/\delta (t_{cm1} - t_{cm2}); \\ q &= \alpha_2(t_{cm2} - t_2). \end{aligned} \tag{14.1}$$

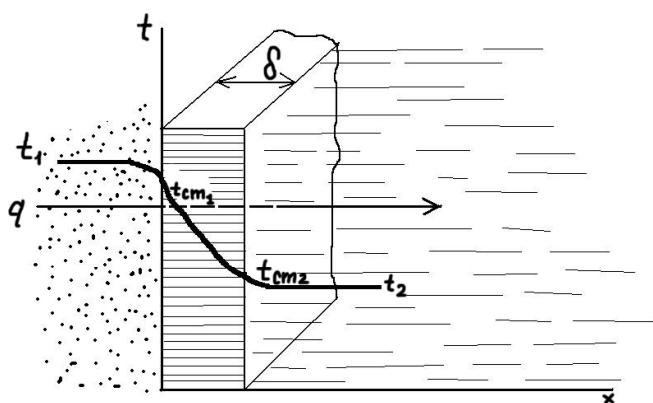


Рис.14.1 - Теплопередача через плоскую стенку от греющей среды к нагреваемой

Определим полный температурный напор $t_1 - t_2$. Для этого определим сначала местные температурные напоры:

$$\begin{aligned} (t_1 - t_{cm1}) &= q (1/\alpha_1); \\ (t_{cm1} - t_{cm2}) &= q(\delta/\lambda); \end{aligned}$$

$$(t_{cm2} - t_2) = q(1/\alpha_2).$$

Складывая равенства, получим:

$$t_1 - t_2 = q(1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2)$$

или

$$q = \frac{t_1 - t_2}{1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2} \quad (14.2)$$

$$\kappa = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2} \quad (14.3)$$

κ – коэффициент теплопередачи – Вт/(м² * °С).

$$q = \kappa (t_1 - t_2). \quad (14.4)$$

Величина обратная коэффициенту теплопередачи называется полным термическим сопротивлением теплопередаче:

$$1/\kappa = 1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2. \quad (14.5)$$

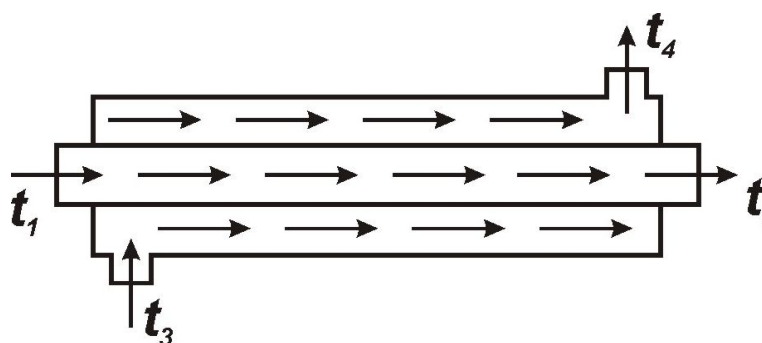
14.2 Понятия о теплообменных аппаратах

Теплообменным аппаратом называют устройство, предназначенное для нагревания и охлаждения теплоносителя. В качестве теплоносителя применяют жидкость или газ.

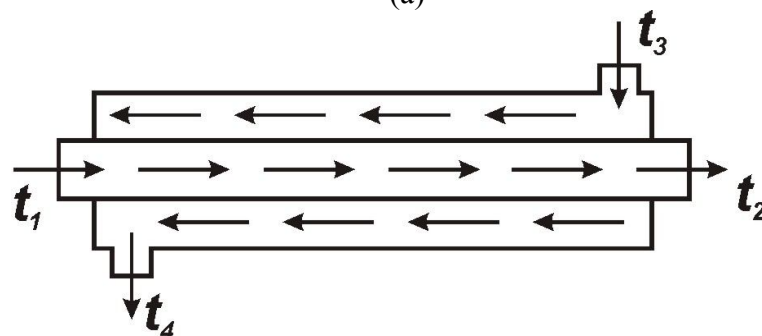
По принципу действия теплообменные аппараты делятся на рекуперативные, регенеративные, смесительные и с внутренним тепловыделением.

В рекуперативных теплообменных аппаратах теплота от греющего теплоносителя к нагреваемому передаётся через разделительную (обычно металлическую) стенку. К ним относятся: парогенераторы, пароперегреватели, водоподогреватели, воздухоподогреватели и различные выпарные аппараты. Рекуперативные теплообменные аппараты подразделяются на прямоточные, противоточные, перекрёстного тока и смешанного тока.

В прямоточном тепловом аппарате холодный и горячий теплоносители протекают в одном направлении и параллельно. В противоточном аппарате теплоносители протекают параллельно, но в противоположенных направлениях. В теплофизическом отношении противоточные аппараты выгоднее, чем прямоточные. Критерием для оценки их эффективности является средний температурный напор Δt_{cp} т.е. средняя разность температур греющей и нагреваемой жидкости. В противоточной схеме почти всегда Δt_{cp} больше, чем в прямоточной. Поэтому и поверхность теплообменника нагрева с противотоком, меньше, чем с прямотоком, следовательно, при прочих равных условиях теплообменник с противоточной схемой движения жидкостей компактней, и на его изготовление затрачено меньше материала.



(a)



(б)

а – прямоток, б - прямоток

Рис.14.2 - Теплообменные аппараты

В регенеративных теплообменных аппаратах одна и та же поверхность нагрева (или охлаждения) поочерёдно омывается то горячим, то холодным теплоносителем через определённые промежутки времени. По каналам регенератора пропускают горячий теплоноситель – продукты сгорания доменных и мартеновских печей, вагранок и т.д. Поверхность нагрева регенератора, отбирая теплоту от горячих газов, нагревается, а затем отдаёт это тепло холодному теплоносителю.

В смесительных теплообменниках теплообмен осуществляется при непосредственном соприкосновении и смешивании горячего и холодного теплоносителей. Смесительными теплообменными аппаратами являются градирни, скрубберы и другие устройства.

Аппараты с внутренним тепловыделением получили такое название потому, что внутри самого аппарата, протекает какой – либо технологический процесс с выделением теплоты. Для того чтобы охладить стенки аппарата, применяют теплоноситель (не два, как обычно, а один) забирающий теплоту от стенок и таким образом охлаждающий их. К таким аппаратам относятся ядерные реакторы, электронагреватели и др. устройства.

Влияние загрязнения стенки на передачу теплоты. Поверхности теплообменных аппаратов обычно загрязняются. Например, коэффициент теплопроводности внешних поверхностей труб котлов, загрязнённых золой и шлаком, очень мал и составляет 0,1 – 0,2 Вт/(м*К).

При нагревании воды и пара внутренние поверхности труб с течением времени также загрязняются солями, выпадающими в виде накипи. Накипь образует дополнительную стенку с большим термическим сопротивлением. Это ухудшает теплообмен и создаёт опасность пережога труб.

Контрольные вопросы по части III «Основы теплопередачи»

- 1 Виды теплообмена существующие в природе.
- 2 Теплопроводность. Основные понятия.

