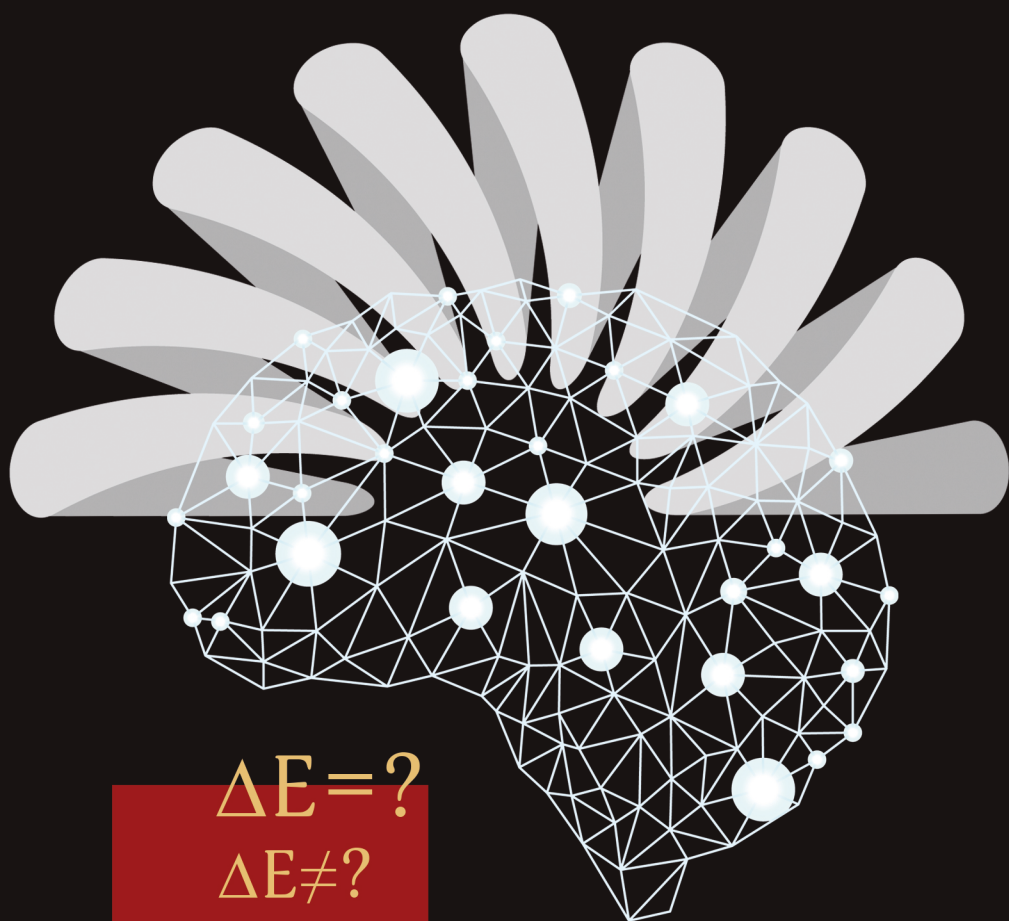


РОДИОНОВ Н. Г.

ГЕНЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ – ЭТО ПРОСТО?!



Родионов Н.Г.

ГЕНЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ – ЭТО ПРОСТО ?!

**СУПЕР Издательство
Санкт-Петербург
2020**

ББК 31.373+31.363 Ц 163

УДК 621.438+621.311.22.002.5

Р60

Родионов Н.Г.

Р60 Генерация энергии — это просто?! Учебное и научно-популярное издание. — Санкт-Петербург: СУПЕР Издательство, 2020. — 418 с.

ISBN 978-5-9965-0534-0

В 2019 г. ограниченным тиражом 250 экз. вышла книга автора «Генерация энергии – это просто!», Калуга, Изд. «Золотая аллея», - с. 400, ISBN 978-5-7111-0527-5.

Печатная книга является малодоступной. Поэтому по предложению «СУПЕР Издательства», г. Санкт-Петербург, автором принято решение для популяризации и доступности читателям материалов книги, выполнить её в электронном виде. Кроме того, книга издаётся в бумажном виде, по индивидуальным заказам в «СУПЕР Издательстве». По сравнению с выпущенным печатным изданием от 2019 г., в данную версию книги внесены незначительные корректировки, исправлены замеченные опечатки, ошибки и т.п.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся многогранной областью генерирования тепловой, механической, электрической энергии, а также экологическими аспектами развития современной цивилизации. Особый интерес книга представляет для студентов энергетических специальностей и неэнергетических учебных заведений, школьников, для специалистов, занятых в разнообразных сферах деятельности.

В содержании книги описаны принципы действия энергетических установок, а также наиболее ответственные их узлы и элементы. Рассмотрены паротурбинные, газотурбинные, комбинированные энергетические установки, дизельные и бензиновые двигательные установки, авиационные двигатели, ракетные реактивные двигатели, атомные энергоустановки, холодильные машины, тепловые насосы, оборудование криогенных технологий. Они применяются в энергетике, авиации, космической технике, на наземном транспорте, на флоте, в быту, в различных отраслях промышленности.

В научно-популярной форме приведена принципиально значимая информация по теплотехнике и генерации энергии во всех известных в настоящее время тепловых двигателях, атомных энергетических установках, холодильных установках.

Особое внимание уделено важнейшей тенденции в современном развитии энергетики - альтернативной энергетике - геотермальным, солнечным, ветровым, гидростанциям, биотопливным станциям, топливным элементам, а также актуальным проблемам развития "зелёной энергетики".

Рассмотрены существующие в настоящее время проблемы кризиса в отношении человеческой цивилизации и окружающей среды, глобального загрязнения природы, достижения компромисса энергетики и экологии.

ISBN 978-5-9965-0534-0

© Н.Г. Родионов, текст, оформление 2020
© СУПЕР Издательство, дизайн обложки

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	4
ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	9
ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА	12
ГЛАВА 1 БЕЗ НАУКИ ТРУДНО ПОНЯТЬ ПРИНЦИПЫ ГЕНЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ 16	
1.1 Роль науки и энергетики в развитии цивилизации	16
1.2 Немного о законах, заложенных в основы генерации энергии.	17
1.3 Основные термодинамические процессы.	23
1.4 Реальные рабочие тела для тепловых и холодильных машин	24
1.5 Циклы тепловых машин и холодильных установок.	30
1.6 Органическое и ядерное топливо для энергетических установок.	34
1.7 Краткие сведения о теплопередаче.	36
1.7.1 А что такое теплопередача?	36
1.7.2 Расскажем немного о процессах теплопроводности.	38
1.7.3 Разберёмся с основными положениями теории о конвекции теплоты.	39
1.7.4 Тепловое излучение, как оно происходит, как его оценить?	42
1.8 Горение органического топлива.	44
1.8.1 Общие сведения о химических реакциях горения органического топлива.	44
1.8.2 Цепные реакции горения органического топлива.	46
1.8.3 Воспламенение горючей смеси и распространение пламени.	47
1.9 Принципы получения энергии из ядерного топлива.	50
1.9.1 История развития представлений об ядерных реакциях деления.	50
1.9.2 Цепная реакция деления ядер урана.	54
1.9.3 Очень кратко об ядерной энергии синтеза лёгких элементов.	57
1.10 Невозобновляемые и возобновляемые источники энергии.	58
ГЛАВА 2 ПАРОВЫЕ КОТЛЫ	62
2.1 Зачем нужны и как устроены котлы?	62
2.1.1 Простейшие принципиальные схемы для понимания работы котлов.	62
2.1.2 Поговорим о более сложных котлах.	66
2.1.3 На судах котлы komponуются иначе.	70
2.1.4 Утилизационные котлы.	73
2.1.5 Основные сведения о котельных установках.	74
2.2 Топки для сжигания углеводородных видов топлива.	76
2.2.1 Топки для сжигания твёрдого топлива.	77

2.2.2	Топки для сжигания жидкого топлива.....	79
2.2.3	Топки для сжигания газового топлива.....	80
2.3	Пароводяной коллектор и трубные поверхности нагрева в котлах.....	81
2.3.1	Испарительные поверхности нагрева в котле.....	81
2.3.2	Пароводяные коллекторы.....	83
2.3.3	Пароперегреватели.....	84
2.3.4	Экономайзеры.....	85
2.3.5	Воздухоподогреватели.....	85
2.4	Тепловой баланс котельного агрегата.....	86
ГЛАВА 3 КАК ИСПОЛЬЗУЮТ ПАР ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ?		89
3.1	Принципы работы и устройства паровых турбин.....	89
3.1.1	Немного об истории появления паровых турбин.....	89
3.1.2	Первичное понятие о термодинамическом цикле паротурбинной установки.....	93
3.1.3	Классификация паровых турбин.....	94
3.1.4	Общие сведения об основных узлах и элементах паровых турбин.....	95
3.2	Паровые турбины активного и реактивного типа.....	105
3.2.1	Процесс преобразования энергии в турбинной ступени.....	105
3.2.2	Профильные и концевые потери энергии в турбинных решётках профилей.....	109
3.2.3	Реактивность, геометрия профилей и характеристики ступеней.....	110
3.2.4	Процессы расширения пара в многоступенчатой турбине.....	113
3.3	Турбины для выработки электроэнергии, теплоты, для привода.....	115
3.3.1	Паровые турбины и потребители их энергии.....	115
3.3.2	Паровые турбины для малой энергетики.....	119
3.4	Типовые конструкции паровых турбин и их элементов.....	120
3.4.1	Одноцилиндровые турбины.....	120
3.4.2	Многоцилиндровые турбины.....	121
3.4.3	Опорные и упорные подшипники паровых турбин.....	124
3.4.4	Лабиринтные уплотнения.....	128
3.4.5	Основные понятия о регулировании паровых турбин.....	130
3.5	Конденсаторы для паровых турбин, зачем они нужны?.....	134
3.6	От чего зависит экономичность работы ПТУ на ТЭС?.....	136
ГЛАВА 4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ НА ТЭС И НА СУДАХ.....		139
4.1	Что входит в состав тепловой электростанции?.....	139
4.2	Кратко о технологических цехах на тепловых электростанциях.....	144
4.3	Системы технического водоснабжения на ТЭС.....	149
4.4	Кратко о машинно-котельных отделениях на судах.....	153
4.5	Без нагнетательного оборудования обойтись невозможно!.....	156

4.5.1	Насосное оборудование.	156
4.5.2	Области применения и регулирование насосов.	165
4.5.3	Сходство насосов с энергетической группой нагнетательных газовых машин.	167
ГЛАВА 5 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О РАБОТЕ АТОМНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК.		170
5.1	Топливо для ядерного реактора.	170
5.2	Принципиальная схема и принцип действия ядерных реакторов.	173
5.3	Как получают пар с использованием ядерного реактора?	179
5.4	Основные сведения об атомных электростанциях.	183
5.4.1	Технологическая схема АЭС.	183
5.4.2	Основные помещения главного корпуса АЭС.	185
5.4.3	Краткие сведения по обеспечению безопасности АЭС.	186
5.5	Ядерная энергетика для надводного и подводного флота.	188
5.5.1	Ядерные энергетические установки для атомных подводных лодок.	188
5.5.2	Ядерные энергетические установки для надводных судов.	191
ГЛАВА 6 МНОГООБРАЗИЕ ГАЗОТУРБИННОЙ ТЕХНИКИ.		193
6.1	В ГТУ всё устроено просто, на первый взгляд.	193
6.2	Зачем нужны газогенератор и силовая турбина в ГТУ?	197
6.3	Тяжёлые условия работы основных узлов и деталей ГТУ.	199
6.3.1	Принципиальная конструктивная схема ГТУ.	199
6.3.2	Немного полезных сведений о компрессорах в составе ГТУ.	200
6.3.3	Краткая информация о камерах сгорания в составе ГТУ.	200
6.3.4	Самые тяжёлые условия работы у турбины.	203
6.3.5	Кратко о воздушном охлаждении лопаточных аппаратов газовой турбины.	204
6.4	ГТУ для привода турбогенераторов, турбокомпрессоров.	206
6.4.1	ГТУ для привода турбогенераторов.	206
6.4.2	ГТУ для привода турбокомпрессоров при перекачке газа.	209
6.5	Особенности ГТД для транспортной и военной авиации.	210
6.6	ГТУ служат на флоте.	216
ГЛАВА 7 ПОРШНЕВЫЕ ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ.		223
7.1	Рабочие процессы в карбюраторных и дизельных ДВС.	223
7.1.1	История развития поршневых ДВС.	223
7.1.2	Рабочие процессы в бензиновых (карбюраторных) четырёхтактных ДВС.	226
7.1.3	Рабочие процессы в бензиновых (карбюраторных) двухтактных ДВС.	230
7.1.4	Рабочие процессы в дизельных четырёхтактных ДВС.	231
7.1.5	Рабочие процессы в дизельных двухтактных ДВС.	234
7.1.6	Рабочие процессы в газовых ДВС.	235

