

Гојак М.
Тодоровић Р.
Рудоња Н.

ТЕРМОДИНАМИКА



Гојак Д. Милан
Тодоровић И. Ружица
Рудоња Р. Неџад



Универзитет у Београду
Машински факултет



Милан Д. Гојак
Ружица И. Тодоровић
Неџад Р. Рудоња

ТЕРМОДИНАМИКА

Милан Д. Гојак, Ружица И. Тодоровић, Нецад Р. Рудоња

ТЕРМОДИНАМИКА

I издање

Рецензенти:

Проф. др Милан В. Петровић

Проф. др Франц Ф. Коси

В. проф. др Милован Н. Живковић

Издавач:

Универзитет у Београду – Машински факултет

Краљице Марије 16, 11120 Београд

тел. (+381-11) 3370-760, факс (+381-11) 3370-364

За издавача:

Декан, др Владимир Поповић, ред. проф.

Уредник:

Др Милан Лечић, ред. проф.

Председник комисије за издавачку делатност Машинског факултета у Београду

Одобрено за штампу:

Одлуком Декана Машинског факултета бр. 20/2024 од 3. 7. 2024. године.

Штампа и повез:

„Planeta Print”, Игора Васиљева 33р, 11000 Београд

Тираж:

600 примерака

Београд, 2024. године

ISBN-978-86-6060-196-6

© Забрањено прештампавање и фотокопирање. Сва права задржавају издавач и аутори.

Предговор

Са интензивним технолошким развојем човечанства растао је и значај доступности енергије. Искуство говори да између коришћења енергије и економске развијености друштва постоји изражена повезаност. Зато је разумевање различитих аспеката коришћења енергије, чиме се термодинамика и бави, од велике важности и за будући развој.

Термодинамика је, могуће је рећи, класична наука и постоји много добрих књига из ове области. Иако математички није компликована она није лака за учење, јер постоји сложена испреплетеност између основних законитости термодинамике и физичких својстава материја које учествују у процесима трансформација и коришћења енергије.

Дугогодишње искуство у настави омогућило је ауторима ове књиге увид у тешкоће студената при савладавању градива и дало мотив да покушају да садржај термодинамике изложе на начин што прикладнији за усвајање, али истовремено задржавајући потребан ниво излагања. Осим јасноће и недвосмислености самог текста, аутори књиге мисле да су прецизно дефинисање коришћених појмова и организација, редослед излагања, важни за боље разумевање изложеног градива.

Књига обухвата градиво које се студентима предаје из предмета Термодинамика Б на Основним академским студијама на Машинском факултету Универзитета у Београду, али може корисно послужити и студентима других факултета, као и свима онима којима су потребна знања из ове области. На Мастер академским студијама на Машинском факултету постоји више „енергетских“ усмерења, на којима се више предмета заснива на областима које изучава термодинамика, па је важно да „темељ“ на којем се даље „зидају“ та нова знања буде чврст. Зато су аутори настојали да објашњења буду заснована на физикалности изучаваних појава, а тамо где је процењено да треба, као додатак основног текста дата су и додатна разјашњења и информације у виду посебних уоквирених делова текста.

У књизи су приказане и кратке научне биографије најзначајнијих светских термодинамичара. Сматрамо да то није важно само са становишта упознавања читалаца са историјским развојем термодинамике као науке, већ истовремено доприноси и бољем сагледавању саме материје изложене у књизи.

Велика пажња посвећена је и визуелном изгледу књиге, јасноћи слика и дијаграма, прегледности текста, типографији, другим речима – техничкој обради књиге. Верујемо да ће и то допринети повољнијем утиску читалаца.

Овде ћемо поменути да се у Србији у области машинства термодинамика изучава од 1897. године, најпре у оквирима Велике школе, касније на Техничком факултету, па онда на Машинском факултету Универзитета у Београду, а затим и на другим факултетима. Из ове области до данас на српском језику је објављено више књига, а овде наводимо само оне које су везане за машинство и Београд, а то су: први штампани материјал на српском језику - скрипта *Механичка теорија топологије* (Стеван Марковић, професор Велике школе, 1897), први уџбеник на српском језику *Техничка термодинамика* (Александар Брандт, професор Техничког факултета Универзитета у Београду, 1925), уџбеник *Техничка термодинамика* (Георгије Пио-Уљски, професор Техничког факул-

тета Универзитета у Београду, 1934), уџбеник *Наука о термологији* (Милан Јовановић, професор Машинског факултета, 1949), скрипта *Наука о термологији* (Јован Шел, професор Машинског факултета, 1956), уџбеник *Термодинамика* (Добросав Милинчић и Димитрије Вороњец, професори Машинског факултета, 1988) и уџбеник *Термодинамика - инжењерски аспекти* (Ђорђе Козић, професор Машинског факултета, 2019). Аутори ове књиге се надају да овај текст који је пред читаоцима неће изневерити високе критеријуме успостављене од стране наших претходника.