- 3 Конвективный теплообмен. Основные понятия.
- 4 Свободное и вынужденное движение жидкости.
- 5 Теплообмен излучением. Основные понятия.
- 6 Закон Кирхгофа.
- 7 Закон Стефана – Больцмана.
- 8 Теплопередача в теплообменных аппаратах.

Часть IV Инструкции

1 Инструкция

по оказанию доврачебной помощи при несчастных случаях

1 Каждый работник должен знать и уметь оказывать первую доврачебную помощь при несчастном случае.

2 При ушибе следует обеспечить покой ушибленной части тела, к ушибленному месту приложить холод (лёд, холодную воду, смоченную холодной водой ткань).

При подозрении на ушибы внутренних органов до прибытия скорой помощи, необходимо освободить пострадавшего от стесняющей его одежды и положить на ровное место.

3 При растяжении тканей (мышц) необходимо также приложить холод и наложить мягкую фиксирующую повязку.

4 При вывихе суставов необходимо обеспечить полную неподвижность в суставе.

Вправлять вывихнутый сустав самостоятельно запрещается.

5 При любом повреждении кожи и тканей следует смазать йодом кожу вокруг раны, закрыть рану стерильным материалом (бинтом, салфеткой) и наложить повязку.

Промывать рану и извлекать из неё инородные тела самостоятельно запрещается.

6 При переломе конечностей необходимо обеспечить неподвижность кости путём наложения шины из специальных или подручных материалов (доски, планки, фанеры, палки), длина которой должна быть такой, чтобы она заходила за те два участка сустава конечности, между которыми произошёл перелом.

При подозрении на перелом позвоночника пострадавшего следует уложить животом вниз на жёсткие носилки или щит из досок (дверь, крышку от стола, толстый фанерный лист). Вопрос о его транспортировке решает только медицинский работник.

При открытом переломе на повреждённое место следует дополнительно наложить стерильную повязку. **Извлекать и трогать костные обломки запрещается.**

7 При термическом ожоге без пузырей (ожог первой степени), обожженное место промывают струёй чистой воды, обрабатывают поражённый участок слабым (розового цвета) раствором марганцовокислого калия (при возможности спиртом или одеколоном), накладывают сухую стерильную повязку.

При ожогах 2-ой и 3-ей степени (наличие пузырей, обугливание тканей) обожженный участок следует закрыть стерильным материалом, а в случае обширного ожога – накрыть простынёй и одеялом.

Оказывая доврачебную помощь при ожогах, следует помнить, что к обожженной части нельзя прикасаться руками или грязными предметами, прокалывать и снимать пузыри? отрывать прилипшие к обожженному месту части одежды, смазывать обожженную поверхность жирами и присыпать её порошками. Обрабатывать обожженный участок разрешается соответствующими противоожоговыми аэрозолями и антисептиком, если таковой имеется.

8 При обморожении пострадавшего следует поместить в тёплое помещение. Дать горячий чай или воду, обмыть поражённое место тёплой водой с мылом (при возможности спиртом или одеколоном).

В случае более сильного обморожения (с появлением пузырей) на поражённый участок следует наложить сухую согревающую повязку.

9 При отравлении газами пострадавшего следует вывести (вынести) на свежий воздух или в другое помещение, открыв там форточки, окна, двери, дать понюхать нашатырный спирт.

В случае остановки дыхания или потери сознания необходимо немедленно приступить к искусственному дыханию способом «рот-рот» или «рот-нос», которое надо делать до прибытия скорой помощи или до восстановления естественного дыхания. После

восстановления дыхания пострадавшего следует растереть и накрыть одеялом, пальто и т.п.

10 При отравлении антифризом или другими промышленными ядом необходимо промыть желудок путём принятия 2-3 стаканов воды с последующим вызовом рвоты искусственным путём.

11 При отравлении кислотами желудок следует промыть подщелочённой (1 чайная ложка пищевой соды на стакан воды) или простой холодной водой путём принятия 2-3 стаканов жидкости с последующим вызовом искусственной рвоты. При отравлении щелочами желудок промывают подкисленной водой (1 г. лимонной кислоты на полстакана воды или 1 столовая ложка 3-х процентного уксуса на стакан воды).

12 При отравлении свинцом или его соединениями необходимо немедленно произвести промывание желудка (0,5-1,0% раствором глауберовой соли).

13 При поражении электрическим током необходимо немедленно отсоединить пострадавшего от электросети: выключить рубильник, отбросить электропровод сухой палкой или каким-либо другим непроводником, в случае необходимости перерезать или перерубить провод топором с сухой деревянной ручкой или другим изолированным инструментом.

Запрещается пользоваться в таких случаях мокрыми и неизолированными металлическими предметами. При этом в случае, необходимости, следует принять меры страховки пострадавшего от падения (при нахождении его на высоте).

Категорически запрещается зарывать пострадавшего в землю, поскольку это не только бесполезно, но и вредно.

Если при отключении пострадавшего от электросети обнаружена остановка сердца, необходимо сразу же начинать искусственное дыхание способом «рот-рот» или «рот-нос».

Если пострадавший находится в бессознательном состоянии, но у него устойчивое дыхание и пульс, его следует уложить на спину, расстегнуть одежду, создать приток свежего воздуха, дать понюхать нашатырный спирт, обрызгать лицо холодной водой.

Поражённые электрическим током места на теле (чаще на руках и ногах) следует закрыть сухой (марлевой) повязкой.

В любом случае один из очевидцев должен немедленно вызвать медицинского работника (скорую помощь) или помочь доставить пострадавшего в лечебное учреждение.

2 Инструкция

О мерах пожарной безопасности при проведении работ в помещениях

1 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ

1.1 Условия допуска.

1.1.1 Запрещается допускать к работе лиц:

- Не знающих требований Пожарно-технического минимума;
- Не знакомых с действующими в учреждении противопожарными правилами и инструкциями, вытекающими из особенностей технологического процесса производства, а также не обученных способам использования имеющихся средств пожаротушения;
- Не ознакомленных с планом ликвидации аварий (а также с планом эвакуации людей и материальных ценностей) и не знающих его части, относящейся к месту работы.

1.1.2 Работы на установках, связанных с применением взрывоопасных и пожароопасных веществ и материалов, разрешаются только после принятия их в эксплуатацию комиссией, назначенной приказом по учреждению, предприятию.

1.1.3 Неисправности в электросетях и установках должны устраняться квалифицированными специалистами службы главного инженера.

1.2 Сотрудники должны знать и выполнять правила внутреннего распорядка.

1.2.1 В каждом помещении структурного подразделения должны быть назначены ответственные за санитарное состояние и пожарную безопасность рабочего места или помещения с документированием этого факта в журнале регистрации.

1.3 Характеристика опасных и вредных производственных факторов .