7.1.7	Краткая информация о судовых дизелях.	237
7.1.8	Кратко о двигателях с внешним подводом теплоты.	239
7.2	Типовые поршневые ДВС и обслуживающие системы.	242
7.2.1	Общее описание бензиновых ДВС и шатунно-поршневой группы.	242
7.2.2	Коленчатый вал в поршневых ДВС.	247
7.2.3	Топливная система бензинового ДВС.	248
7.2.4	Система зажигания бензинового ДВС.	249
7.2.5	Система смазки бензинового ДВС.	251
7.2.6	Система охлаждения бензиновых ДВС.	253
7.2.7	Некоторые особенности обслуживающих систем дизельных ДВС.	255
7.3	Некоторые особенности работы газопоршневых ДВС.	256
7.4	К вопросу повышения эффективности поршневых ДВС.	258
ГЛАВА 8	КОМБИНИРОВАННЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ.	262
8.1	Тепловые схемы для комбинированных энергетических установок.	262
8.2	Парогазовые теплоэлектроцентрали.	268
8.3	Комбинированные энергетические установки для флота.	271
8.4	Энергетические установки с тригенерацией.	276
ГЛАВА 9	РЕАКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ.	279
9.1	Принципы действия и конструкции реактивных двигателей.	279
9.1.1	Чуть-чуть об истории реактивного движения.	279
9.1.2	Принципы, используемые при создании реактивных двигателей.	282
9.1.3	Жидкостные реактивные двигатели.	283
9.1.4	Реактивные ракетные двигатели твёрдого топлива.	289
9.1.5	Прямоточные воздушно-реактивные двигатели.	291
9.1.6	Краткие сведения по ТВРД, ядерным, электрическим реактивным двигателям.	293
9.2	Краткие сведения о топливах и окислителях для ЖРД.	298
9.3	Краткие сведения о топливах и окислителях для РДТТ.	301
9.4	О двигателях для полётов в атмосфере и в космосе.	302
ГЛАВА 10	ХОЛОДИЛЬНАЯ И КРИОГЕННАЯ ТЕХНИКА.	305
10.1	Хладагенты для холодильной техники.	305
10.1.1	Кратко об истории развития холодильной и криогенной техники.	305
10.1.2	Хладагенты для холодильной техники.	307
10.2	Принципы действия и типы холодильных машин.	309
10.2.1	Принцип действия холодильных машин.	309
10.2.2	Основные виды холодильных машин.	311
10.3	Особенности использования криогенной техники и технологий.	317
10.4	Тепловые насосы для теплоснабжения потребителей.	323

ГЛАВА 11 ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ.	332
11.1 Гидроэнергетика и энергетическое оборудование ГЭС.....	334
11.1.1 Краткие сведения о гидроэлектростанциях.....	334
11.1.2 Энергетическое оборудование для ГЭС.	338
11.1.3 Кратко о приливно-отливных ГЭС.	343
11.2 Современное состояние солнечной энергетики в мире.	345
11.2.1 Принципы использования энергии солнечного излучения.	345
11.2.2 Потенциал и проблемы солнечной энергетики.	350
11.3 Геотермальная теплота – подарок из глубин Земли.....	355
11.4 Ветровая энергетика – достойный источник «зелёной энергетики».	363
11.5 Биоэнергетика в качестве ВИЭ для человечества.	369
11.6 Кратко о топливных элементах.	375
ГЛАВА 12 ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, ПОРОЖДЁННЫЕ ЭНЕРГЕТИКОЙ.....	378
12.1 Краткие сведения о загрязнении окружающей среды.....	378
12.2 Тепловая электроэнергетика и экология.	391
12.3 Атомная энергетика и экология.	397
12.4 Возобновляемые источники энергии и экология.....	401
12.5 Как решить экологические проблемы на планете?	408
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	413

Принятые обозначения и сокращения

- a - скорость звука, м/с; коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; ускорение, $\text{м}/\text{с}^2$;
- B - расход топлива, кг/с;
- b - хорда профиля, м;
- c - удельная теплоёмкость, Дж/кг*град; скорость света, м/с; абсолютная скорость, м/с
- d - диаметр, м; удельный массовый расход пара, кг/Дж;
- D - массовый расход пара, кг/с;
- E - энергия, Вт;
- f - функция;
- F - площадь, м^2 ; сила, Н;
- G - массовый расход газа, жидкости, кг/с;
- H - теплоперепад в ступени, Дж/кг;
- h - энтальпия, Дж/кг;
- к - показатель адиабаты; коэффициент теплопередачи; коэффициент размножения нейтронов;
- L - работа, Дж;
- l - удельная работа, Дж/кг;
- M - молекулярная масса, г/моль; число Маха;
- m - масса, кг;
- N - мощность, Вт;
- n - показатель политропы;
- p - давление, Н/м²;
- Q - теплота, Дж;
- q - удельная теплота, Дж/кг;
- R - газовая постоянная, Дж/кг*град; радиус, м;
- S - энтропия, Дж/град;
- s - удельная энтропия, Дж/кг*град;
- T - абсолютная температура, К;
- t - температура по шкале Цельсия, °С; время, с;
- U - внутренняя энергия, Дж;
- u - окружная скорость, м/с;
- V - объём, м³;
- v - удельный объём, м³/кг; кинематическая вязкость среды, $\text{м}^2/\text{с}$;
- w - относительная скорость, м/с;
- x - степень сухости пара;
- α - коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{град}$; угол направления абсолютной скорости, град;
- β - угол направления относительной скорости, град;
- ε - степень сжатия; холодильный коэффициент; степень черноты тела;

- ζ - коэффициент потерь;
- η - коэффициент полезного действия (КПД);
- λ - коэффициент теплопроводности, Вт/м*град;
- μ - коэффициент динамической вязкости, Па*с;
- ρ - плотность среды, кг/м³; степень реактивности;
- π - степень повышения давления;
- φ - коэффициент скорости в сопловой решётке профилей;
- ψ - коэффициент скорости в рабочей решётке профилей;
- ϵ - коэффициент лучеиспускания серого тела;
- ω - угловая скорость, 1/с.

Сокращения

- АПЛ - атомная подводная лодка;
- АСУ - автоматизированная система управления;
- АЭС - атомная электростанция;
- БЩУ - блочный щит управления;
- ВИТ - высокотемпературный источник теплоты;
- ВИЭ - возобновляемые источники энергии;
- ВМФ - военно-морской флот;
- ВНА - воздухонаправляющий аппарат;
- ВРД - воздушно-реактивный двигатель;
- ВРШ - винт регулируемого шага;
- ВФШ - винт фиксированного шага;
- ВЭС - ветровая электростанция;
- ГеоЭС - геотермальная электростанция;
- ГМО - генно модифицированный организм;
- ГПА - газоперекачивающий агрегат;
- ГРП - газораспределительный пункт;
- ГРЭС - главная районная электростанция;
- ГТЗА - главный турбозубчатый агрегат;
- ГТУ - газотурбинная установка;
- ГЦН - главный циркуляционный насос;
- ГЭС - гидроэлектростанция;
- ЖРД - жидкостный реактивный двигатель;
- ЗРУ - закрытое распределительное устройство;
- КВД - компрессор высокого давления;
- КИПиА - контрольно-измерительные приборы и автоматика;
- КИТТ - коэффициент использования теплоты топлива;
- КНД - компрессор низкого давления;
- КПД - коэффициент полезного действия;

КС	- камера сгорания;
КУ	- котёл-утилизатор;
ЛЭП	- линия электропередачи;
МКО	- машинно-котельное отделение судна;
НИОКР	- научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы;
НИТ	- низкотемпературный источник теплоты;
ОРУ	- открытое распределительное устройство;
ПВД	- подогреватель высокого давления;
ПГУ	- парогазовая установка;
ПДК	- предельно допустимая концентрация;
ПНД	- подогреватель низкого давления;
ПТУ	- паротурбинная установка;
РД	- реактивный двигатель;
РДТТ	- реактивный двигатель твёрдого топлива;
СПГ	- сжиженный природный газ;
СТВ	- система технического водоснабжения;
СУЗ	- система управления и защиты;
СЭС	- солнечная электростанция;
СЭУ	- судовая энергетическая установка;
ТВД	- турбина высокого давления;
ТВЭЛ	- тепловыделяющий элемент;
ТН	- тепловой насос;
ТНВД	- топливный насос высокого давления;
ТНД	- турбина низкого давления;
ТНУ	- теплонасосная установка;
ТЭС	- тепловая электрическая станция;
ТЭЦ	- тепловая электроцентраль;
УОЗ	- угол опережения зажигания;
ФЭП	- фотоэлектрический преобразователь;
ХМ	- холодильная машина;
ЦВД	- цилиндр высокого давления;
ЦНД	- цилиндр низкого давления;
ЦСД	- цилиндр среднего давления;
ЦЩУ	- центральный щит управления;
ЯЭУ	- ядерная энергетическая установка.

*«Нельзя объять необъятное!», сказал Козьма Прутков.
Нельзя объять необъятное сразу, но можно попытаться сделать это постепенно.
Этика XXI века.*

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Уважаемый читатель, Вы пользуетесь книгой, представленной в бумажном виде, либо её электронной версией, которая представляет сборник современной информации и обобщённый взгляд на разностороннюю область генерирования энергии. Её можно рассматривать как своеобразный учебник и научно-техническое пособие по энергетике, кратко изложенное в научно-популярной форме.

До определённого момента времени биосфере Земли хватало энергии от Солнца. Только одному виду живых существ на планете её не хватает – человечеству! Ему надо очень много дополнительной энергии, для удовлетворения постоянно возрастающих производственных, хозяйственных, бытовых потребностей. Эта тенденция проявляется особенно явно в нашем бурно развивающемся XXI веке. В любой стране мира энергетика является базой для развития промышленности, экономики, создания комфортного быта для людей.

Современный человек должен это понимать, при этом быть востребованным специалистом в своей сфере деятельности, обладать широким кругозором в различных областях знаний, техники, технологий. Интеллект человека во многом формируется информацией из прочитанных книг. Как говорится: нужно знать много о не многом и немного о многом.

Содержание книги, выпущенной в печатном и в электронном виде, в основном, нацелено на реализацию второй части этого высказывания – «немного о многом». Её название гласит «Генерация энергии – это просто?!». Теме генерирования энергии в различном техническом оборудовании посвящены в мире тысячи замечательных книг – солидных и не очень, сотни тысяч научных статей в специализированных и научно-популярных журналах, на различных языках. Практически каждый из нас повседневно сталкивается с потреблением энергии в различной форме, с «продуктами» генерирования энергии на производстве, транспорте, быту. У многих людей, а особенно у любознательных, студентов, учащихся, возникают вопросы, а откуда берётся энергия, что это такое, как она получается, как рационально её использовать?