Велику захвалност дугујемо рецензентима проф. др Милану Петровићу, проф. др Францу Косију и проф. др Миловану Живковићу на пажљивом исчитавању материјала, на отвореним дискусијама и бројним корисним саветима и сугестијама. Све то допринело је квалитету текста, јасноћи коришћених појмова, другим речима – да књига буде боља.

Аутори ће бити захвални сваком читаоцу на сугестијама и предлозима за побољшање садржаја и текста књиге.

У Београду, 2024. год.

Аутори

Садржај

1	Увод	1
1.1	Увод у термодинамику	1
	Области примене	5
	Термодинамичке методе	7
	Гране термодинамике	8
1.2	Увод у основне концепте термодинамике	9
1.2.1	Енергија	9
1.2.2	Термодинамички систем	10
	Врсте термодинамичких система	12
	О грађи материје	14
1.2.3	Стање и термодинамичка равнотежа система	14
1.2.4	Промена стања система	16
	Промена величина стања при термодинамичком процесу	17
1.2.5	Међудејства термодинамичког система и околине	18
	Величине процеса – елементарна и укупна вредност	19
	Поређење величина стања и величина процеса	20
1.3	Величине у термодинамици	21
2	Величине стања термодинамичког система	23
2.1	Увод	23
2.1.1	Маса и количина материје	23
2.1.2	Термичке величине стања	24
	Поделе термичких величина стања	25
2.2	Основне термичке величине стања	27
2.2.1	Притисак	27
	Мерење притиска	30
2.2.2	Температура. Нулти закон термодинамике	31
	Нулти закон термодинамике	33
	Температурне скале	34
	Мерење температуре	37
2.2.3	Запремина	39
2.3	Енергијске величине стања	40
	Енергија система	40
2.3.1	Унутрашња енергија	40
2.3.2	Енталпија	43
2.3.3	Ентропија	44
3	Спољашњи утицаји на термодинамички систем	45
3.1	Рад	46
3.1.1	Механичке форме радова	46

Запремински рад	47
Рад подизања и рад убрзања система	51
Рад вратила	52
3.1.2 Немеханичке врсте радова	54
Електрични рад	54
3.1.3 Општи израз за рад	56
3.2 Топлота	57
Ентропија и $T-S$ дијаграм	59
3.3 Преношење енергије материјом	62
 4 Први закон термодинамике	 65
4.1 Закон о одржању масе	67
4.2 Општи облик Првог закона термодинамике	69
Биланс енергије	69
Правило знакова	71
4.3 Први закон термодинамике за затворени систем	72
Примери примене I закона термодинамике на прост термодинамички систем	74
4.4 Први закон термодинамике за отворени систем	76
4.4.1 Рад потискивања	78
4.4.2 Технички рад	79
4.4.3 Израз Првог закона термодинамике за отворени систем	80
4.4.4 Отворени систем при стационарним условима	81
Технички рад при стационарним условима	82
Примери примене I закона термодинамике за стационарне услове	84
Резиме – Први закон термодинамике	90
 5 Топлотни капацитет	 93
 6 Термодинамичке карактеристике радне материје	 101
Једначина стања	101
Термичка једначина стања једнокомпонентне материје	103
Енергијске једначине стања једнокомпонентне материје	103
6.1 Реалне једнокомпонентне материје	104
6.1.1 Општи облик $p-v-T$ површи једнокомпонентних материја	105
6.1.2 Фазни преласци	107
Дијаграм фазних стања ($p-T$ дијаграм)	107
Фазни преласци између течне и парне фазе	112
Доња и горња гранична крива	115
Степен сувоће и величине стања влажне паре	116
6.1.3 Дијаграми стања једнокомпонентних материја	119
6.1.4 Табеле величина стања	122
6.1.5 Основне промене стања једнокомпонентних материја	124
Изохорска промена стања	126
Изобарска промена стања	127
Изотермска промена стања	128
Топлота промене фазе	129
Изентропска промена стања	131
6.1.6 Термодинамичке релације	132
Енергијске једначине стања једнокомпонентне материје	132