К причинам и факторам, способствующим возникновению пожара можно отнести:

- Неосторожное обращение с огнём;
- Неисправности электрооборудования и электропроводки;
- Захламлённость помещений горючими материалами;
- Нарушение правил работы с горючими веществами;
- Нарушение правил эксплуатации оборудования
- Нарушение правил хранения горючих веществ, материалов и предметов;

1.4 Положенные по нормам для данных работ средства первичного пожаротушения.

1.4.1 В непосредственной близости от рабочего места с повышенной пожароопасностью должны находиться: порошковый огнетушитель, покрывало из асбеста или стеклоткани (без лака) размером 1,0 x 1,5 м., ящик с песком.

1.5 Требования по обеспечению пожаро - и взрывобезопасности.

1.5.1 Классификация работ по взрыво- и пожаробезопасности осуществляется на основе критериев взятых по примеру работы с ЛФЖ.. Чтобы подпасть под категорию работ «В» (только пожароопасных), при работе с порошками и ЛФЖ, достаточно обеспечить предельно допустимое количество опасного вещества, находящееся в обращении в помещении (см. «Инструкцию по ОТ при исследовании и производстве смесей...» п. 1.1.3. и «Инструкцию по работе с ЛФЖ» п. 1.5.1.2. В случае категории «В» класс производственных помещений (но не вентиляции) по «Правилам устройства электроустановок» (ПЭУ) не нормируется. Помещение для вытяжного вентиляционного оборудования классифицируется как П-11 или П-11а.

1.5.2 Рабочие поверхности столов, стеллажей, вытяжных шкафов, предназначенные для работы с пожаровзрывоопасными жидкостями и веществами, должны иметь негорючее покрытие. Для работы с кислотами, щелочами и другими активными веществам, столы и шкафы должны быть выполнены из материалов стойких к их воздействию, с устройством бортиков из негорючего материала (для предотвращения пролива жидкости за пределы

шкафа, стола). Для упреждающего ограничения площади зеркала разлива (испарения) рекомендуется использовать кюветы, поддоны.

1.5.3 В цехе и других помещениях допускается хранение легко воспламеняющихся порошков (ЛВП), ЛВЖ и ГЖ в количествах, не превышающих сменную потребность, в ящике или шкафу из негорючего материала. На внутренней стороне крышки ящика (шкафа) делают чёткую надпись с указанием наименований и общей допустимой нормы хранения ЛВП, ЛВЖ и ГЖ для данного помещения.

1.5.4 Мебель и оборудование должны устанавливаться так, чтобы они не препятствовали эвакуации людей. Ширина минимально допустимых проходов между оборудованием должна быть не менее 1 метра.

1.5.5 Стеклянную посуду с ЛФЖ разрешается переносить только в защищающих от удара и разлива приспособлениях.

1.5.6 Баллоны со сжатым газом (азот, аргон, гелий, двуокись углерода) должны быть надёжно закреплены в допустимом месте.

1.6 При обнаружении неисправности средств пожаротушения сообщить об этом руководителю структурного подразделения и инспектору ПБ.

1.7 Сотрудники должны быть готовыми оказывать первую помощь (доврачебную) пострадавшему: при ожоге, - поражении электрическим током - отравлении через воздушную среду. Неоказание помощи и неготовность её оказывать – является наказуемыми действиями.

1.8 Все работы, связанные с возможностью выделения токсичных или пожаро-взрывоопасных паров и газов, в значимых количествах, должны проводиться в вытяжных шкафах, которые надлежит поддерживать в исправном состоянии. Пользоваться вытяжным шкафом с разбитыми стёклами или неисправной вентиляцией запрещается.

1.9 Ответственность.

1.9.1 Ответственность за противопожарное состояние и соблюдение противопожарного режима, наличие и исправное состояние первичных средств пожаротушения и знание подчинёнными правил пожарной безопасности возлагается на руководителя структурного подразделения и ведущего технолога .

1.9.2 Ответственный исполнитель должен принять необходимые меры по обеспечению пожарной безопасности при проведении исследований. Он и ответственные за помещения отвечают за сохранность первичных средств пожаротушения.

1.9.3 Руководители лабораторий являются ответственными за пожарную безопасность работ, проводимых от лабораторий или работниками лабораторий.

2 ОБЯЗАННОСТИ СОТРУДНИКОВ ПЕРЕД НАЧАЛОМ РАБОТЫ

2.1 Проверить исправность первичных средств пожаротушения.

2.2 Мерами, предупреждающими, возникновение пожаров при эксплуатации электронагревательных приборов являются:

- Применение терморегуляторов, отключающих прибор при нагреве выше допустимой нормы;
- Установка приборов на теплоизоляционных основаниях и на соответствующем расстоянии от сгораемых материалов.
- Постоянный надзор за включенными приборами;
- Регулярная проверка исправности соединительных проводов;
- Периодический осмотр самих приборов, устранение неисправностей;
- Заземление металлических корпусов приборов;
- Назначение лица, ответственного за безопасную эксплуатацию электронагревательных приборов. Вопрос применения в производственных

помещениях бытовых электронагревательных приборов должен в каждом отдельном случае рассматриваться руководителем структурного подразделения.

3 ОБЯЗАННОСТИ СОТРУДНИКОВ ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ

3.1 В помещении запрещается:

- Проводить работы в вытяжном шкафу, если в нём находятся вещества, материалы и оборудование, не относящиеся к выполняемым операциям, а также при его неисправности и отключенной системе вентиляции;
- Мыть полы или чистить одежду легковоспламеняющимися жидкостями;
- Курить, разбрасывать обтирочный материал, загромождать столы, шкафы и т.п.;
- Оставлять без присмотра включенные тепловые агрегаты, аппараты, приборы и т.п.;
- Держать ЛФЖ вблизи газовых горелок или других нагревательных приборов;
- Выливать ЛФЖ и горючие жидкости в раковины, выбрасывать самовоспламеняющиеся вещества (магний, калий, натрий, фосфор);
- Применять электроплитки с открытой спиралью накаливания;
- Производить кипячение или нагревание ЛФЖ непосредственно огнём;
- Хранить горючие жидкости сверх установленной нормы, устраивать кладовые в коридорах и коммуникационных нишах.

3.2 В аварийных ситуациях действовать согласно имеющимся инструкциям для данных работ.

3.2.1 При возникновении небольших очагов загорания, которые можно ликвидировать собственными силами, необходимо без промедления воспользоваться имеющимися на месте средствами пожаротушения.

Горящий порошок нужно тушить песком и (или) накрыв место горения асбестовым покрывалом или кошмой, или порошковым огнетушителем. Не рекомендуется пользоваться водой или пенным огнетушителем.

При возгорании ЛФЖ ограничения на применение средств пожаротушения обуславливаются тем, что применение воды в виде сплошной струи для тушения локальных загораний несмешивающихся с водой ЛФЖ плотностью менее 1 г/см^3 (т.е. легче воды) не выполнимо эффективно или даже противопоказано из-за возможности расширения площади горения. Предпочтительнее будет ограничение доступа кислорода и/или применение воды – в виде распылённых и тонко распылённых струй или пены.