Эта книга даёт обоснованные ответы заинтересованным читателям на поставленные вопросы, по правилу – сообщать **только самое главное, принципиально значимое, о многом, но понемногу.**

Что конкретно предлагается читателю в этой книге, на какие вопросы он сможет получить ответы?

Изложенная информация, рассчитанная на широкий круг заинтересованных читателей, отвечает на многочисленные вопросы в области генерирования энергии. Если обобщить и сказать вкратце, то там представлено следующее.

1. Сначала речь идёт о важнейших законах и положениях, заложенных в принципы функционирования любого генерирующего энергетического оборудования. Эти положения представлены очень кратко, в простой для понимания форме. Без них, в

большинстве случаев, трудно понять, как получить энергию, как её преобразовать? Вы поймёте, что используемые **ПРИНЦИПЫ** генерации энергии довольно просты. Но одновременно узнаете, что технологические установки, в которых применяются эти принципы, являются весьма сложными объектами.

2. И далее читатель погружается в реальный мир энергетической техники и технологий, источников энергии, преобразований энергии, работы энергетического оборудования всевозможного вида. Вы получите представления о паротурбинных установках, ядерных установках, о крупной и малой энергетике. Узнаете о многообразии газотурбинной техники, проблемах в обеспечении её эффективной работы, генерации энергии в авиационных и ракетных двигателях.
3. Может ли автомобилист обойтись без представлений по поршневым двигателям внутреннего сгорания? Если не может, тогда поговорим о тонкостях их работы, с пользой для читателя. Не забудем и газопоршневые двигатели малой энергетики.
4. В книге читатель узнает интересные сведения о холодильной технике, сжиженных газах, озонобезопасных веществах. Прочитав информацию о тепловых насосах, может быть, «рукодельный» читатель захочет получать у себя для отопления дома почти «бесплатную» теплоту с его помощью, - из воздуха, земли, воды?
5. В настоящее время в мире используются в возрастающих масштабах возобновляемые источники энергии: гидроэнергия на больших и малых ГЭС, солнечная, геотермальная, ветровая, биотопливо, энергия приливов и отливов, топливные элементы и т.д. В книге рассказано об их потенциальных возможностях, стратегии и практике применения.
6. Энергетика негативно влияет на окружающую среду обитания, на человека, животный и растительный мир. В книге обсуждаются насущные для человечества вопросы о загрязнении окружающей среды, компромиссе экологии и энергетики.

Для понимания работы генерирующих энергетических установок нужно обладать знаниями в области физики, математики, термодинамики, механики жидкости и газа, сопротивления материалов, теоретической механики, специальных знаний по теории горения топлив, конструкциям турбин, парогенераторов, ядерных реакторов, и многим другим техническим дисциплинам. Этому учат долгие годы в солидных университетах.

А здесь предложение заинтересованному читателю – прочти изложенное и будешь знать, что в реальности **принципы генерации энергии** не являются слишком сложным «продуктом» для понимания. Принципы принципами, а вот реальное воплощение этих принципов в энергетических объектах не столь простое, и об этом тоже пойдёт речь на страницах книги.

Книга рассчитана, в основном, на читателя, имеющего среднее образование, или немного выше. В настоящее время везде на практике используются специализированные компьютерные программы расчётов тепловых машин и их элементов. Поэтому при изложении материалов книги применяется простейший математический аппарат анализа, а, при возможности, и вовсе без него, никаких расчётных методик не приводится.

Автор этой книги подолгу годами сидел за умными книжками, обучался в ВУЗе, работал Главным инженером проектов многочисленных энергетических объектов, много времени уделял обучению студентов в технических университетах, в т.ч. в КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. В результате педагогической и практической деятельности автор выработал свои методические принципы – как передать основы знаний эффективно и доходчиво,

простыми и понятными положениями. Авторские методические принципы перенесены в основу изложения содержания данной книги.

Обычно желающие познакомиться с азами в области техники, в частности, по генерации энергии, обложившись множеством специализированных книжек, находят ответы на свои запросы. Многие черпают информацию в безбрежном океане Интернета, откапывая нужные сведения на различных, умных и не очень, сайтах. Обычно так бывает, открываешь в Интернете требуемую тему, через мгновение на мониторе выпадают десятки и даже сотни тысяч сайтов, картинок, сопровождаемые назойливой рекламой. Просто глаза разбегаются, не понять – какая здесь информация, устаревшая или приемлемая, где тут отыскать что-либо полезное для себя? Не подготовленному человеку можно запросто «утонуть» в этом море информации. Некоторые, «рукодельные» и не привыкшие читать полезные вещи в книгах и Интернете, полагаются в своём самообразовании на могучий метод «научного тыка». Иногда это получается с большим трудом, но только у способных «Ломоносовых».

Ясная и понятная ситуация – когда человек обладает знаниями и умениями, тогда он чувствует себя свободным, готовым сделать уверенный шаг к успешному достижению своих целей. В современном, быстро развивающемся мире, нужно стремиться приобретать больше глубоких и разносторонних знаний, потому что без них трудно обойтись в жизни, в подавляющем большинстве направлений деятельности.

По каждому разделу книги, предложенному читателям, существует огромное множество информации в различных печатных изданиях и в постоянно развивающемся Интернете. Автор, в своей практической деятельности, столкнулся с тем, что обычным читателям, специалистам, студентам, учащимся явно не хватает литературы, где в одном месте собрана ёмкая информация, рассказано просто, но одновременно строго в научно-популярном стиле представлены важнейшие сведения для понимания принципов работы, конструктивного оформления генерирующего энергетического оборудования. Практически сложно найти книгу, в которой воедино собраны принципы генерации энергии в самых разнообразных областях техники. Например, чтобы в одной книге было представлено обсуждение основ теплотехники, работы оборудования паротурбинных, газотурбинных, комбинированных установок, атомных энергетических установок, поршневых двигателей внутреннего сгорания, авиационных и ракетных двигателей, холодильных установок, возобновляемых источников энергии, гидроэнергетики, геотермальной энергетики и т.д. И, кроме того, была тут же дана, важная для современной цивилизации, информация о негативном влиянии энергетики на экологию, загрязнение окружающей среды, обсуждались пути решения экологических проблем. А ведь вся эта техника по генерации энергии находится в единой цепочке, только производимой в различном технологическом оборудовании, она неразрывно связана с окружающей средой.

Иногда читателям не хватает, выполненных в самой упрощённой форме, описаний и схематических или конструктивных рисунков, собранных в одной книге, разъясняющих функционирование тепловых и холодильных машин, отдельных узлов и деталей в энергетическом оборудовании. Настоящая книга призвана устранить пробел, замеченный автором в современном состоянии литературы и информации, по важному для развития цивилизации направлению – генерированию энергии. И главное, она должна служить удовлетворению представлений читателей в столь интересной и важной сфере знаний, применению полученных знаний в практической деятельности.

Задача, поставленная автором, весьма трудная. Поначалу казалось, что «миссия не выполнима» при создании такой многообъемлющей книги (см. эпиграф в Предисловии). Но, как известно, чтобы дойти до цели, нужно прежде всего идти, желательно, правильным путём, и тогда - дорогу осилит идущий. Постепенное понимание предмета, о котором хочется рассказать читателям и полученный практический опыт в передаче знаний, привели автора к убеждению, что это возможно.

В книге использованы доступные исходные источники информации, в т.ч. многое заимствовано из огромного мира Интернета. По каждому разделу, написанному в этой книге, выпущены сотни изданий, с самой разнообразной информацией и глубиной проработки материала, на разных языках, в различных странах мира. Подавляющее число рисунков в книге заимствовано из общедоступных сайтов в Интернете, в основном с сайтов Интернет-портала «Яндекс.Картинки», путём выборки наиболее подходящих из нескольких миллионов просмотренных картинок. Огромную массу информации по рассматриваемой тематике, представленную в различных разрозненных, отдельных источниках, автор изучил, пропустил сквозь призму своих представлений и теперь представил её на суд читателей в обобщённом виде. Выражаю признательность и огромную благодарность авторам многочисленных материалов, опубликованных в книгах, учебниках, статьях, Интернете, оказавших большую и неоценимую помощь при создании этой книги, не претендуя на их авторские права.

Для начала определимся с термином «энергетика», что под ним следует понимать. Энергетика – совокупность больших природных и искусственных систем, которые предназначены для получения, преобразования, распределения и использования потребителями всех видов энергетических ресурсов. В эти системы входят подсистемы, связанные с добычей и переработкой топливных ресурсов (нефтяная, газовая, атомная индустрия), выработкой теплоты и электрической энергии (теплоэнергетика, электроэнергетика, ядерная энергетика, нетрадиционная энергетика), магистральными и локальными сетями распределения тепловой и электрической энергии. В частности, энергетика связана с технологиями управления и диспетчеризацией потоков электрической и тепловой энергии, работой различного электротехнического оборудования и т.д.

В одной книге столь многогранные вопросы энергетики отразить невозможно. Автор не ставит задачу сформировать из читателя квалифицированного специалиста в области генерации энергии. Но главное, что читатель должен извлечь – чёткое знание и понимание **принципов**, как эта вся многообразная техника по генерации энергии работает. Книга поможет заинтересованному читателю в приобретении обобщённых знаний, которые, без сомнений, окажутся полезными в его практической деятельности. Принципы генерации энергии достаточно простые. Однако, энергетические установки, где они используются, как подчёркивает автор, являются весьма сложными объектами. Детализированные технические тонкости и нюансы процессов, происходящих в них, в настоящее время порой изучены не в полных объёмах для многочисленных видов энергетической техники.

Автор будет признателен читателям за любые полезные замечания, указания о возможных ошибках, предложения по улучшению содержания книги, которые следует направлять в редакцию издательства, либо лично автору по E-mail: ngr-energo@yandex.ru

ГЛАВА 1 БЕЗ НАУКИ ТРУДНО ПОНЯТЬ ПРИНЦИПЫ ГЕНЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ

1.1 Роль науки и энергетики в развитии цивилизации.

Любому человеку на планете понятно и хорошо известно, что требуемые для развития человечества знания, технологии вырабатывались передовыми мыслителями своего времени в течение многих столетий. В настоящее время невозможно представить, хотя бы на миг, как бы существовала наша цивилизация без многообразных научных знаний о природе, и в частности, без энергетики? В этом случае человечество влачило бы существование на уровне древнего мира, первобытного общинного строя, используя лишь силу и энергию своих мышц, примитивные каменные орудия для труда и охоты, добывая и поддерживая огонь, получая жизненную энергию от Солнца. Не прекращающийся процесс постепенного накопления информации и знаний человечеством, начиная от древних жителей Земли и до наших дней, позволили создать современную цивилизацию. Наука в этом развитии человечества всегда занимается непрерывным поиском ответов на вопросы понимания окружающего мира, а также служит средством преобразования этого мира для своих нужд, полезных, а порой и негативных.

История цивилизации неразрывно связана с развитием энергетики и освоения различных видов энергии, уровнем обеспеченности людей энергией. По понятным причинам энергия всегда играет важнейшую роль в развитии человечества, практически во всех видах его деятельности. Отслеживается явная зависимость между состоянием энергетической ситуации в различных странах мира и уровнем жизни, культуры, объёмами выпускаемой продукции, уровнем развития техники и технологий, внутренней и внешней политикой государств. По мере развития человечества происходит неуклонный рост потребления энергии. Это способствует повышению энерговооруженности производства и человека, возможностей людей лучше организовать свою жизнь, отдых, образование и т.д.