Промена унутрашње енергије	132
Промена енталпије	134
Промена ентропије	137
Термички коефицијенти	139
Мајерова једначина	140
6.2 Чврста тела и течности	143
Промена унутрашње енергије и енталпије	143
Промена ентропије чврстих тела и течности	145
6.3 Идеалан гас	146
6.3.1 Термичка једначина стања идеалног гаса	146
Извођење једначине стања идеалног гаса из емпиријских гасних закона	147
Извођење једначине стања идеалног гаса аналитичким поступком	149
Различити облици писања једначине стања идеалног гаса	152
$p-v-T$ површ идеалног гаса	153
Авогадров закон	154
6.3.2 Топлотни капацитети идеалних гасова	155
6.3.3 Енергијске једначине стања идеалног гаса	157
Промена унутрашње енергије и енталпије	157
Промена ентропије идеалног гаса	160
6.3.4 Полуидеалан гас	162
6.3.5 Промене стања идеалних гасова	164
Основне промене стања идеалних гасова	165
Изохорска промена стања	165
Изобарска промена стања	167
Изотермска промена стања	169
Изентропска промена стања	171
Политропске промене стања идеалног гаса	174
Општа једначина политропских промена стања	174
Зависност c_n од експонента политропске промене стања	177
Графичко приказивање политропских промена стања	178
Изрази за q_{1-2} , $w_{v,1-2}$ и $w_{t,1-2}$ за политропске промене стања	180
6.4 Смеше идеалних гасова	183
6.4.1 Модели смеше идеалних гасова	183
Далтонов модел смеше идеалних гасова	184
Амагатов модел смеше идеалних гасова	185
6.4.2 Састав смеше гасова	186
Масени удели компонената у смешама	187
Молски удели компонената у смешама	187
Запремински удели компонената у смешама	188
Везе између различитих удела компонената у смешама	189
Моларна маса и гасна константа смеше	190
6.4.3 Одређивање U , H , S , c_p и c_v смеше	191
Унутрашња енергија, енталпија и ентропија смеше	191
Специфични и моларни топлотни капацитети смеше	192
Енергијске једначине стања смеше	195
6.4.4 Процеси мешања гасова	197
Мешање гасова у затвореном систему	197
Мешање гасова у отвореном систему при стационарним условима	200
Мешање гасова при пуњењу резервоара	202
Резиме – Термодинамичке карактеристике једнокомпонентних материја	205

7	Други закон термодинамике	207
7.1	Увод у Други закон термодинамике	208
	О смеру процеса	208
	О квалитету енергије	210
	О могућности добијања рада	211
7.2	Кружни процеси, топлотне машине	213
7.2.1	Деснокретни кружни процеси – топлотни мотори	213
	О неопходности одвођења топлоте	215
	Термички степен корисности кружног процеса	216
	Топлотни извор и топлотни понор	216
	Келвин-Планков исказ Другог закона термодинамике	217
7.2.2	Левокретни кружни процеси – расхладне машине и топлотне пумпе	218
	Коефицијент хлађења	219
	Коефицијент грејања	220
	Клаузијусов исказ Другог закона термодинамике	220
7.2.3	Повратни и неповратни процеси	221
	Узроци неповратности процеса	222
	Трење	222
	Неквазистатичко сабијање и ширење	223
	Предаја топлоте при коначној разлици температура	224
	Унутрашња и спољашња неповратност	225
7.2.4	Карноов кружни процес	226
	Карноов деснокретни кружни процес	226
	Термички степен корисности Карноовог кружног процеса	229
	Карноов левокретни кружни процес	232
	Коефицијент хлађења и коефицијент грејања Карноовог кружног процеса	233
7.3	Апсолутна термодинамичка температура	235
7.4	Концепт ентропије	237
7.4.1	Клаузијусов интеграл за повратне и неповратне кружне процесе	237
7.4.2	Ентропија, промена ентропије у повратним и неповратним процесима	239
7.4.3	Карноов кружни процес у $T-S$ дијаграму	243
7.4.4	Биланс ентропије	245
	Биланс ентропије за затворени систем	245
	Биланс ентропије за отворени систем	246
7.5	Принцип повећања ентропије – аналитичка формулација Другог закона термодинамике	247
7.5.1	Принцип повећања ентропије – затворени термодинамички систем	249
7.5.2	Принцип повећања ентропије – отворени термодинамички систем	251
7.5.3	Принцип повећања ентропије – примери	252
	Предаја топлоте при коначној разлици температура	252
	Мешање гасова	255
	Неквазистатичка промена стања	256
7.5.4	Деградација енергије и губитак радне способности	261
	Резиме – Принцип повећања ентропије	264
7.6	Статистичка интерпретација ентропије	265
	Микростање, макростање и термодинамичка вероватноћа	265
	Ентропија и термодинамичка вероватноћа	269
	Ентропија и неуређеност стања	272
7.7	Различите формулације Другог закона термодинамике	273