4 ПОРЯДОК СОВМЕСТНЫХ ДЕЙСТВИЙ СОТРУДНИКОВ АДМИНИСТРАЦИИ И ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПОЖАРНОЙ ОХРАНЫ ПРИ ПОЖАРЕ

4.1 Каждый сотрудник предприятия при возникновении пожара должен немедленно:

- Обесточить работающие тепловые агрегаты, установки и отключить вентиляцию;
- Позвонить в пожарную охрану по телефону **01** и сообщить точный адрес очага возгорания (наименование учреждения, корпус, этаж, номер комнаты), что горит, существует ли опасность для людей, назвать свою фамилию;
- Сообщить о возгорании руководителю предприятия или учреждения;
- Организовать эвакуацию людей в соответствии с планом эвакуации;

- Приступить к тушению пожара имеющимися средствами пожаротушения и с помощью УПА;

4.2 Руководитель подразделения или другое должностное лицо, прибывшее к месту пожара, обязан:

- Проверить вызвана ли пожарная охрана;
- Поставить в известность о пожаре руководство учреждения или предприятия;
- Проверить отключение электроэнергии, вентиляции и обеспечить при этом остановку установок, агрегатов. Привести в действие системы дымоудаления и осуществить мероприятия, способствующие предотвращению распространения пожара.
- Осуществлять руководство тушением пожара до прибытия пожарной команды;
- Выделить для встречи подразделений пожарных сотрудника, хорошо знающего расположение подъездных путей и водоисточников;
- Приступить к эвакуации сотрудников, не занятых тушением пожара;
- При необходимости вызвать газоспасательную, медицинскую и др. службы.

4.3 По прибытии пожарных подразделений, руководивший тушением пожара обязан сообщить начальнику подразделений пожарной охраны все необходимые сведения об очаге пожара, мерах, принятых по его распоряжению.

5 ОБЯЗАННОСТИ СОТРУДНИКОВ ПО ОКОНЧАНИИ РАБОТЫ ПЕРЕД ЗАКРЫТИЕМ ПОМЕЩЕНИЙ

5.1 Убрать рабочее место. Промасленные обтирочные материалы должны собираться в закрывающиеся металлические ящики, которые по окончании работы должны освобождаться.

5.2 По окончании работы (перед закрытием помещения) ответственный за противопожарное состояние должен проверить:

- Закрыты ли газовые и водяные краны;
- Потушены ли лампы, горелки, выключены ли тепловые агрегаты, электродвигатели, электроплитки, приборы освещения (электрооборудование);
- Произведена ли уборка помещений, убран ли мусор и бумага из корзин, удалены ли из ящиков протирочные материалы;
- Убраны ли в склад ЛВЖ и ГЖ, а также пожаро - и взрывоопасные материалы и реактивы;
- Исправны ли первичные средства пожаротушения

3 Инструкция по охране труда при эксплуатации электрошкафов сушильных лабораторных типа СНОЛ, СНВС

1 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

1.1 Настоящая инструкция по технике безопасности труда (ТБ) разработана в качестве руководства при эксплуатации электрошкафа сушильного лабораторного типа СНОЛ, СНВС.

1.2 Шкаф предназначен для просушки различных материалов в воздушной среде в стационарных условиях при температуре от 50 °С до 350 °С, в том числе порошков никеля, титана и хрома.

1.3 К эксплуатации электрошкафа допускается персонал не моложе 18 лет, прошедший медицинский осмотр, знающий правила эксплуатации электроустановок напряжением до 1000В, обученный правилам техники безопасности при работе с электрошкафом и ознакомленный с конструкцией, устройством, монтажом и правилами эксплуатации, сдавшие экзамен по ТБ, прошедшие инструктаж на рабочем месте и назначенные распоряжением по учреждению или предприятию.

1.4 Инструктаж по ТБ проводится ежеквартально. Периодический медицинский осмотр сотрудников использующих в работе электрошкаф, проводится ежегодно.

1.5 Шкаф необходимо эксплуатировать в соответствии с требованиями «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителем» и «Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителем».

1.6 Электрошкаф должен быть установлен в помещении с вытяжной вентиляцией. При работе с веществами, насыщенными примесями вредных для обслуживающего персонала паров и газов, электрошкаф необходимо установить под вытяжным зонтом.

1.7 Для подключения электрошкафа необходимо использовать розетку по ГОСТ 7396-76, имеющую заземляющий контакт.

1.8 При эксплуатации электрошкафа могут возникнуть следующие виды опасности;

- возможность получения термических ожогов (нагретые материалы и нагретая камера);
- поражение электрическим током (оголенные участки электропроводов, отсутствие и неисправность заземления),
- пожароопасность.

1.9 При эксплуатации электрошкафа необходимо пользоваться спецодеждой и защитными средствами.

- халат х/б ГОСТ 12.4.132-83

- перчатки х/б, ГОСТ 5007-87;

1.10 Во избежание пожара горючие вещества и жидкости располагать не ближе 4 м. от электрошкафа. На рабочем месте должно находиться два огнетушителя ОП-5 ТУ 78-407-77 и ОУ-6 ТУ 22-4720-80, асбестовое покрывало (размером 2,0 х 2,5 м), ящик с песком. Тушение металлических порошков разрешается только песком или асбестовым покрывалом.

1.11 Обо всех неисправностях необходимо сообщить руководителю работ и сделать соответствующую запись в рабочем журнале. Приступать к работе только после устранения неисправностей и с разрешения руководителя.

1.12 В случае электротермических травм принять меры по оказанию первой доврачебной помощи пострадавшим, вызвать врача и сообщить администрации, сохранив до расследования обстановку на рабочем месте и состояние оборудования такими, какими они были в момент происшествия, если это не угрожает жизни и здоровью окружающих.

1.13 За невыполнение требований данной инструкции сотрудники несут ответственность в соответствии с действующим законодательством.

11.14 Ответственность за создание безопасных условий труда и надзор за выполнением данной инструкции несёт лицо административно-технического персонала, в чьём подчинении находится работающий.

2 ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРЕД НАЧАЛОМ РАБОТЫ

2.1 Проверить исправность электрошкафа следующим образом:

- закрыть дверь шкафа;
- установить регулятор температуры на нужное давление;
- нажать клавишу включения, при этом должна загореться сигнальная лампочка.

2.2 Проверить внешним осмотром наличие и исправность заземления.

2.3 Проверить наличие хорошего освещения на рабочем месте.

2.4 Эксплуатировать электрошкаф в невзрывоопасной окружающей среде с температурой от +5 до +40°C и относительной влажностью окружающего воздуха – не более 80% при +25 °С.

2.5 Включить вентиляцию.

3 ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ

3.1 Загрузку и выгрузку порошков, материалов, изделий производить при отключенном шкафе, используя х/б перчатки во избежание ожогов.

3.2 Электрошкаф не должен подвергаться резким толчкам и ударам.

3.3 Используемые индивидуальные средства защиты, а также огнетушители должны быть исправны и находится в доступном месте.

3.4 Не эксплуатировать электрошкаф при возникновении любой неисправности, до полного её устранения.

4 ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПО ОКОНЧАНИИ РАБОТЫ.