В настоящее время под термином «энергетика» понимают целую отрасль промышленности, как указано в предисловии книги, которая занимается использованием, преобразованием и распределением энергетических ресурсов всех известных видов. Задача, решаемая энергетикой, если утрировать и обобщать её смысл, сводится к следующему. В природе есть некие потенциальные источники «первичной» энергии. Из них надо эту первичную энергию (например, химически связанную в органическом топливе) каким-то образом выделить. Затем, выделенную энергию нужно преобразовать во «вторичную». Вид вторичной энергии должен соответствовать требованиям, необходимым для нужд человека и общества. Вторичной энергией может быть механическая работа различных машин и технических устройств, тепловая, электрическая, электромагнитная энергия, химическая и т.д. Эти виды энергии необходимы для функционирования промышленности, производства продовольствия, товаров и услуг, транспортировки грузов и людей, обеспечения работы инфраструктуры и коммуникаций и т.п.

В дальнейшем, в книге рассматриваются основные положения науки и техники, которые используются в энергетике, только в части принципов генерирования энергии.

В первой главе книги приведена информация, в виде известных процессов и законов природы, математических выражений, без которых невозможно понять сущность преобразований энергии из одного вида в другой. Далее обсуждаются вопросы высвобождения первичной энергии из природных источников, используемой для последующих преобразований в другие виды энергии. В основном, в качестве первичных источников энергии рассмотрены углеводородные топлива. Уделено внимание получению энергии в управляемых цепных реакциях деления ядерного топлива. Очень кратко обсуждаются проблемы в области реакций синтеза ядер лёгких элементов.

В главах 1 - 10 книги рассмотрена информация, связанная с принципами получения вторичной энергии, её использованием в технике и технологиях производства теплоты, холода, а также механической работы, применяемой для привода различных объектов – промышленных, транспортных, бытовых - и получением электрической энергии.

1.2 Немного о законах, заложенных в основы генерации энергии.

Идея, которая впервые была высказана древнегреческим философом Демокритом (460 г. до н.э.), о том, что все вещества в живой и не живой природе состоят из мельчайших частиц - атомов, была возрождена физиком Джоном Далтоном (1776-1844 г.г.), только лишь в начале XIX века [1]. Он доказал реальность существования атомов в своей работе «Новая система философии химии», опубликованной в 1808 г., утверждал, что различные вещества имеют разные массы атомов. Именно тогда были заложены основы и начала для развития знаний о строении атомов.

XIX век ознаменовался бурным развитием атомистической теории и получением основных законов, положивших начало молекулярно-кинетической теории газов, исключительно важных для развития промышленной революции в мире. Научные знания и поиски перестают быть уделом отдельных «натурфилософов», становятся важным делом многочисленных учёных, изобретателей, в т.ч. в области энергетики.

Человечество обязано чтить имена учёных, которые способствовали быстрому развитию цивилизации и пониманию роли энергетики: Жозеф Гей-Люссак, Джон Дальтон, Джеймс Джоуль, Исаак Ньютон, Уильям Томсон (лорд Кельвин), Роберт Бойль, Эдм Мариотт, Жак Шарль, Бенуа Поль Эмиль Клапейрон, Дмитрий Иванович Менделеев, Людвиг Больцман, Рудольф Клаузиус, Николя Леонар Сади Карно, Амедео Авогадро, Даниил Бернулли, Леонард Эйлер, Жозеф Луи Лагранж и многие другие.

Современные люди сейчас многое понимают в области познания законов природы, использования их для создания полезной техники и технологий и, в частности, энергетики, благодаря важнейшему принципу, высказанному И. Ньютоном в известном афоризме - если я видел дальше других, то потому, что стоял на плечах гигантов.

Какие же основные известные законы, определения, утверждения, понятия и т.п. положены в основы энергетики, с использованием которых можно понимать дальнейшее содержание информации в книге? Такие сведения «разбросаны» в мире Интернета, их можно найти во многих справочниках, различных учебниках, специальной литературе. Основные положения о них приведены здесь, в п. 1.2.

► Понятия о термодинамической системе, окружающей среде и рабочих телах.

Под термодинамической системой понимают группу тел, тело или часть тела, которые взаимодействуют, как между собой, так и с окружающей средой [2]. Все тела,

находящиеся за пределами границ рассматриваемой термодинамической системы, называются окружающей средой.

Взаимодействие между термодинамической системой и окружающей средой может проявляться в различных видах – тепловое, механическое, электрическое, магнитное, химическое и т.п. Для генерирования энергии в тепловых машинах, а также для использования энергии в холодильных машинах, первостепенное значение имеют тепловое и механическое взаимодействие между термодинамической системой и окружающей средой, их в дальнейшем и будем рассматривать.

Различают несколько видов термодинамических систем:

- изолированная, не взаимодействующая с окружающей средой, в которой остаются постоянными масса, объём, энергия;
- закрытая, обменивающаяся энергией с окружающей средой, но не массой и объёмом;
- открытая, обменивающаяся массой, объёмом, энергией с окружающей средой.

Кроме того, различают гомогенную и гетерогенную системы. В гомогенных системах состав и физико-химические свойства вещества неизменны, не существует границ раздела между отдельными фазами вещества. Гетерогенная система состоит из нескольких гомогенных частей (фаз) с различными физическими свойствами, отделённых одна от другой видимыми поверхностями раздела (например, лёд и вода, вода и пар).

Рабочее тело – вещество в газообразном, жидком или плазменном состоянии, с помощью которого осуществляется преобразование какой-либо энергии при получении механической работы, теплоты или холода. (Плазма – ионизированный газ; различают низкотемпературную и высокотемпературную плазму).

В молекулярно-кинетической теории газов рассматривались идеальные газы, у которых отсутствуют силы взаимодействия, а объёмы молекул у них пренебрежимо малы. Подобное упрощение модели состава газа позволило выявить основные закономерности их изменений в различных термодинамических процессах [2-4].

Состояние рабочего тела определяется основными термодинамическими параметрами: давление (**p**), объём (**V**), абсолютная температура (**T**). Параметры, отнесённые к массе рабочего тела **1кг**, называются удельными. Обозначения и единицы измерения параметров в СИ: **p**, давление – Па; **v**, удельный объём – м³/кг; (часто используют плотность $\rho = 1/v$, кг/м³); **T**, абсолютная температура в градусах Кельвина – К (часто используют градусы по шкале Цельсия **t**, °С, связанные с абсолютной температурой соотношением **T = t + 273,15**).

При описании движения рабочих тел (жидкостей и газов) используют параметры вязкости. Вязкость, или внутреннее трение – свойство жидкостей и газов оказывать сопротивление перемещению отдельной их части относительно другой части. При этом работа, затрачиваемая на перемещение частей среды относительно друг друга, превращается в теплоту и рассеивается.

Обозначения и единицы измерения вязкости в СИ: **μ**, динамическая вязкость – Па·с; **ν**, кинематическая вязкость – м²/с. Динамическая и кинематическая вязкость среды связаны соотношением **μ = ν·ρ**. Вязкость жидкостей и газов зависит от температуры и давления, такую информацию можно найти в справочной литературе.

► Уравнение состояния газа:

- для идеального газа, уравнение Менделеева – Клапейрона

$$pV_m = RT, \quad (1.1)$$

где p – давление газа; V_m – молярный объём газа, $\text{м}^3/\text{моль}$; R – газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$; T – абсолютная температура газа, К . (Для 1 кг массы газа: $pv = RT$)

- для реального газа

$$pV = Z(p, T) \cdot RT \cdot m/M, \quad (1.2)$$

где $Z(p, T)$ – коэффициент сжимаемости газа; m – масса газа; M – молярная масса.

В этих выражениях $R = R_u / \mu$, где $R_u = 8314 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{град})$ – универсальная газовая постоянная. Газовая постоянная R не зависит от давления, удельного объёма, температуры, зависит только от вида газа (его молекулярной массы).

Уравнение Менделеева – Клапейрона объединяет частные газовые законы – Гей – Люссака, Бойля – Мариотта, Шарля, Авогадро, известные из школьного курса физики.

► Энергия рабочего тела:

$$E = U + E_{\text{мех}}, \quad (1.3)$$

где U – внутренняя энергия тела; $E_{\text{мех}}$ – внешняя механическая энергия.

Внутренняя энергия тела состоит из тепловой энергии, которая складывается из кинетической энергии поступательно и вращательно движущихся молекул, энергии внутримолекулярных колебаний, потенциальной энергии сил взаимодействия между молекулами, химической, внутриядерной энергии. (Последние две составляющие внутренней энергии обычно в технической термодинамике не рассматриваются.) Внутренняя энергия рабочего тела зависит от основных термодинамических параметров тела – p, V, T .

Внешняя энергия тела состоит из кинетической энергии его поступательного движения и потенциальной энергии взаимодействия гравитационного поля с телом.

Для использования в технических расчётах удобно понятие энтальпии рабочего тела:

$$H = U + pV, \quad (1.4)$$

Удельная энтальпия для рабочего тела массой 1 кг определяется в виде: $h = u + pv$ [$\text{Дж}/\text{кг}$].

► Механическая работа (работа по изменению объёма рабочего тела):

$$L = \int_{V_1}^{V_2} p dV, \quad (1.5),$$

или удельная механическая работа: $l = \int_{v_1}^{v_2} p dv$ [$\text{Дж}/\text{кг}$].

Принято считать механическую работу положительной, когда происходит расширение объёма рабочего тела ($dV > 0$), при этом термодинамическая система совершает работу против действия внешних сил. Механическую работу считают отрицательной при уменьшении объёма рабочего тела ($dV < 0$), когда окружающая среда совершает работу над термодинамической системой.

В различных, устаревших источниках информации иногда механическую работу обозначают символом A , вместо L .

Жидкие рабочие тела практически мало изменяют свой объём при тепловых или механических воздействиях. Газообразные и парообразные рабочие тела способны легко изменять свой объём. Именно по этой причине для получения или использования механической работы применяют газообразные или парообразные вещества.

В системе координат $v - p$ графически механическая работа представляет собой площадь заштрихованной фигуры, заключённой между кривой процесса $b-d$ (зависимостью $p(v)$) – и соответствующими отрезками на оси абсцисс, – площадь фигуры $a-b-d-c-a$, рис. 1.2.1.

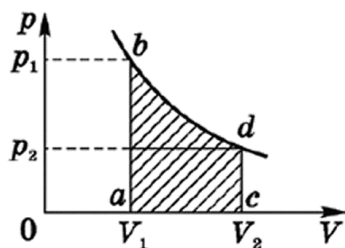


Рис. 1.2.1. Графическое изображение механической работы в процессе b-d

► Располагаемая (техническая, полезная внешняя) работа:

$$L_0 = - \int_{p_1}^{p_2} v dp, \quad (1.6)$$

или удельная располагаемая работа

$$l_0 = - \int_{p_1}^{p_2} v dp \quad [\text{Дж/кг}].$$

В системе координат $v - p$ графически располагаемая работа представляет собой площадь заштрихованной фигуры, заключённой между кривой процесса 1-2 - зависимостью $p(v)$ - и отрезками на оси ординат, площадь фигуры, показанной на рис. 1.2.2.

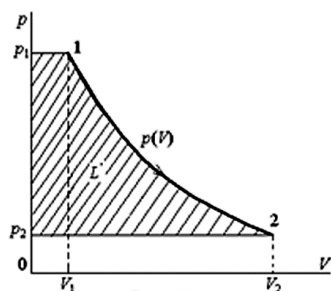


Рис. 1.2.2. Графическое изображение располагаемой работы в процессе 1-2

Располагаемая работа складывается из работы всасывания рабочего тела во внутреннюю полость машины, механической работы в процессе 1-2 и работы выталкивания рабочего тела после завершения рабочего процесса 1-2. (Удельную располагаемую работу иногда в различных источниках литературы обозначают символами $l_{\text{рас}}$ или $l_{\text{тех.}}$).

► Мощность – механическая работа, выполняемая за 1 секунду, $N = L/t$ [Вт].

► Теплота - энергия, которую получает или теряет термодинамическая система (рабочее тело) в процессе теплообмена с окружающей средой. Теплообмен может происходить посредством теплопроводности, конвекции, излучения, электромагнитного

воздействия.