8	Циклуси топлотних мотора	277
8.1	Циклуси гасних мотора	279
	Карноов гасни циклус	279
8.1.1	Циклуси клипних мотора са унутрашњим сагоревањем	280
	Оттов циклус	281
	Дизелов циклус	286
	Поређење Оттовог и Дизеловог циклуса	291
8.1.2	Циклус гаснотурбинског мотора – Џулов циклус	293
8.2	Циклуси парних мотора	300
	Карноов парни циклус	300
8.2.1	Циклус парнотурбинског мотора – Ранкин-Клаузијусов циклус	301
	Биланс енергије за компоненте парнотурбинског постројења	307
9	Циклуси расхладних машина и топлотних пумпи	311
9.1	Циклуси гасних расхладних машина и топлотних пумпи	314
	Карноов гасни левокретни циклус	314
9.1.1	Циклус ваздушне расхладне машине	315
	Циклус ваздушне топлотне пумпе	320
	Циклус ваздушне машине отвореног тока	320
	Поређење Џуловог и Карноовог левокретног циклуса	321
9.2	Циклуси парних расхладних машина и топлотних пумпи	324
	Карноов парни циклус	324
9.2.1	Циклус парне расхладне машине са адијабатским пригушивањем и сувим усисавањем	326
	Циклус парне топлотне пумпе са адијабатским пригушивањем и сувим усисавањем	330
	Парни циклус са потхлађивањем кондензата	331
9.2.2	Избор расхладног флуида	334
10	Основе преношења топлоте	337
	Аналогија између топлотних и електричних појава	338
10.1	Провођење топлоте – кондукција	340
	Температурно поље. Градијент температуре	341
10.1.1	Фуријеов закон провођења топлоте	342
	Топлотна проводљивост материјала	343
10.1.2	Стационарно једнодимензионално провођење топлоте	346
	Провођење топлоте кроз раван зид	346
	Провођење топлоте кроз цилиндрични зид	351
	Провођење топлоте кроз сферични зид	354
10.2	Прелажење топлоте – конвекција	357
10.2.1	Њутнов закон прелажења топлоте	359
	Коефицијент прелажења топлоте	362
10.3	Пролажење топлоте	367
	Пролажење топлоте кроз раван зид	367
	Пролажење топлоте кроз цилиндрични зид	369
	Пролажење топлоте кроз сферични зид	370
10.4	Преношење топлоте зрачењем	372
10.4.1	Закони зрачења црног тела	373
	Планков закон зрачења	374

	Винов закон померања	375
	Стефан-Болцманов закон зрачења	375
10.4.2	Радијационе карактеристике материјала	376
	Емисивност	377
	Апсорпција, рефлексија и трансмисија зрачења	379
	Кирхофов закон	380
	Релације између апсорпције, емисије и рефлексије зрачења	382
10.4.3	Преношење енергије зрачењем између сивих површи	382
	Топлотни сјај површи	382
	Нето топлотни проток са или ка површи	383
	Нето топлотни проток између произвољних површи	385
	Зрачење између две сиве површи које обухватају простор	386
	Примери зрачења између сивих површи	387
10.5	Комбиновано преношење топлоте	389
	Литература	391

Увод

„Класична термодинамика је оштрија физичка теорија универзалног садржаја за коју сам убеђен да никада неће бити ојоврћнућа“.¹

1.1 Увод у термодинамику

Према грчкој легенди, по стварању света свако земаљско створење је од богова добило неки дар, брзину или снагу или храброст. Неке животиње добиле су крила да се вину у висине, друге су добиле канџе за одбрану, и тако даље. Коначно, када су на ред дошли људи, ништа није преостало. Прометеј је онда, према легенди, од бога Олимпа украо ватру и предао је људима. Они су тако добили веома вредан поклон, који их је начинио далеко моћнијим од било којег другог створења. Иако је ово мит, почетак развоја човечанства делимично се поклапа са почетком коришћења ватре. Људи су схватили моћ ватре, најпре за грејање и припрему хране, а касније и за топљење руда, производњу оружја и оруђа, чиме је отворен пут ка изградњи света каквог данас познајемо. Енергија коју осећамо када се налазимо у близини ватре називамо топлотом, а њена прецизнија дефиниција биће дата касније. Осим непосредног коришћења, топлота има и способност претварања у друге облике енергије, што лежи у основи каснијег развоја људске цивилизације.

Према доступним подацима, прву справу која је директно претварала топлоту у ротационо кретање направио је Херон Александријски² у 1. веку нове ере, а радило се о тзв. Хероновој кугли (слика 1.1). Овај уређај сматра се претечом парне машине.

¹Алберт Ајнштајн (1879-1955).

²Херон Александријски (10-75. год. нове ере) – грчки математичар и инжењер.

Откриће парне машине крајем 17. века³ имало је огроман утицај на технолошки развитак друштва, што је и довело до индустријске револуције у другој половини 18. века. Дакле, од првог покушаја да се направи справа која би користила топлоту и производила механичко кретање – рад, па до примене парне машине прошло је близу 2000 година.