4.1 Отключить электрошкаф от сети (погаснет лампочка световой индикации).

4.2 Привести в порядок рабочее место.

4.3 Снять спецодежду и повесить в специально отведённое для этого место.

4.4 Выключить вентиляцию не ранее, чем через 10 минут после окончания работы.

4.5 Сообщить руководителю работ о всех замеченных недостатках и отклонениях в работе оборудования.

4.6 После уборки рабочего места, сдать его мастеру или сменщику.

5 ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ.

5.1 В случае аварийной ситуации (неисправность электрошкафа) и ситуаций, которые могут привести к авариям и несчастным случаям (взрыв, возгорания, отравления) следует отключить электрошкаф и приступить к оказанию первой доврачебной помощи пострадавшим, если таковые имеются; поставить администрацию в известность. В необходимых случаях вызвать «скорую помощь».

5.2 В случае поражения работающего электрическим током освободить пострадавшего от действия тока, полностью обесточив шкаф, вызвать врача и приступить к оказанию первой доврачебной помощи. Меры первой помощи зависят от состояния пострадавшего, которое определяется путём проведения следующих мероприятий:

- вынести пострадавшего из опасной зоны;
- положить на твёрдую поверхность, слегка запрокинув голову назад;
- проверить наличие дыхания, пульса;
- проверить состояние зрачка.

5.3 Если пострадавший находится без сознания, но дышит и пульс прощупывается, то его необходимо привести в чувства, поднеся к носу ватку с нашатырным спиртом.

5.4 При отсутствии у пострадавшего признаков жизни делать искусственное дыхание и массаж сердца до прибытия «скорой помощи»

- 5.5 При отравлении – обеспечить немедленное выведение яда из организма.
- 5.6 При удушье – делать искусственное дыхание и восстановление эффективного дыхания.
- 5.7 При электрических и термических ожогах кожи следует продезинфицировать место вокруг ожога, наложить стерильную повязку и обратиться к врачу.
- 5.8 При возникновении пожара:
- немедленно выключить вентиляцию и электроприборы;
 - применить наиболее эффективное средство тушения для данного случая;
 - принять меры индивидуальной защиты – (фильтрующий противогаз) и покинуть рабочее место. В случае если пожар не удалось ликвидировать собственными силами, вызвать бригаду пожарных по телефону 01.
- 5.9 При несчастном случае во время пожара оказать пострадавшему первую медицинскую помощь, вызвать «скорую помощь», сообщить о случившемся администрации
- Ответственность за нарушение данной инструкции несёт работник работающий на данной оборудовании.

4 Инструкция по охране труда при работе на индукционной плавильной вакуумной установке УИПВ -63 – 10-0,005

1 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

1.1 Настоящая инструкция по технике безопасности труда разработана в качестве руководства при работе на индукционной плавильной вакуумной установке УИПВ-63-10-0,005. Установка предназначена для плавки и разливки в вакууме или среде инертных газов технического титана и титановых сплавов.

1.2 К работе на печи допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие медицинский осмотр, изучившие настоящую инструкцию, сдавшие экзамен по ТБ и имеющие квалификационную группу по электробезопасности II до 1000 В, прошедшие вводный инструктаж на рабочем месте и назначенные приказом по учреждению предприятию.

1.3 Инструктаж по ТБ проводится ежеквартально.

1.4 Периодический медицинский осмотр сотрудников работающих на печах проводится ежегодно.

1.5 К работе на печи допускаются лица, имеющие допуск к эксплуатации сосудов под давлением.

1.6 Перед началом работы обслуживающий персонал должен изучить устройство и принцип действия установки по прилагаемой эксплуатационной документации и местной технологической инструкции на установку.

1.7 Установка является электротехнической установкой напряжением до 1000В.

1.8 Конструкция установки соответствует требованиям:

- ГОСТ 12.3.002-75 „ССБТ. Процессы производственные. Общие требования безопасности” в части разделов 1; 2; 5;
- ГОСТ 12.3.003-91 „ССБТ. Процессы производственные. Общие требования безопасности” в части разделов 1; 2;
- ГОСТ 12.1.004-93 „ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования “ в части разделов 3.1; 3.2;
- ГОСТ 12.2.007.9-93 “Безопасность электронагревательного оборудования. Часть 1. Общие требования”.
- ГОСТ Р 50014.3-92 “Безопасность электротермического оборудования. Часть 3. Частные требования к электротермическим устройствам индукционного и прямого нагрева сопротивлением и индукционным плавильным печам”.
- ГОСТ 12.2.046.0-2004 “Оборудование технологическое для литейного производства. Требования безопасности”.

1.9 Место проведения работ должно быть закрыто для посторонних лиц и вывешено предупредительными табличками **«Внимание! Испытания под давлением»**.

1.10 Заземлить все металлические каркасы оборудования согласно РЭ.

1.11 При эксплуатации печи возникают следующие виды опасности:

- опасность поражения электрическим током;
- опасность получения термических ожогов;

1.12 Работающим на печи положено иметь спецодежду – халат, а также защитные средства: перчатки х/б ГОСТ 5007-87, головной убор, ботинки или сапоги, резиновый коврик на полу печи.

1.13 Требования по обеспечению пожаробезопасности.

Во избежание пожара горючие вещества и жидкости располагать не ближе 4 метров от печи. Рядом должен находиться пенный огнетушитель.

1.14 Обо всех неисправностях на печи необходимо делать записи в соответствующем журнале. В случае электротермических травм необходимо принять меры по оказанию первой медицинской помощи пострадавшим, вызвать врача и сообщить администрации.

1.15 За нарушение данной инструкции сотрудники несут дисциплинарную, административную и уголовную ответственность.

2 ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРЕД НАЧАЛОМ РАБОТЫ

2.1 Произвести наружный осмотр печи:

- Проверка внешнего вида и комплектности установки;
- Проверка сварных швов всех составных частей каждой единицы оборудования;
- Проверка вакуумных уплотнений;
- Проверка состояния и прочности изоляции токоподводов, электрических проводов и кабелей;
- Проверка герметичности системы охлаждения на отсутствие просачивания воды при открытых вентилях системы.

2.2 Проверка качества и надёжности соединений.

- Проверка качества электромонтажа и надёжности контактных соединений производится с помощью специализированных электроинструментов и приборов;
- Проверка качества болтовых соединений и крепления хомутов в местах присоединения резиновых рукавов производится с помощью специализированного слесарного инструмента;
- Проверка качества монтажа соединений гидроаппаратуры и вакуумного оборудования производится с помощью специализированного инструмента и приборов.

2.3 Проверка сопротивлений изоляции электрических цепей:

- Измерение сопротивления изоляции проводится мегомметром 2,5Кв в соответствии с требованиями «Правил устройства электроустановок» (ПЭУ), утверждённых Росэнергонадзором.

2.4 Гидравлические испытания оборудования установки.

Гидравлическому испытанию подвергаются:

- Индуктор;
- Шкаф электровакуумной аппаратуры (ШЭВА);
- Шинопроводы ШЭВА-ТПЧР;
- Станция охлаждения СО-40П;
- Камера вакуумная;
- Трубопроводы.