Лишь в XIX веке учёные осознали причинную связь теплоты с движением атомов и молекул в веществе и стали трактовать теплоту как энергию.

Уместно отметить, что на протяжении многих веков существовали теории флогистона, теплорода для объяснений понятия теплоты. Считалось, что в горючих веществах содержится флогистон - особая «огненная субстанция», которая высвобождается и улетучивается при горении. Позднее, в XVIII веке, среди учёных доминировали идеи о теплороде – невесомом флюиде энергии, содержащемся в каждом веществе и являющимся причиной происходящих тепловых процессов [1].

Впервые несостоятельность теорий флогистона, теплорода были отвергнуты М.В. Ломоносовым, Д. Бернулли и доказаны опытами графа Румфорда (1798 г.) и Г. Дэви (1799 г.).

► Первый закон термодинамики, применительно к рассматриваемым процессам в тепловых машинах генерировании энергии и в холодильной технике, определяется в виде:

$$Q = \Delta U + L, \quad [\text{Дж}] \quad (1.7)$$

$$\text{Или для 1 кг массы рабочего тела: } q = \Delta u + l \quad [\text{Дж/кг}].$$

Теплота, подведенная/отведенная к термодинамической системе, расходуется на изменение её внутренней энергии и/или на суммарную механическую работу по изменению объема термодинамической системы.

В дифференциальной форме первый закон термодинамики имеет вид: $dq = du + dl$.

Изначально, понимание того, что теплоту можно преобразовывать в механическую работу стало мощным толчком для развития энергетических установок, тепловых двигателей. Обратно, механическую работу можно превратить в теплоту. Можно получать теплоту, механическую работу за счёт изменения внутренней энергии рабочего тела. Особые заслуги в понимании законов сохранения энергии, возможностей превращения энергии из одного вида в другой, принадлежат Н.С. Карно, У. Томсону (лорд Кельвин), Р. Клаузиусу [1]. Н.С. Карно впервые объяснил принципы - как теплота может заставить работать тепловой двигатель, предложил идеальные прямые циклы тепловых двигателей и обратные циклы холодильных машин. Он впервые показал невозможность создания «вечного двигателя». Р. Клаузиус внёс предложение о том, что идея сохранения энергии должна стать первым законом термодинамики. Он впервые ввёл в анализ понятие энтропии, исследовал изменения энтропии для состояния термодинамических систем и сформулировал важнейшие принципы второго закона термодинамики. У. Томсон впервые понял, что должна существовать температура, при которой прекращается всякое движение – абсолютный нуль. Шкала температур названа в его честь, абсолютный нуль градуса К – начало отсчёта в этой шкале. Он же впервые в 1852 г. разработал идею устройства «теплого насоса», которая лежит в основе работы холодильной техники, систем кондиционирования, тепловых насосов.

► **Функции состояния и функции процесса.** Если процесс перехода рабочего тела из состояния 1 в состояние 2 не зависит от пути перехода, то такие функции являются функциями состояния, например, внутренняя энергия, энтальпия, энтропия. Изменение таких функций всегда определяется только лишь разницей значений параметров в конце и начале процесса. Если же переход рабочего тела из одного состояния в другое зависит от пути перехода, то такие функции называют функциями процесса, например, теплота, механическая работа.

► **Удельная теплоёмкость рабочего тела (любого вещества),** используется для определения теплоты в различных процессах. Определяется в виде:

$$c = dq / dt, \quad (1.8)$$

представляет количество теплоты, сообщаемой единице количества вещества в заданном процессе изменения его состояния, чтобы изменить его температуру на 1 градус. Теплоёмкость вещества зависит от вида процесса и может принимать значения в пределах от $-\infty$ до $+\infty$ в изотермических процессах. Теплоёмкость реальных веществ можно найти в теплотехнических справочниках.

Если рабочим телом является газ, то обычно используют понятия удельной массовой (c), объёмной (c'), мольной теплоёмкостей (μc), при этом теплота сообщается, соответственно – 1 кг массы, 1 м³, 1 кмоль газа. Кроме того, часто используются понятия удельной теплоёмкости газа в изобарном процессе (c_p) - при постоянном давлении и изохорном процессе (c_v) - при постоянном объёме. Взаимосвязи массовой, объёмной, мольной, изобарных, изохорных теплоёмкостей можно найти в справочной литературе.

Изобарная и изохорная массовые теплоёмкости газа взаимосвязаны в соответствии с законом Майера: $c_p - c_v = R$ (1.9)

В газодинамике большое значение имеет коэффициент Пуассона:

$$k = c_p / c_v. \quad (1.10)$$

Полезны для дальнейшего анализа выражения:

$$c_p = kc_v; \quad c_p = kR / (k - 1). \quad (1.11)$$

В общем случае теплоёмкость вещества зависит от давления и температуры. Если же состояние газа близко к состоянию идеального газа, то зависимость теплоёмкости от давления газа мала и ею обычно пренебрегают.

► Закон Дальтона для газовых смесей. Если газы не вступают в химические реакции между собой и представляют собой механическую смесь нескольких газов, то каждый газ ведёт себя в смеси так, как будто в смеси нет других газов. При этом каждый газ равномерно распределяется по всему объёму смеси, оказывает на ограничивающие данный объём стенки сосуда своё давление p_i (парциальное) и подчиняется своему уравнению состояния. Давление газовой смеси равно алгебраической сумме парциальных давлений компонентов газа, составляющих данную смесь, т.е.

$$p_{\text{см}} = p_1 + p_2 + \dots + p_i + \dots + p_n = \sum_1^n p_i. \quad (1.12)$$

Состав газовой смеси может быть задан в массовых (m_i), объёмных (g_i) и условных молекулярных долях (μ_i). Взаимосвязи между этими способами определения состава газовой смеси можно найти в справочной литературе.

► Второй закон термодинамики. Понятие об энтропии.

Существует достаточно много различных формулировок второго закона термодинамики, но существо их одинаково и вытекает из наблюдений за явлениями, происходящими в природе. Его можно изложить в виде следующих постулатов:

- самопроизвольные естественные процессы возникают и развиваются при нарушении равновесия между термодинамической системой и окружающей средой;
- эти процессы всегда протекают в одном направлении, от источника с большим потенциалом к источнику с меньшим потенциалом;
- эти процессы протекают до тех пор, пока не установится равновесие между термодинамической системой и окружающей средой;
- в термодинамической системе можно заставить протекать процесс в направлении обратном естественному, самопроизвольному, но для этого требуется подвод энергии из окружающей среды.

Параметром состояния рабочего тела является энтропия, важная величина для анализа природных процессов, впервые введённая в анализ Р. Клаузиусом (1865 г.). Энтропия представляет собой полный дифференциал функции s (т.е. $ds = dq/T$).

Второй закон термодинамики связан с понятием энтропии, являющейся мерой хаоса, или мерой молекулярного беспорядка в системе. Второй закон термодинамики гласит, что для Вселенной в целом энтропия возрастает, т.е. $ds > 0$. Если объём и энергия термодинамической системы постоянны, то любое изменение в системе приводит к увеличению её энтропии. (В изолированной термодинамической системе, в которой протекают обратимые процессы, $ds = 0$. Но реальных обратимых процессов в природе не существует.).

Использование параметра состояния – энтропии – позволяет представить теплоту процесса в графическом виде, что иногда удобно при анализе циклов тепловых машин и холодильных установок. Для этой цели используют систему координат s - T .

Удельная теплота какого-либо процесса 1-2 представляется в виде:

$$q_{1-2} = \int_{s_1}^{s_2} T ds. \quad (1.13)$$

По известной функции $T(s)$ можно определить теплоту процесса 1-2.

Начало отсчёта энтропии может быть выбрано произвольно, поскольку важно именно изменение энтропии в каких-либо процессах, а не её конкретное значение.

В технической термодинамике функции состояния - внутреннюю энергию, энтальпию, энтропию принято называть калорическими параметрами, а абсолютное давление, удельный объём, температуру – термическими параметрами.

1.3 Основные термодинамические процессы.

Для понимания способов генерирования энергии, а также в теплотехнике важно знать основные термодинамические процессы, известные из школьного курса физики. Важно уметь определять в конкретных процессах изменения состояния рабочего тела его параметры и основные термодинамические величины – теплоту, механическую работу, изменение внутренней энергии, энтальпии, энтропии, теплоёмкости.

Политропный процесс изменения состояния рабочего тела является обобщающим, он происходит при постоянной теплоёмкости рабочего тела c . Уравнение политропного процесса записывается в следующем виде [2-4]:

$$p \cdot v^n = \text{const}, \quad (1.14)$$

где n – показатель политропы, определяемый соотношением $n = (c_p - c) / (c_v - c)$.

Из него, как частные случаи, могут быть получены: изобарный ($p = \text{const}$, $n = 0$), изохорный ($v = \text{const}$, $n = \pm \infty$), изотермический ($T = \text{const}$, $n = 1$), адиабатный (протекающий без теплообмена с окружающей средой $p \cdot v^k = \text{const}$, $n = k$) процессы.

Представим формулы для расчётов изменения основных термодинамических параметров и функций для политропного процесса 1 - 2 изменения состояния рабочего тела при известных значениях параметров в точке 1 начала процесса.

- Связь между основными термодинамическими параметрами:

$$T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{n-1} = (p_2/p_1)^{n-1/n}. \quad (1.15)$$

- Удельная механическая работа:

$$l = (p_1 v_1 - p_2 v_2) / (n-1). \quad (1.16)$$

- Удельная располагаемая работа:

$$l_0 = n p_1 v_1 (1 - T_2/T_1) / (n - 1). \quad (1.17)$$

- Удельная массовая теплоёмкость:

$$c = c_v (n - k) / (n - 1). \quad (1.18)$$

- Удельная теплота процесса:

$$q = c (T_2 - T_1). \quad (1.19)$$

- Изменение удельной внутренней энергии:

$$\Delta u = c_v (T_2 - T_1). \quad (1.20)$$

- Изменение удельной энтальпии:

$$\Delta h = c_p (T_2 - T_1). \quad (1.21)$$

- Изменение удельной энтропии:

$$\Delta s = c_p \ln (T_2/T_1) - R \ln (p_2/p_1) = c \ln (T_2/T_1). \quad (1.22)$$

Для частных случаев изопроцессов расчётные формулы можно получить, подставляя соответствующее значение показателя политропы в уравнения (1.15)...(1.22), или найти их в справочной и учебной литературе.

Графическое изображение частных видов политропных процессов представлено на рис. 1.3.1 и рис. 1.3.2 в системах координат v - p и s - T .

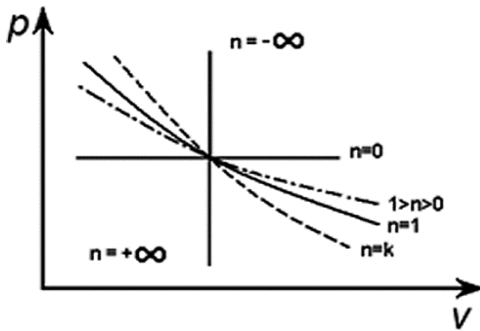


Рис. 1.3.1. Изображение основных термодинамических процессов в диаграмме p - V

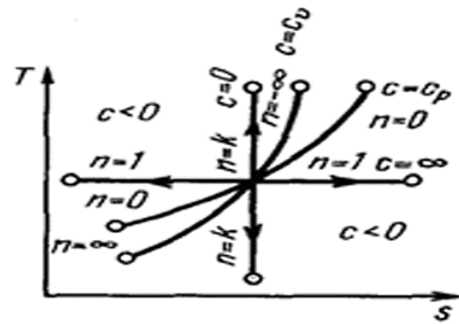


Рис. 1.3.2. Изображение основных термодинамических процессов в диаграмме s - T

1.4 Реальные рабочие тела для тепловых и холодильных машин.