Слика 1.1 Херонова кугла [1]

Парна машина донела је сасвим нове могућности у односу на ручну производњу, као и на до тада најчешће коришћене облике енергије за обављање рада, енергију ветра, воде и животиња. Парна машина је била фундаментално различита, енергију горива претварала је у топлоту, а топлоту затим у механичко кретање, у рад (слика 1.2). Интересовања за добијање рада из топлоте су током 18. и 19. века довела до развоја мотора са унутрашњим сагоревањем, термоенергетских система и других топлотних машина. Из потребе изучавања теоријских принципа рада топлотних машина и покушаја да се повећа њихова ефикасност, почетком 19. века термодинамика се издвојила у посебну научну дисциплину.

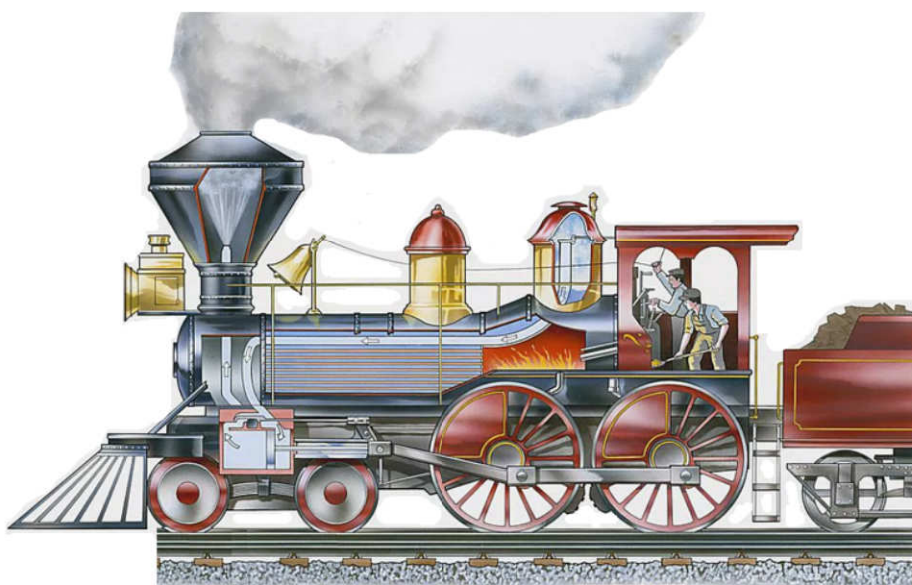
Француски физичар и инжењер Сади Карно је 1824. године изложио теорију о „погонској снази ватре“, то јесте општу теорију о претварању топлоте у рад, као и максималном степену корисности топлотног мотора. Његов рад се сматра фундаментом термодинамике као модерне науке, а за самог Карноа често се наводи да је „отац термодинамике“.

У развоју термодинамике требало је дуго времена да се схвати права природа топлоте и разлика између температуре и топлоте. Крајем 18. века, радовима Блека и других постигнуто је јасно схватање разлике између температуре и топлоте, али је природа топлоте остала и даље енигма. Владало је преовлађујуће мишљење да је топлота неуништиви флуид без тежине, боје и мириса, тзв. калорик, који се преноси између материјалних тела, на основу чега је и уведена јединица за топлоту – калорија.

Четрдесетих година деветнаестог века, од стране Мајера, Џула и других истраживача, утврђена је еквивалентност топлоте и механичког рада. Све то је довело до формулисања Закона о одржању енергије. Суштина Закона о одржању енергије, познатог под називом Први закон термодинамике, састоји се у томе да укупна енергија изолованог система има сталну вредност, једнозначна је функција стања система, док се трансформације енергије из једног облика у други врше по закону еквивалентности.

³Парну машину изумео је Дени Папен, а касније су је унапређивали Томас Савери, Томас Њукомен и Џејмс Ват.

На темељу радова Карноа, Мајера и Џула, Рудолф Клаузијус је 1850. године формулисао Први и Други закон термодинамике. Он је дао прву квантитативну формулацију Првог закона помоћу израза који повезује количину топлоте, обављени рад и промену унутрашње енергије термодинамичког система. При формулисању Другог закона термодинамике увео је нову величину стања – ентропију, која је задобила кључни значај у термодинамичкој теорији. Готово истовремено, независно од Клаузијуса, Вилијам Томсон (Лорд Келвин) дао је другачију формулацију Другог закона термодинамике. Показао је да осим квантитета, енергију карактерише и квалитет, који се током природних процеса смањује. На основу Карноових разматрања, односно према Другом закону термодинамике, Келвин је доказао постојање универзалне температурне скале, која не зависи од термодинамичких својстава материје. То је скала апсолутне термодинамичке температуре, која је данас позната и као Келвинова скала апсолутне температуре.