2.5 Провести гидравлическое испытание оборудования. Для этого необходимо:

- Проверить герметичность системы при давлении воды 0,5 МПа в течение 1 часа.
- При гидравлических испытаниях ШЭВА, СО-40П необходимо проверить герметичность системы при давлении воды 0,5 МПа, проверить работу датчиков протока и температуры. Проверку произвести в течение 1 часа.
- Тоководы охлаждаемые, и шинопроводы испытать на герметичность при давлении воды 0,5 МПа в течение 1 часа.
- Плавильную камеру (кожух и крышку) водоохлаждаемую испытать на герметичность при давлении воды 0,5 МПа. Для проведения испытаний на

герметичность вакуумной камеры необходимо установить технологические заглушки.

- Станцию охлаждения СО-40П испытать на герметичность согласно «Программы и методике испытаний 34 4264.525.00.000ПМ».

2.6 Проверка работы электрооборудования.

Проверку производить в соответствии «Руководства по эксплуатации 384191.118.00.000РЭ» (раздел 1 п. 1.8.5) «Электрооборудование. Описание электрической схемы и порядок взаимодействия элементов».

2.7 Проверка электрических блокировок.

Перечень электрических блокировок для обеспечения безопасной работы, в соответствии «Руководства по эксплуатации 384191.118.00.000РЭ» п.1.8.5.6 «Блокировки». Проверку действия блокировок произвести посредством поочередного их нарушения.

2.8 Испытание механизмов и устройств установки.

Испытанию подвергаются следующие механизмы и устройства установки:

- Вакуумная камера;
- Шкаф электровакуумной аппаратуры (ШЭВА);
- Преобразователь частоты ТПЧР-63-10;
- Станция охлаждения СЦ-40П;

Технические характеристики механизмов и устройств установки проверяются согласно техническим требованиям рабочей документации, паспортов и руководств по эксплуатации на вышеперечисленные механизмы и устройства установки.

2.9 Испытание вакуумной камеры.

Испытаниям подвергаются следующие механизмы и устройства:

- Механизм подъёма;
- Ввод коаксиальный с индуктором и приводом вращения;
- Дозатор;
- Гляделка поворотная;
- Механизм ввода термопары;
- Установка жёлоба;
- Стол поворотный;
- узел поворота шторки.

Работоспособность механизма подъёма проверить поднятием, поворотом и опусканием крышки камеры. Подъём, поворот на 180 град., и опускание крышки должен быть плавным, без рывков и заеданий. Прилегание фланца крышки к фланцу кожуха камеры должно быть равномерным по всей поверхности прилегания.

Для проверки производить 10-15 циклов.

Работоспособность коаксиального ввода с индуктором и приводом вращения проверить поворотом рычага, установленным на входном валу редуктора. Вращение должно быть плавным, без рывков и заеданий. Для проверки произвести 10-15 циклов.

Работоспособность дозатора проверить, предварительно загрузив его шихтой, и последовательно вращая рукоятки загрузочных чашек, произвести дозагрузку индуктора. Вращение рукоятки должно быть плавным, без рывков и заеданий. Для проверки произвести 10-15 циклов.

Герметичность вакуумных уплотнений дозатора и соединения его с крышкой камеры проверить при достижении вакуума 6Па в камере с помощью вакуумного насоса 2НВР-60Д.

Работоспособность гляделки поворотной проверить вращением диска с кварцевыми стёклами с помощью ручки. Вращение диска должно быть плавным, без рывков и заеданий

Работоспособность механизма ввода термопары проверить вращением маховика, при этом термопара в защитном чехле должна опускаться в центральную часть тигля индуктора.

Механизм ввода термопары должен вращаться плавно, без рывков и заеданий. Для проверки произвести 10-15 циклов.

Работоспособность установки жёлоба проверить вращением маховика. В рабочем положении шихта из дозатора должна транспортироваться в тигель индуктора. При необходимости отрегулировать положение жёлоба. Для проверки произвести 10-15 циклов.

Работоспособность поворотного стола проверить вращением рукоятки на 90 град. Стол поворотный, с установленным на нём изложницей, должен вращаться без рывков и заеданий. Для проверки произвести 10-15 циклов.

Работоспособность узла поворота шторки проверить вращением рукоятки на 90 град., при этом шторка должна перекрывать поверхность окна смотрового для измерения температуры расплава пирометром. Поворот шторки должен быть плавным и без рывков и заеданий. Для проверки произвести 10-15 циклов.

Герметичность вакуумных соединений вышеперечисленных механизмов и устройств с крышкой и кожухом камеры проверить при достижении вакуума в камере 6 Па с помощью вакуумного насоса 2НВР-60Д

2.10 Провести испытание шкафа электровакуумной аппаратуры (ШЭВА).

Испытание проводится совместно со всеми единицами оборудования установки. Испытание заключается в безопасной работоспособности следующего оборудования:

- вакуумного насоса 2НВР-60Д;
- вакуумных клапанов (КВЭ-63, КВМ-25, КВР-25);
- вакуумметра 13В ТЗ-003;
- вакуумметра ВМБ-14;
- мановакуумметров МВПЗ-У;
- манометра избыточного давления МПЗ-У;
- конденсаторов ЭЭВП-0,5-10;
- коллектора сливного;
- патрубков сливных;
- коллекторов напорных;
- приборов контроля температуры расплава;
- электрооборудования.

Работоспособность вышеперечисленных элементов ШЭВА проверяется при работе установки в процессе плавки металла.

2.11 Проверить надёжность заземления печи.

2.12 Проверить подачу воды во все водоохлаждаемые полости печи.

2.13 Проверить исправность и надёжность всех защитных средств (кожухов, щитков).

Проверить, закрыта ли дверца электрошкафа: работать только при закрытой дверце.

2.16. Сделать запись в журнале о степени готовности печи к работе.

2.17 Подать напряжение на электропечь.

3 ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ

3.1 Работать на печи только в том случае, если все системы печи: водоохлаждение, система блокировок, система сигнализации, а также все приборы контроля давления в печи работают безотказно.

3.2 В случае возникновения любых, даже незначительных неполадок необходимо немедленно остановить работу, и не возобновлять до полного устранения неполадок.

3.3 Загрузку шихты и выгрузку изложницы с металлом производить только при отключённой печи.

3.4 Во время работы печи, за процессом обработки образца следить только с использованием средств защиты.

3.5 Конструктивное исполнение оборудования требует эффективного охлаждения водой силовых элементов. Охлаждение осуществляется дистиллированной и технической водой. Наиболее ответственные элементы охлаждаются дистиллированной водой (преобразователь частоты ТПЧР-63-10, конденсаторы ШЭВА, шинопроводы ТПЧР-ШЭВА).

Станция охлаждения СО-40П охлаждается технической водой.