Реальные газы имеют отличия от модели идеального газа. В них проявляются свойства взаимодействия между молекулами и наличие собственного объема молекул. Реальные газы отличаются от идеальных характером изменения теплофизических свойств, что определяется, главным образом, из каких атомов состоит молекула вещества, формой и размерами молекул. Например, теплоемкость идеального газа не зависит от давления, а у реальных газов зависит. Вблизи критической точки свойства реальных газов могут изменяться аномально.

Реальные вещества, в т.ч. реальные рабочие тела, могут находиться в различных фазовых состояниях твердом, жидком, газообразном, плазме. Различия существования фаз одного и того же вещества определяются силами взаимодействия между ядрами и электронами в молекулах, между молекулами. Вещество может быть переведено из одного фазового состояния в другое, если изменить силы взаимодействия между молекулами и их внутреннюю энергию. Переходы вещества в различные фазовые состояния условно показаны на рис. 1.4.1.

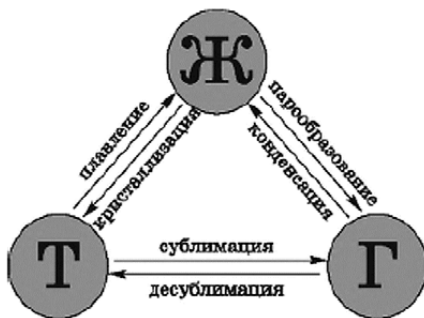


Рис. 1.4.1. Условные переходы вещества в различные фазовые состояния

Большинство однокомпонентных реальных веществ при затвердевании уменьшаются в объеме [5]. На рис. 1.4.2, в качестве примера, показана поверхность p - v - T для реального вещества, объем которого при затвердевании уменьшается [5]. На рис. 1.4.3 представлены проекции изотерм такого реального газа на плоскость v - p , построенные на основе сечения поверхности p - v - T .

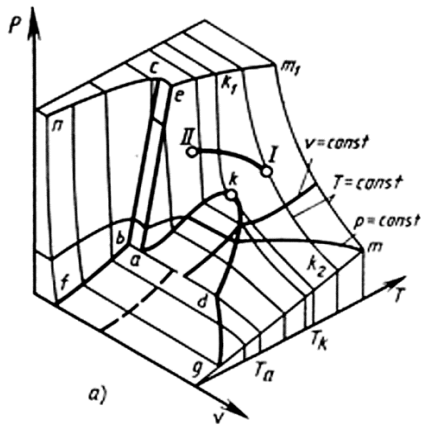


Рис.1.4.2. Поверхность p - v - T состояний вещества с уменьшением объёма при затвердевании

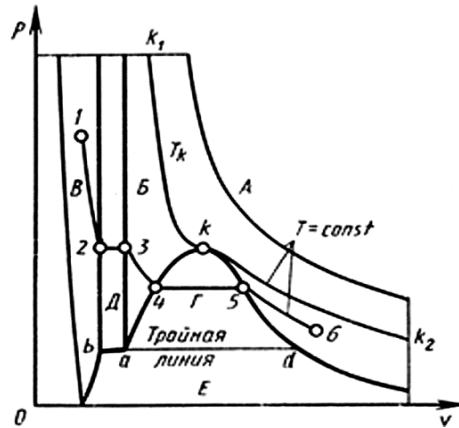


Рис. 1.4.3. Проекция изотерм в координатах v - p с уменьшением объёма при затвердевании

Некоторые однокомпонентные реальные вещества при переходе из жидкого состояния в твёрдую фазу могут увеличивать свой объём (вода, кремний, чугун, висмут и др.).

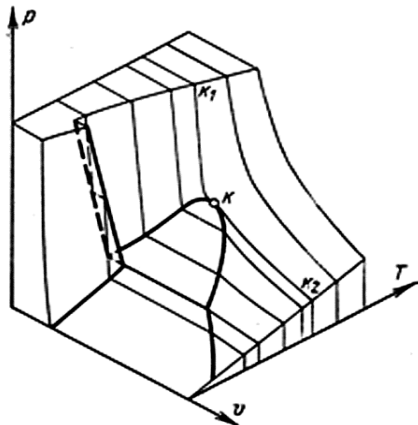


Рис.1.4.4 а) Поверхность p - v - T состояний вещества с увеличением объёма при затвердевании

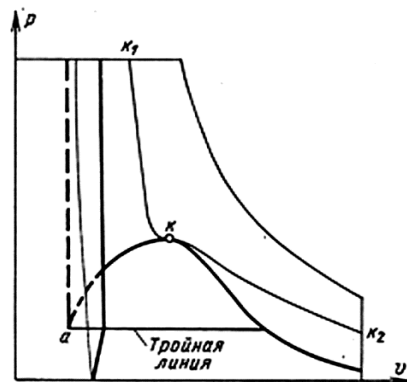


Рис. 1.4.4 б) Проекция изотерм в координатах v - p для вещества с увеличением объёма при затвердевании

На рис. 1.4.4 а) приведен аналогичный качественный пример поверхности p - v - T для вещества, у которого при затвердевании объём увеличивается. На рис. 1.4.4 б) показаны проекции изотерм для такого газа на плоскость v - p , построенные на основе сечения поверхности p - v - T .

На рис. 1.4.5 в системе координат s - T показана диаграмма возможных состояний реального рабочего тела. На ней выделены две характерные точки: тройная точка A , в которой вещество находится одновременно в трёх фазах – твёрдой, жидкой, газообразной и критическая точка K , в которой нет различий между жидким и газообразным состоянием вещества. В критической точке K плотность жидкости и насыщенного пара одинаковы, поверхностное натяжение отсутствует, пропадает граница раздела фаз. Состояние вещества, у которого давление и температура превышают критические значения, называется сверхкритической жидкостью.



Рис. 1.4.5. Диаграмма состояний вещества в диаграмме s - T

Слева от линии F - G вещество находится в твёрдой фазе – область V диаграммы. В зоне IV , G - J - A - E вещество находится в двухфазном состоянии твёрдое + жидкое, происходит плавление вещества. В зоне III , E - A - K - E вещество находится в жидком состоянии. На линии A - K , называемой нижней пограничной кривой, происходит кипение жидкости. Линия K - C называется верхней пограничной кривой, она является границей между двухфазной средой (жидкость + пар) и перегретым паром. В области II , заключённой между нижней и верхней пограничными кривыми, A - K - C -

A , вещество находится в двухфазном состоянии (жидкость + пар). В области I , выше линии K - C - D , реальное вещество находится в состоянии перегретого пара. При температурах ниже температуры тройной точки A вещество находится в двухфазном состоянии (насыщенный пар + твёрдое тело), – область VI , ограниченная линией F - J - A - C - D .

В технике широко применяются пары различных веществ, например, воды, фреонов, аммиака, углекислого газа, сернистого ангидрида и т.д. В энергетике наибольшее применение находят вода и водяной пар, применяемые в паротурбинных установках, системах отопления, многочисленном теплотехническом оборудовании. В холодильной технике и в криогенных технологиях используются разнообразные вещества с низкими температурами кипения, фреоны, аммиак, некоторые углеводородные соединения, кислород, азот и т.д. В первую очередь в тепловых машинах и в холодильной технике на практике важно использовать рабочие тела в состояниях жидкости и пара [2-5].

Для понимания свойств реальных веществ и для дальнейшего использования в книге, приведём основные диаграммы состояния для воды и водяного пара и, например, для фреона марки $R-134a$, которые широко применяются на практике.

Внимание, следует знать:

в двухфазной области влажного пара линии изобар и изотерм для простых веществ совпадают, у смесей, состоящих из различных веществ, они могут не совпадать.

Для воды и водяного пара представлены диаграммы: на рис. 1.4.6 диаграмма v – p ; на рис. 1.4.7 диаграмма s - T ; на рис. 1.4.8 и 1.4.9 диаграмма s - h . На поле диаграмм нанесены изохоры $v = \text{const}$, изобары $p = \text{const}$, изотермы $T = \text{const}$, степени сухости пара $x = \text{const}$. Степень сухости пара определяется из соотношения:

$$x = (v_x - v') / (v'' - v'), \quad (1.23)$$

где символ «'» относится к параметрам кипящей воды на нижней пограничной кривой на которой $x = 0$; символ «''» относится к параметрам пара на верхней пограничной кривой, где $x = 1$; подстрочный символ «х» относится к параметрам влажного пара, который находится в двухфазном состоянии жидкость + пар.