Слика 1.2 Парна локомотива [2]

Крајем 19. века термодинамика као наука постигла је висок ниво достигнућа. Томе је допринела тесна повезаност практичних и теоријских истраживања. Са тог становишта треба истаћи доприносе Ранкина (у области парних машина), Стирлига (ваздушни топлотни мотор, принцип регенерације топлоте), Отоа и Дизела (мотори са унутрашњим сагоревањем), као и многих других.

Увођење појма ентропије довело је до дубљег физичког схватања процеса и проширења основних термодинамичких принципа на сложене термодинамичке системе са различитим агрегатним стањима, на вишефазне системе, мешавине, на хемијске реакције, електрохемијске процесе итд. Гибс је крајем 19. века дефинисао правило фаза и у анализу увео учење о термодинамичким потенцијалима. Користећи статистичку интерпретацију ентропије по Болцману, Нерст је 1906. године дефинисао „топлотну теорему“, коју је касније разрадио Макс Планк, и која је проглашена Трећим законом термодинамике. Овај закон омогућава одређивање термодинамичке и хемијске равнотеже сложених система.

У историјском развоју термодинамике као науке, нека карактеристична достигнућа су:

- Први век нове ере: Херон Александријски је направио претечу парне машине,
- 1593. година: Галилеј је развио водени термометар,
- 1650. година: Ото фон Герике је демонстрирао вакуум и саградио прву вакуум пумпу,
- 1662. година: Роберт Бојл је дошао до закона за изотермску промену стања идеалног гаса,
- 1679. година: Папен је развио први дигестор, претечу парне машине,
- 1698. година: Савери је патентирао парну пумпу,
- 1710. година: Њукомен је конструисао прву „атмосферску“ парну машину,
- 1760-тих година: Блек је развио калориметрију,
- 1780-тих година: Ват је извршио побољшања парне машине,
- 1798. година: Бењамин Томпсон (гроф Румфорд) је разматрао механички еквивалент топлоте,
- 1824. година: Сади Карно је изнео теорију идеалног топлотног мотора,
- 1840. година: Хес је разматрао рану верзију закона о одржању енергије за хемијске реакције,
- 1840-тих година: Мајер је разматрао релацију између топлоте и рада,
- 1840-тих година: Џул је разматрао релацију између топлоте и рада,
- 1847. година: Хелмхолц је објавио теорију о одржању енергије,
- 1848. година: Вилијам Томсон (Лорд Келвин) је утврдио вредност апсолутне нуле температуре,
- 1850. година: Клаузијус је формулисао Други закон термодинамике,
- 1865. година: Клаузијус је увео концепт ентропије,
- 1871. година: Максвел је формулисао тзв. Максвелове релације,
- 1870-тих година: Максвел и Болцман су развили статистичку термодинамику,
- 1889. година: Гибс је развио статистичку механику, дајући темељну основу класичне и статистичке термодинамике.

Снажан развој термодинамике настављен је и у 20. веку, са значајним доприносима многих аутора. Неки од аутора награђени су Нобеловом наградом за науку, као што су:

- Јакобус ван Хоф (Нобелова награда 1901. године – оснивач хемијске термодинамике),
- Јоханес ван дер Валс (Нобелова награда 1910. године – допринос теорији стања гасова и течности),
- Вилхелм Вин (Нобелова награда 1911. године – рад на топлотном зрачењу),
- Хајке Камерлинг Онес (Нобелова награда 1913. године – истраживања својстава материје на ниским температурама),
- Макс Планк (Нобелова награда 1918. године – откриће кванта енергије),
- Валтер Нерст (Нобелова награда 1920. године – формулација Трећег закона термодинамике),
- Ларс Онсагер (Нобелова награда 1968. године – дифузија температурних градијената, Онсагерове реципрочне релације),
- Иља Пригожин (Нобелова награда 1977. године – Пригожинова теорема, разматрање дисипативних структура и иреверзибилности),
- Кенет Вилсон (Нобелова награда 1982. године – теорија критичних феномена у вези са фазним прелазима), и други.

Величине стања термодинамичког система

2.1 Увод

Величине стања омогућавају да се равнотежно стање термодинамичког система изрази у квантитативном смислу. Два стања система су идентична ако величине стања имају исте вредности. Уколико је дошло до промене бројних вредности величина стања то значи да је извршена промена стања термодинамичког система, што је једино могуће услед деловања спољашњих утицаја на систем. Неке величине стања директно су мерљиве, као што су маса, температура, притисак и запремина, док су друге величине стања концептуалне, њихова вредност се одређује на основу вредности мерљивих величина.