3.6 Перед проведением плавки необходимо:

- залить вакуумное масло марки ВМ-1С в насосы 2НВР-60Д и НД-250 в количествах указанных в технических характеристиках насосов;
- установить изложницу на стол вакуумной камеры;
- загрузить шихту в тигель индуктора вакуумной камеры и закрыть крышку;
- прижать крышку камеры с помощью прижимов;
- включить подачу охлаждающей технической воды;
- Включить станцию охлаждения СО-40П;
- Открыть все вентили на коллекторах и патрубках ШЭВА;
- Проверить слив охлаждающей технической воды в сливную воронку;
- Проверить наличие протока по всем цепям;
- Подать электропитание на установку;
- Включить систему управления ШЭВА
- Закрыть ручные вентили подачи атмосферного воздуха и инертного газа в вакуумную камеру;
- Произвести запуск вакуумного насоса 2НВР-60Д;
- Произвести предварительную откачку (откачку насоса «сам на себя») до давления 10 Па (контроль вакуумметром 13 В ТЗ-003);
- Открыть клапан КВЭ-63. Расположенный на насосе НД-250 и откачать систему до давления 36 Па (контроль вакуумметром 13 В ТЗ-003);
- Включить электронагреватели насоса НД -250;
- Открыть клапан КВМ-25 и откачать систему до давления - 0,8 атм. (контроль мановакуумметром типа МВПЗ-У);
- Открыть клапан КВЭ-63 и откачать вакуумную камеру до давления -6,65 Па;
- Включить преобразователь ТПЧР-63-10, согласно руководству по эксплуатации;
- Для ведения плавки включить «Нагрев» преобразователя ТПЧР-63-10,
- При достижении остаточного давления в плавильной камере 6,65 Па, остаточного давления в насосе НД-250 36Па и температуры рабочей жидкости в насосе НД-250 (225-270°С), открыть вакуумный затвор 23ВЭ-250 и откачать вакуумную камеру до остаточного давления $1,33 \times 10^{-1}$ Па (контроль вакуумметром ВМБ-14);
- После достижения необходимого остаточного давления $1,33 \times 10^{-1}$ Па произвести настройку преобразователя ТПЧР-63-10 на контур печи и ШЭВА, согласно руководству по эксплуатации;
- Произвести плавку металла. Контроль температуры расплава производится пирометром «Луч-С», который калибруется по показаниям термопары.
- Дозагрузку тигля производить с помощью дозатора.

4 ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПО ОКОНЧАНИИ РАБОТЫ.

4.1 После проведения плавки необходимо:

- Снизить мощность нагрева до минимума;
- Слить металл в изложницу;
- Отключить нагрев преобразователя ТПЧР-63-10;
- Закрывать вакуумный затвор 23ВЭ-250 и отключить электропитание насоса НД-250;
- Закрывать клапаны КВЭ-63 и КВМ-25, расположенные в ШЭВА;
- Отключить насос 2НВР-60Д и напустить в него атмосферный воздух;
- Охлаждающую воду отключить после остывания насоса НД-250 до температуры не выше 50°C;
- Запустить в вакуумную камеру атмосферный воздух;
- Открыть крышку камеры и снять изложницу с расплавленным металлом со стола;

4.2 Плавку шихты можно вести в двух режимах:

- Плавка в вакууме (согласно программы и методики испытаний 38 4191 118 00. 000 ПМ);
- Плавка в среде инертных газов (согласно программы и методики испытаний 38 4191 118 00. 000 ПМ).

4.3 После окончания плавки необходимо:

- Отключить станцию охлаждения;
- Отключить электропитание установки;
- Открыть ручные клапана КВР-25 напуска атмосферного воздуха в вакуумную камеру и в вакуумный насос 2НВР-60Д;
- Закрывать ручной вентиль подачи охлаждающей воды на установку.

4.4 В случае длительного перерыва между плавками рекомендуется после окончания плавки и выгрузки изложницы с металлом из вакуумной камеры, провести откачку вакуумной камеры насосом 2НВР-60Д и оставить её пол разряжением, закрыв все ручные и электрические клапана;

4.5 Отключить вводной автомат питания печи.

5 ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ.

5.1 В случае аварийной ситуации необходимо отключить подачу напряжения к печи и все ремонтные работы проводить при отключённом напряжении.

5.2 При аварийной остановке немедленно сообщить об этом руководителю подразделения или энергетика. О пожаре сообщить по телефону 01.

5.3 Соблюдение правил безопасности является необходимым условием предупреждения травм. При несчастных случаях прекратить работу, оказать помощь пострадавшему, поставить в известность администрацию. В необходимых случаях вызвать «скорую помощь» по телефону 03.

5.4 В случае поражения электрическим током немедленно освободить пострадавшего от действия электрического тока, полностью обесточить установку, приступить к оказанию первой медицинской помощи и вызвать врача. Меры первой помощи зависят от состояния пострадавшего, которое определяется путём проведения следующих мероприятий:

- положить пострадавшего на твёрдую поверхность, слегка запрокинув голову назад;
- проверить наличие дыхания, пульса;
- проверить состояние зрачков глаз.

5.5 Если пострадавший находится без сознания, но дышит и пульс прощупывается, то его необходимо привести в чувство.

5.6 При отсутствии у пострадавшего признаков жизни делать искусственное дыхание и массаж сердца до прибытия «скорой помощи».

5.7 При термических ожогах кожи следует продезинфицировать вокруг ожога, наложить повязку и обратиться к врачу.

5 Инструкция по охране труда при эксплуатации камерной печи ПКН 6125 «НАКАЛ»

1 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

1.1 Данная инструкция по технике безопасности труда (ТБ) разработана в качестве руководства при работе на камерной печи ПКН 6125 «НАКАЛ». Печь предназначена для термообработки различных материалов, допускается режим закалки.

1.2 К работе на печи допускаются лица, прошедшие медицинский осмотр, изучившие настоящую инструкцию, сдавшие экзамен по ТБ и имеющие удостоверение на право эксплуатации электрооборудования 2-ой квалификационной группы для работ на установках с напряжением до 1000В, прошедшие инструктаж на рабочем месте.

1.3 Во время работы на печи могут возникнуть следующие виды опасности:

- возможность поражения электрическим током;
- возможность термических ожогов;

1.4 Спецодежда, защитные средства и приспособления:

- спецодежда: халат;
- защитные средства: рукавицы хлопчатобумажные;

1.5 Требования по обеспечению пожаробезопасности.

Во избежание пожара горючие вещества и жидкости располагать не ближе 4 метров. Рядом должен находиться огнетушитель.

1.6 В случае обнаружения, каких – либо неисправностей сообщить об этом руководителю структурного подразделения. Приступить к работе только после устранения неисправностей и с разрешения руководителя.

1.7 В случае электротермических травм нужно принять меры по оказанию первой медицинской помощи пострадавшим: вызвать врача и сообщить администрации.

1.8 За нарушение данной инструкции сотрудники несут дисциплинарную, административную и уголовную ответственность.

2 ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРЕД НАЧАЛОМ РАБОТЫ.

2.1 Произвести наружный осмотр печи.

2.2 Проверить надёжность заземления печи.

2.3 Убедиться в исправности подъёмного механизма дверца.