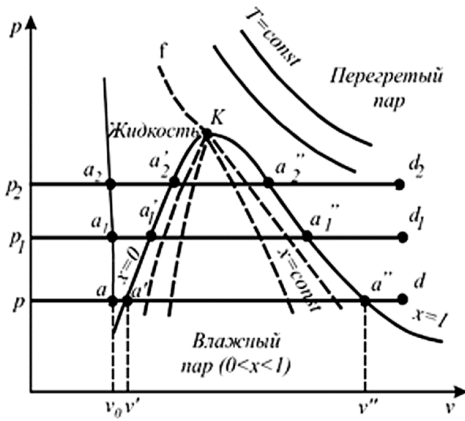


Рис. 1.4.6. Диаграмма v-p для воды и водяного пара

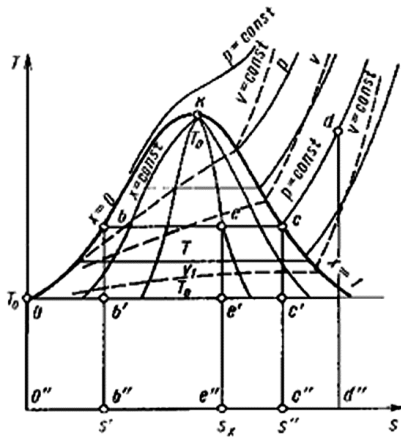


Рис.1.4.7. Диаграмма s-T для воды и водяного пара

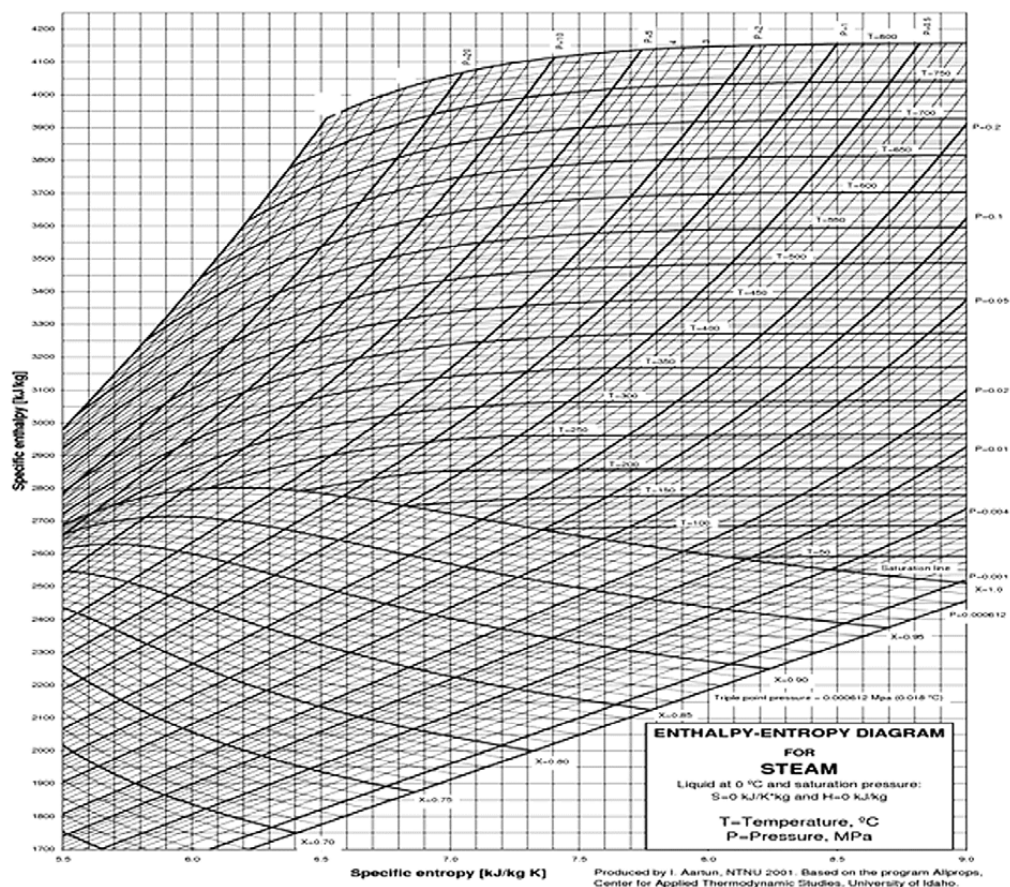


Рис. 1.4.8. Участок диаграммы s-h для воды и водяного пара

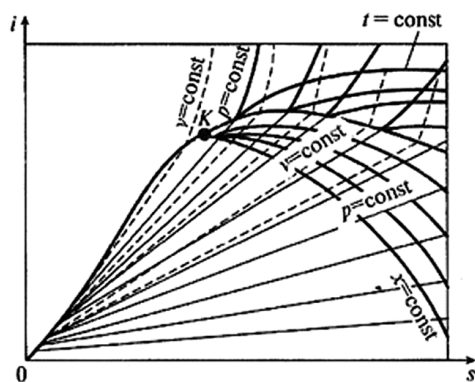


Рис. 1.4.9. Схема диаграммы энтропия-энтальпия для воды и водяного пара

Использование диаграммы s-T для графического определения количества теплоты в каком-либо процессе сложно, т.к. требуется находить площадь, заключённую под линией процесса и отрезками на оси абсцисс. Значительно проще и удобнее для этих целей воспользоваться диаграммой s-h. В частности, в теплотехническом оборудовании подвод/отвод теплоты производят при постоянном давлении. Удельная теплота при этом определяется графически отрезком разности энтальпий в конце и начале процесса, т.е. $q_{1-2} = h_2 - h_1$. Например, удельная механическая работа в обратимом адиабатном процессе

1-2 определяется в виде: $h_{1-2} = h_1 - h_2$. Дросселирование рабочего тела происходит при постоянной энтальпии, потери работоспособности рабочего тела при дросселировании в процессе 1-2 просто определяются отрезком $\Delta s = s_2 - s_1$ в диаграмме s - h .

Параметры критической точки воды: $p_k = 22,129$ МПа (225,65 ата); $t_k = 374,14$ °С; $v_k = 0,00326$ м³/кг.

Параметры тройной точки воды: $p_0 = 611$ Па; $t_0 = 0,01$ °С; $v_0 = 0,001$ м³/кг.

В настоящее время для технических расчётов с использованием компьютеров и вычислительной техники, широко применяют s - h диаграммы, представленные в электронном виде. Они удобны для использования на практике.

В холодильной технике используется множество разнообразных рабочих тел, в зависимости от требований и условий к созданию холодильных машин. Например, аммиак, хладоны типа R14, R22, R134a ..., углекислый газ, пропан, смеси фреонов и т.д. Физико-химические свойства рабочих тел можно найти в справочной литературе. Выбор рабочего тела во многом предопределяет механические, технико-экономические и эксплуатационные характеристики холодильных машин. Подробнее эти вопросы обсуждаются в главе 10 книги. Диаграммы состояния рабочих тел, применяемых на практике, отличаются большим разнообразием по численным значениям основных термодинамических параметров, форме и виду нижней и верхней пограничных кривых. На рис. 1.4.10, в качестве примера, приведена, удобная для использования, диаграмма состояния фреона R134a в системе координат h - $\lg p$, с нанесёнными линиями изопроцессов. На практике, кроме использования графических диаграмм, часто выполняют расчёты с применением цифровой вычислительной техники, по программам, где свойства такого рода веществ, представлены в электронном виде.

Фазовые диаграммы состояния многокомпонентных смесей отличаются сложностью и не похожи на диаграммы для однокомпонентных веществ. Свойства многокомпонентных смесей зависят от концентрации каждого компонента в составе смеси. Подробнее об этом можно узнать в специальной литературе, в книге указанный вопрос не обсуждается.

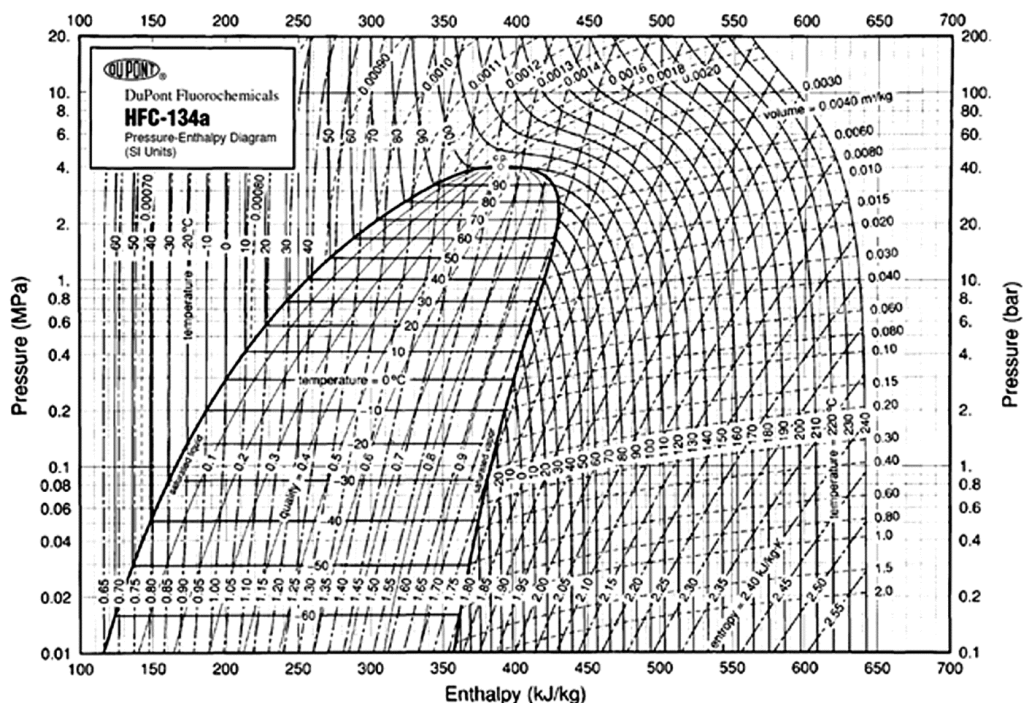


Рис. 1.4.10. Фазовая диаграмма h-lgr для фреона R134a

1.5 Циклы тепловых машин и холодильных установок.

Для работы энергетических установок и холодильных установок необходимо наличие рабочего тела и двух (как минимум) тепловых источников – с высокой и низкой температурой. Получение непрерывной длительной работы возможно, когда рабочее тело, выполнив необходимые процессы, возвращается в исходное состояние. Таким образом, получается некий замкнутый процесс, состоящий из совокупности отдельных процессов, в результате совершения которых в последнем процессе рабочее тело приводится в исходное состояние. Такой суммарный замкнутый процесс называют циклом.

Различают прямые и обратные циклы [2-5]. По прямым циклам работают все тепловые двигатели. По обратным циклам работают все холодильные установки. В результате выполнения прямого цикла получается полезная работа двигателя. Для осуществления обратного цикла необходимо затрачивать дополнительную энергию из внешней среды, в виде теплоты или механической работы. В прямых циклах процессы протекают в направлении по часовой стрелке, если рассматривать графические изображения циклов, а в обратных циклах – против часовой стрелки.

Если процессы, образующие цикл, являются обратимыми (т.е. идеальные, происходящие без потерь энергии), то цикл называют обратимым. В природе не существует обратимых процессов и циклов. Тем не менее, в теплотехнике и в данном материале рассматриваются идеализированные обратимые циклы, что позволяет упростить задачу

анализа циклов. В реальности, в тепловых машинах и холодильных установках, существуют потери энергии, и циклы таких установок являются необратимыми. Вопросы потерь энергии в реальных установках, степени необратимости циклов различных действующих установок будут рассматриваться в главах 2 – 11 книги.

На рис. 1.5.1 приведена принципиальная схема работы любого теплового двигателя, а также схема для работы любой холодильной установки.

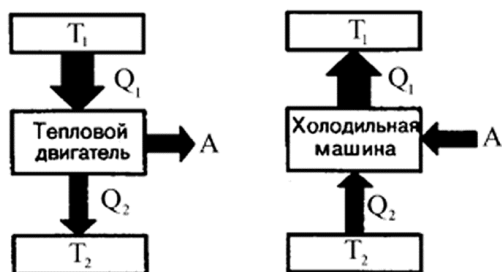


Рис. 1.5.1. Принципиальные схемы теплового двигателя и холодильной машины

Н.Л.С. Карно установил (1824 г.), что для работы теплового двигателя необходимо иметь высокотемпературный источник теплоты (ВИТ) с высокой температурой T_1 , от которого можно взять теплоту в количестве Q_1 и часть теплоты преобразовать в работу L (на рис. 1.5.1 использован символ A). Однако, полностью теплоту Q_1 преобразовать в работу невозможно, поэтому часть теплоты Q_2 должна быть отдана низкотемпературному источнику теплоты (НИТ) с температурой T_2 . Только в таких условиях возможна

работа теплового двигателя.

Работа холодильной машины связана с передачей теплоты от НИТ с температурой T_2 к ВИТ с температурой T_1 . Такой процесс является не естественным, чтобы его совершить требуется затратить дополнительную работу L (A) из внешней среды, или теплоту, эквивалентную L . Только в таком случае возможна передача теплоты Q_2 от НИТ к ВИТ.

Для оценок эффективности прямых циклов используют понятие термический коэффициент полезного действия (КПД) цикла, обозначаемый символом η_t . Выражение для определения термического КПД прямого цикла имеет вид:

$$\eta_t = q_{\text{пол}} / q_1 = 1 - (q_2 / q_1). \quad (1.24)$$

Т.е. термический КПД прямого цикла есть отношение полезно использованной удельной теплоты $q_{\text{пол}}$ ко всей подведенной удельной теплоте в цикле q_1 . Уравнение энергетического баланса: $q_1 = 1 + |q_2|$. Теплота $|q_2|$ взята по модулю, т.к. она считается отрицательной, отводится от рабочего тела в окружающую среду.

В прямых циклах тепловых машин всегда $\eta_t < 1$.

Максимальным теоретическим термическим КПД обладает прямой цикл Карно, для диапазона температур ВИТ и НИТ от T_1 до T_2 , составленный из двух изотерм и двух адиабат, см. рис. 1.5.2.

Можно показать, что для него термический КПД цикла имеет вид:

$$\eta_t = 1 - (T_2 / T_1), \quad (1.25)$$

т.е. η_t определяется только соотношением абсолютных температур у ВИТ и НИТ. При увеличении интервала температур T_1 и T_2 термический КПД цикла возрастает, и наоборот, при его уменьшении – снижается.

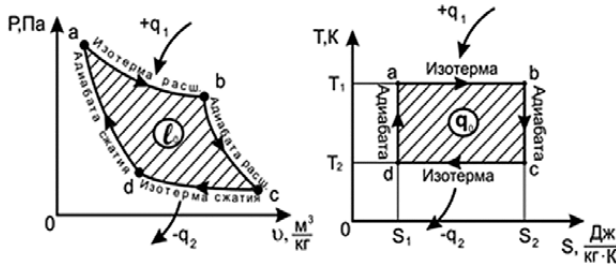


Рис. 1.5.2. Изображение прямого цикла Карно в диаграммах v - p и s - T

Для оценок эффективности холодильных машин вводят понятие холодильного коэффициента ϵ , который представляют в виде:

$$\epsilon = q_2 / l. \quad (1.26)$$

Холодильный коэффициент показывает, какая удельная теплота q_2 отводится от охлаждаемого тела на единицу затрачиваемой удельной работы l . Холодильный коэффициент обратного цикла всегда больше

единицы, чем больше ϵ , тем выше экономичность цикла холодильной машины. Уравнение теплового баланса для холодильной машины имеет вид: $q_2 + |l| = |q_1|$.