2.1.1 Маса и количина материје

Маса је једна од основних карактеристика физичких тела (материје – супстанце). Појам масе познат је и прецизно дефинисан у физици и класичној механици. Основна јединица за масу у Међународном (SI) систему јединица је килограм (kg), и то је једна од седам основних мерних јединица. Маса система који не размењује материју са околином не мења се са променом положаја система (осим када се систем креће брзинама блиским брзини светлости), нити на њу утиче притисак или температура. У класичним наукама, као што је термодинамика, један од основних физичких закона јесте Закон о одржању масе. У гравитационом пољу, на систем масе m делује гравитациона сила, сила теже, $F = mg$.

Поред масе материје постоји потреба за увођењем и појма количине материје, јер се, на пример, хемијске реакције одвијају на нивоу броја молекула односно броја молова. Основна карактеристика термодинамичких система јесте да се састоје од огромног броја елементарних честица. Зато је за основну јединицу усвојена количина материје знатно већа од елементарних честица (молекула, атома), а то је 1 mol.

Спољашњи утицаји на термодинамички систем

У овом поглављу биће речи о спољашњим утицајима на термодинамички систем и то:

- раду,
- топлоти,
- преношењу материје.

С обзиром да се понашање термодинамичког система једино подвргава анализи, поставља се питање: *како између деловања спољашњих утицаја (тј. вредности обављеног рада, пренете количине топлоте...) и промена стања система успоставити одговарајуће законитости?* То и јесте један од основних задатака класичне термодинамике. Одмах да разјаснимо, успостављање тих законитости, то јесте изражавање вредности спољашњих утицаја преко величина стања система, могуће је у случајевима када термодинамички систем врши квазистатичке промене стања.

Као што је већ напоменуто, вредност пренете количине топлоте и обављеног рада, као и масе и енергије пренете материјом, карактеристика су сваког термодинамичког процеса, и зависе од начина извођења промене стања, односно од путање промене. Због тога се не може говорити да неки термодинамички систем (тело, радна материја) садржи, односно поседује, било количину топлоте, било извршени рад, што значи да ове величине немају смисла у одређеном стању, већ само током процеса.

Први закон термодинамике

„Закон о одржању енергије треба једноставно размаћрати као указивање на то да постоји нешто што остаје непромењиво у било ком физичком процесу. И ма каква открића да следе из будућих експеримената, ми унапред знамо да ће и тада постојати нешто што ће поседовати способности да се одржава, а то нешто можемо да назовемо енергијом.“¹ [3].

У претходном делу ове књиге било је речи о различитим видовима енергије коју поседује термодинамички систем. Њена вредност може се променити под дејством спољашњих енергијских утицаја на систем. Није било речи о успостављању релација између вредности пренете енергије између система и околине и енергије система. Те везе дефинише један од најважнијих закона у термодинамици, и уопште у науци и техници, а то је Закон о одржању енергије или Први закон термодинамике. Овај закон формулисан је у првој половини 19. века, базиран је на искуству и експерименталним истраживањима, није га могуће извести из других закона физике и представља општи фундаментални принцип одржања енергије.

Пре формулисања Првог закона термодинамике већ је био познат Закон о одржању енергије у механици. Међутим, када су Мајер, Џул и други научници, утврдили принцип еквивалентности топлоте и механичког рада, и увођењем појма унутрашње енергије, схваћено је да Закон о одржању енергије важи и за друге видове енергије и добио је назив Закон о одржању и трансформацијама енергије, односно Први закон термодинамике. Тако термодинамика постаје најопштија наука о енергији, при чему Први закон термодинамике утврђује једнозначну квантитативну везу између свих познатих видова енергије током неког процеса, који не мора бити чисто термодинамичке природе.

¹ Жил Анри Поенкаре (*Jules Henri Poincaré*, 1854-1912) – француски математичар и физичар.

Топлотни капацитет

Карактеристика материје која дефинише капацитет примања и одавања топлоте при неком процесу, а при промени температуре за јединичну вредност, има назив **топлотни капацитет** – ознака C (J/K). Количина топлоте коју је потребно предати материји током неког процеса подељена разликом крајње и почетне температуре дефинише средњу вредност топлотног капацитета у датом интервалу температура, то јесте

$$\bar{C} = C|_{T_1}^{T_2} = \frac{Q_{1-2}}{T_2 - T_1} \quad [\text{J/K}] \quad (5.1)$$