2.4 Проверить исправность и пригодность защитных средств.

2.5 С помощью кнопок задать температуру нагрева. На дисплее высветится заданная температура.

2.6 Убедиться, что дверце закрыто, подать напряжение путем включения автоматического выключателя СЕТЬ, при этом должна загореться сигнальная лампа.

3. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ

3.1 Запрещается работать на электропечи при открытой двери или пульта.

3.2 Загрузку и выгрузку изделий производить при отключённой печи.

3.3 Загрузку и выгрузку изделий, замену нагревателей, а также ремонт и осмотр рабочей камеры производить только после охлаждения печи до 40 °С. В режиме закалки допускается выгрузка изделий при температуре 1000 °С с использованием защитных средств.

3.4 Во время работы печи за процессом обработки образца следить только с использованием средств защиты.

3.5 Запрещается работать на печи при возникновении любой неисправности до её устранения.

4 ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

4.1 В случае аварийной ситуации необходимо отключить подачу напряжения и все ремонтные работы проводить при отключенном напряжении.

4.2 При обнаружении пожара или признаков горения немедленно сообщить об этом руководителю подразделения и в пожарную охрану.

4.3 Соблюдение правил безопасности является необходимым условием предупреждения производственных травм. При несчастных случаях прекратить работу, оказать помощь пострадавшему, поставить администрацию в известность. В необходимых случаях вызвать «Скорую помощь».

4.4 В случае поражения работающих на печи электрическим током немедленно освободить пострадавшего от действия тока, полностью обесточить установку, приступить к оказанию первой помощи и вызвать врача. Меры первой медицинской помощи зависят от состояния пострадавшего, которое определяется путём проведения следующих мероприятий:

- Положить пострадавшего на твёрдую поверхность, слегка запрокинув голову назад;
- Проверить наличие дыхания, пульса;
- Проверить состояние зрачков глаз.

4.5 Если пострадавший находится в обмороке, но дышит и пульс прощупывается, то его необходимо привести в сознание.

4.6 При отсутствии у пострадавшего признаков жизни делать искусственное дыхание и массаж сердца до прибытия «Скорой помощи».

4.7 При термических ожогах кожу следует продезинфицировать место вокруг ожога, наложить повязку и обратиться к врачу.

5 ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПО ОКОНЧАНИИ РАБОТЫ

5.1 По окончании работы выключить автоматический выключатель СЕТЬ.

5.2 Отключить питание печи.

5.3 Дождаться остывания печи, после чего извлечь образец.

6 ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ЗА НАРУШЕНИЕ ИНСТРУКЦИИ

6.1 Обслуживающий персонал должен хорошо знать и строго выполнять все требования изложенные в данной инструкции.

6.2 Нарушение инструкции по технике безопасности влечёт за собой :

- Отстранение от работы.
- Повторную проверку знаний по технике безопасности.
- Дисциплинарную, административную, уголовную ответственность.

Литература

1. Основная литература

1.1 Фокин В.М, Бойков Г.П, Видин Ю.В. Основы технической теплофизики, 2008 г.

1.2 Кирилин В.А. Техническая термодинамика. Издательский дом МЭИ, 2008. 496 с.

1.3 Смирнов М.В. Теоретические основы теплотехники. Изд. Ин-Фомо, 2010.

2. Дополнительная литература

2.1 Трофимова Т.И. Курс общей физики, Учебное пособие для вузов, 18-е изд, М – Академия, 2010 -557(3)с. Наличие в библиотеке ТУСУРА – 18 экз.

2.2 Л. Д. Гинзбург, М. З. Зарипов, 2-е изд., Энергоатомиздат, 1990-223(1)с. Справочное пособие по технике безопасности.

2.3 Правила пожарной безопасности для энергетических предприятий. 2009.144 с. ISBN 5-93630-710-2

2.4 ГЭСНп-2001-07. Теплоэнергетическое оборудование. 2009.

Приложение 1

Средние теплоёмкости для воздуха и газов (кДж/(м³ град));

t, °C	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O	Сухого воздуха	CO	H ₂	H ₂ S	CH ₄	C ₂ H ₄	
0	1,6204	1,3327	1,3076	1,4914	1,3009	1,3021	1,2777	1,5156	1,5558	1,7669	
100	1,7200	1,3013	1,3193	1,5019	1,3051	1,3021	1,2896	1,5407	1,6539	2,1060	
200	1,8079	1,3030	1,3369	1,5174	1,3097	1,3105	1,2979	1,5742	1,7669	2,3280	
300	1,8808	1,3080	1,3583	1,5379	1,3181	1,3231	1,3021	1,6070	1,8925	2,5289	
400	1,9436	1,3172	1,3796	1,5592	1,3302	1,3315	1,3021	1,6454	2,0223	2,7215	
500	2,0453	1,3294	1,4005	1,5831	1,3440	1,3440	1,3063	1,6832	2,1437	2,8932	
600	2,0592	1,3419	1,4152	1,6078	1,3583	1,3607	1,3105	1,7208	2,2693	3,0481	
700	2,1077	1,3553	1,4370	1,6338	1,3725	1,3733	1,3147	1,7585	2,3824	3,1905	
800	2,1517	1,3683	1,4529	1,6601	1,3821	1,3901	1,3189	1,7962	2,4954	3,3412	
900	2,1915	1,3817	1,4663	1,6885	1,3993	1,4026	1,3230	1,8297	2,5959	3,4500	
1000	2,2266	1,3938	1,4801	1,7133	1,4118	1,4152	1,3273	1,8632	2,6964	3,5673	
1100	2,2593	1,4056	1,4935	1,7397	1,4236	1,4278	1,3356	1,8925	2,7843		
1200	2,2886	1,4065	1,5065	1,7657	1,4347	1,4403	1,3440	1,9218	2,8723		
1300	2,3158	1,4290	1,5123	1,7908	1,4453	1,4487	1,3524	1,9469			
1400	2,3405	1,4374	1,5220	1,8151	1,4550	1,4613	1,3608	1,9721			
1500	2,3636	1,4470	1,5312	1,8389	1,4642	1,4696	1,3691	1,9972			
1600	2,3849	1,4554	1,5400	1,8619	1,4730	1,4780	1,3775				
1700	2,4042	1,4625	1,5483	1,8841	1,4809	1,4864	1,3859				
1800	2,4246	1,4705	1,5559	1,9055	1,4889	1,4947	1,3942				
1900	2,4393	1,4780	1,5638	1,9252	1,5960	1,4890	1,3983				
2000	2,4552	1,4851	1,5714	1,9449	1,5031	1,5073	1,4067				
2100	2,4699	1,4914	1,5743	1,9633	1,5094	1,5115	1,4151				
2200	2,4837	1,4981	1,5851	1,9813	1,5174	1,5198	1,4235				
2300	2,4971	1,5031	1,5923	1,9984	1,5220	1,5241	1,4318				
2400	2,5097	1,5085	1,5990	2,0148	1,5274	1,5284	1,4360				
2500	2,5214	1,5144	1,6057	2,0307	1,5341	1,5366	1,4445				