Максимальным холодильным коэффициентом обладает обратный цикл Карно для диапазона температур НИТ и ВИТ от T_2 до T_1 , составленный из двух изотерм и двух адиабат, см. рис. 1.5.3.

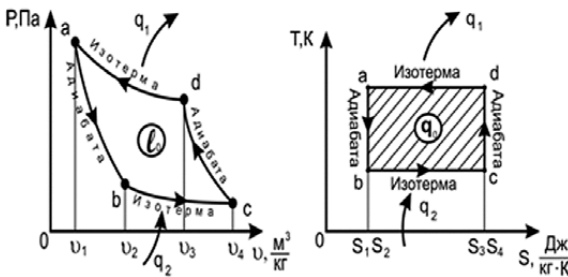


Рис. 1.5.3. Изображение обратного цикла Карно в диаграммах v - p и s - T

Можно показать, что для него холодильный коэффициент цикла определяется в виде:

$$\epsilon = T_2 / (T_1 - T_2). \quad (1.27)$$

С уменьшением интервала температур T_2 и T_1 , холодильный коэффициент увеличивается, и наоборот, с увеличением этого интервала ϵ снижается. Классификация холодильных машин представлена на рис. 1.5.4. Детально работа холодильной техники рассмотрена в главе 10.

Вариант классификации тепловых двигателей представлен на рис. 1.5.5.



Рис. 1.5.4. Классификация холодильных машин

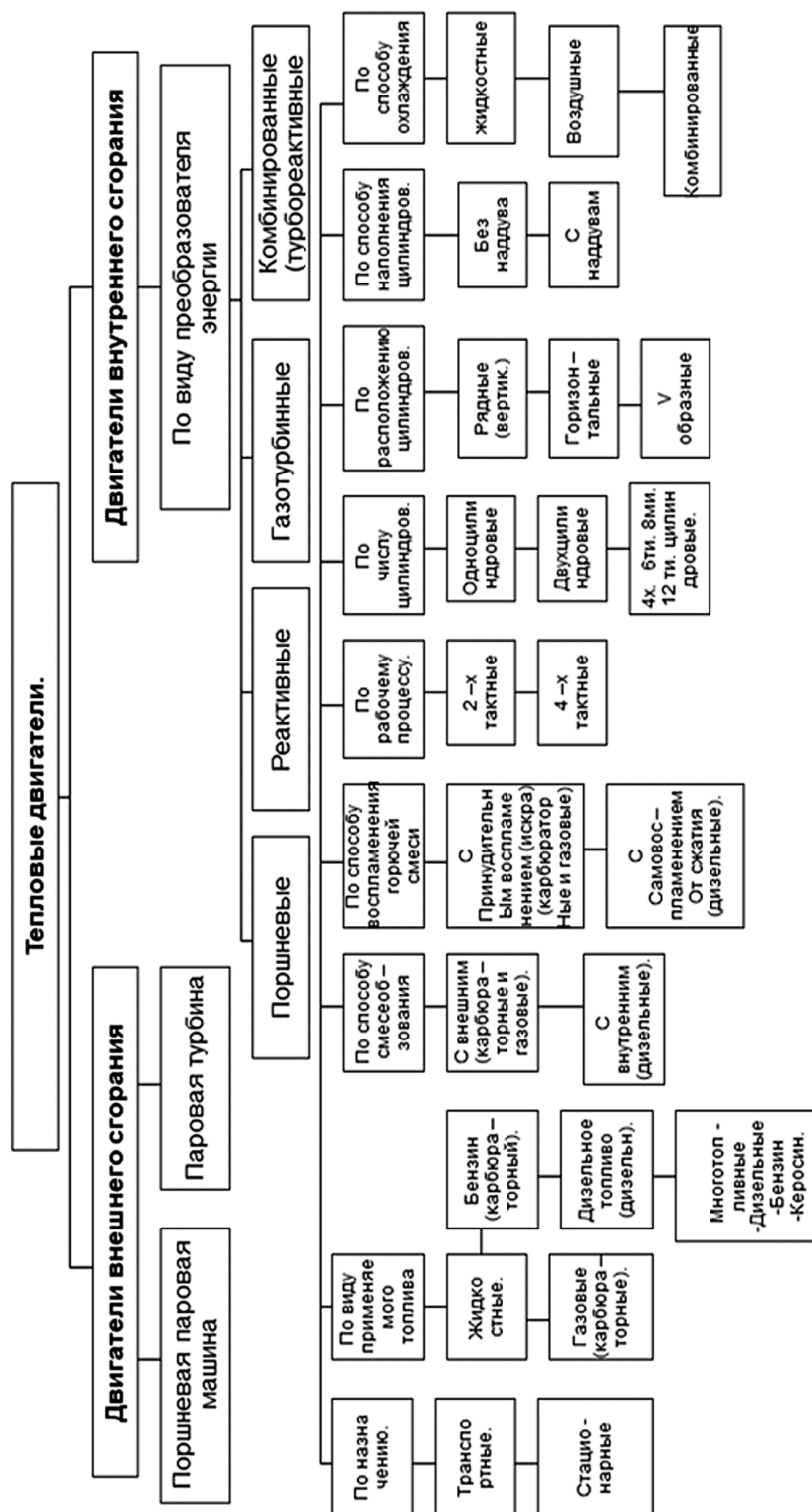


Рис. 1.5.5. Классификация тепловых двигателей

Во всех тепловых двигателях происходят следующие основные процессы. Связанная в веществе внутренняя химическая энергия высвобождается в ходе химических реакций и превращается в тепловую энергию рабочего тела. Затем тепловая энергия рабочего тела превращается в механическую работу при расширении рабочего тела, используемую для привода в действие внешних объектов. В реактивных двигателях тепловая энергия рабочего тела превращается в кинетическую энергию струи рабочего тела, используемой для создания реактивной тяги.

1.6 Органическое и ядерное топливо для энергетических установок.

В большинстве, практически важных, первичных источников энергии для получения теплоты является топливо. Издавна люди получали тепловую энергию при сжигании дров, торфа, угля. Первые паровые машины работали на паре, получаемом при сжигании древесины, угля. Всего полтора века назад люди считали нефть грязью, а сегодня она стала «чёрным золотом». В современной энергетике используются различные виды органического топлива, ядерного топлива. Они, в подавляющем большинстве, относятся к невозобновляемым энергетическим ресурсам, т.е. могут быть использованы только один раз и больше их не будет. К органическим топливам относятся: каменный и бурый уголь, нефть, горючие сланцы, природный газ, торф, древесина. Они существуют в твёрдом, жидком, газообразном состоянии и обладают запасённой, химически связанной внутренней энергией. Эта энергия в угле, нефти, газе накопилась в результате различных геологических процессов и преобразований на планете Земля в течение миллионов лет. Органическое топливо образуется и в настоящее время, но его прирост ничтожно мал, исключением являются древесина, травянистые растения, биотопливо.

Пытливый читатель может задать вопрос – а откуда же берётся энергия при сжигании органического топлива? (Мы игнорируем древние теории с флогистоном, теплородом.)

Даём ответ.

При химических реакциях происходит изменение химического состава веществ. В ходе реакции исходные вещества (реагенты) вступают во взаимодействие и превращаются в различные химические продукты. При этом изменяются свойства веществ, и они даже могут стать другими веществами, происходит перегруппировка положения и состояния атомов. Химические реакции могут происходить с выделением теплоты (экзотермические), либо с поглощением теплоты из внешней среды (эндотермические) [1].

Ценность органических топлив связана с наличием в них горючих компонентов углерода и водорода, находящихся в химически связанном состоянии. Главное - если происходит реакция окисления кислородом (например, содержащимся в атмосферном воздухе) горючих компонентов - углерода и водорода, содержащихся в топливе, то в результате высвобождается тепловая энергия. Это пример экзотермической реакции. Необходимые условия для окисления горючих компонентов органических топлив (сжигания) создаются сравнительно простыми техническими средствами - топки, камеры сгорания и т.д. Получаемая при сжигании топлива тепловая энергия, может использоваться напрямую потребителем, либо, с использованием рабочих тел, для выработки механической работы в различных двигателях, для создания реактивной тяги в разнообразных авиационных и ракетных двигателях.

Возможности преобразования энергии значительно расширились, благодаря изобретениям выдающегося сербского инженера и физика Никола Тесла, - генератора переменного тока, электродвигателя, трансформатора. Его идеи и разработки составляют основу огромного количества разнообразных электротехнических энергетических систем в современной цивилизации.

В космической технике применяются, в ряде случаев, специальные синтезированные топлива и окислители, а также порошковые металлизированные топлива - в некоторых видах твёрдотопливных ракетных двигателей.

Обычно исходное органическое топливо предварительно подготавливают для обеспечения его последующего эффективного сжигания. Это зависит от конкретного состояния добытого топлива, концентрации горючих компонентов и балластных включений, вида энергетической установки и т.д.

Отличительной чертой органических топлив является их относительно невысокий энергетический потенциал при проведении экзотермической реакции окисления, или т.н. теплота сгорания. В технике используют понятие удельной теплоты сгорания топлива массой 1 кг, или для газа объёмом 1 м³ при нормальных физических условиях. Приведём для примера, удельную теплоту сгорания некоторых добываемых органических топлив [3], МДж/кг: метан ≈ 50 ; нефть $\approx 43...46$; антрацит ≈ 35 ; древесина, дуб ≈ 20 .

В начале XX века физики и химики ведущих стран мира интенсивно занимались фундаментальными исследованиями строения атома, атомных ядер, элементарных частиц. Уже на начальных этапах исследований стало ясно, что нуклоны в ядрах атомов связаны большими по величине внутриядерными силами, т.н. «сильное взаимодействие». Возникло понимание возможности получения колоссальной энергии, если удастся высвободить из ядер атомов эту внутриядерную энергию [1]. Были найдены изотопы элементов с большими атомными массами, у которых ослаблены силы взаимодействия между нуклонами в ядрах атомов. В первую очередь – это изотопы урана ^{235}U , ^{233}U , плутоний ^{239}Pu и др. Были найдены условия, при которых можно осуществить цепную реакцию деления ядер, необходимые концентрации и критические массы ядерного топлива. Первый патент на атомную бомбу был получен французским учёным Фредериком Жолио-Кюри в 1939 г.

Впервые неуправляемую реакцию деления ядер уранового топлива при испытаниях атомной бомбы осуществили учёные США 16.07.1945 г. Осенью 1945 г. американцы сбросили две атомных бомбы на города Хиросима и Нагасаки в Японии. Одна бомба была выполнена на использовании изотопа ^{235}U , а вторая – на плутонии ^{239}Pu . Разрушительная сила атомного оружия была беспрецедентной, колоссальной, погибли сразу сотни тысяч людей. Начиная с 50-х годов XX века, началась гонка атомных вооружений в США, СССР и других отдельных государствах.

Первую в мире управляемую цепную реакцию деления ядер урана осуществил Энрико Ферми в конце 1942 г., создав реактор малой мощности в Чикагском университете, США [6]. В 1954 г. в СССР, в г. Обнинск, впервые в мире была создана и введена в эксплуатацию опытно-промышленная атомная электростанция мощностью 5 МВт. С этого момента в мире наступила новая эпоха промышленного использования энергии ядерного топлива. Первичным источником ядерного топлива служит редкий изотоп урана ^{235}U , концентрация которого в исходной урановой руде мала и составляет $\approx 0,71\%$. В основной руде содержится изотоп урана ^{238}U , ядра атомов которого подвержены делению с большими трудностями.