Права или стварна вредност топлотног капацитета, односно топлотни капацитет у неком стању, при температури T , дефинисан је као

$$C = \frac{\delta Q}{dT} \quad [\text{J/K}] \quad (5.2)$$

и представља однос између елементарне количине топлоте предате радној материји (δQ) у одређеном термодинамичком процесу и настале диференцијалне промене температуре материје (dT). Опште прихваћена **дефиниција топлотног капацитета** јесте да је то **количина топлоте коју је потребно предати материји током неког процеса да би се њена температура променила за 1°C , односно 1K .**

Очигледно је да топлотни капацитет зависи од масе, односно количине материје. На пример, топлотни капацитет 10 kg воде 2 пута је већи од топлотног капацитета 5 kg воде. Управо због огромне масе, атмосфера, океани, земљиште, са становишта технике, имају практично бесконачно велике топлотне капацитете. Боља физичка представа о топлотном капацитету добија се његовим свођењем на облик који не зависи од масе, односно количине материје. То се постиже увођењем специфичног и моларног топлотног капацитета.

Термодинамичке карактеристике радне материје

Једначина стања

Стање термодинамичког система дефинисано је вредностима величина стања система. Познато је да све величине стања нису независне, већ да између њих постоје везе. Да би равнотежно стање система једнозначно било одређено потребно је познавати одређени број **независних величина стања**, док је остале величине стања могуће одредити из **једначина стања**. Опште правило, негде познато као **постулат стања**, или чешће као **Гибсово правило фаза**, формулисано је као водич за одређивање броја независних величина стања за потпуно дефинисање стања система. Број независних величина стања које једнозначно дефинишу стање термодинамичког система назива се и број степени слободе посматраног система.

Број степени слободе једног термодинамичког система зависи од структуре система, као и од броја спољашњих утицаја на систем (броја могућих међудејстава између система и околине). По структури термодинамички системи могу бити хомогени (једнофазни) или хетерогени (вишефазни), а по саставу могу бити једнокомпонентни или вишекомпонентни. За сваки независан спољашњи утицај на систем потребно је познавати једну додатну независну величину стања система. Ограничимо овде разматрања на затворени термодинамички систем. Познато је да је између затвореног система и околине могуће преношење топлоте и вршење различитих врста радова. Вршењем запреминског рада мења се запремина система, док вршење неких других радова изазива промене неких других величина стања система (брзине и положаја система, односно кинетичке и потенцијалне енергије, као и других видова енергије, односно разних потенцијала). Дакле, једна независна величина стања везана је за преношење топлоте, и још по једна додатна независна величина стања за сваки додатни независан начин преношења енергије вршењем рада.

Други закон термодинамике

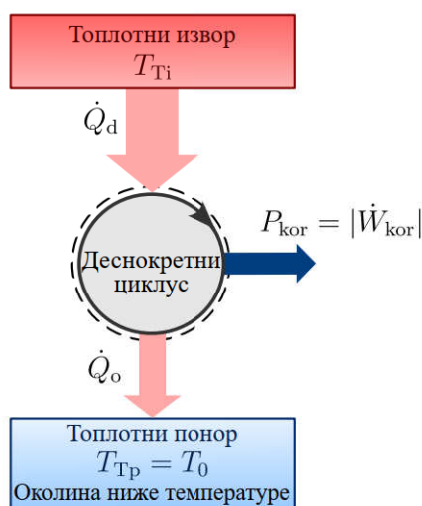
„Закон да ентропија увек расте – Други закон термодинамике – држи, мислим, врховну позицију међу законима физике. Ако вам неко каже да је ваша теорија у нескладу са експериментима – ја добро, експериментатори с времена на време забрљају ствари. Али ако се утврди да је ваша теорија у супротности са Другим законом термодинамике, не могу вам дати наду, нема ништа друго него да се сруши у најдубљем понижењу.“¹

Други закон термодинамике за многе је најинтригантнији закон природе. Тврдња да се при било ком процесу укупна неуређеност у универзуму, као и у изолованом термодинамичком систему, само повећава, да укупна ентропија расте, да су сви стварни процеси неповратни, има не само техничке импликације, већ и шира филозофска, па и друштвена и друга тумачења. Док се већина природних закона математички изражава једнакошћу, Други закон термодинамике изражава се као неједнакост. То није закон о одржању, као што су Закон о одржању масе или Закон о одржању енергије, то је закон, принцип, о повећању ентропије. И дан-данас Други закон термодинамике изазива многе нејасноће и привлачи нове напоре за појашњењима. Један физичар и филозоф се жалио да „постоји онолико формулација Другог закона термодинамике колико је било расправа о њему“. Историјски гледано, до Другог закона се дошло искуствено, а данас је он прихваћен као аксиом термодинамичке теорије.

¹ Артур Едингтон (Sir Arthur Eddington, 1882-1944) – енглески астроном, физичар и математичар.

Циклуси топлотних мотора

Топлотне машине у којима се топлота користи за перманентно добијање механичког рада имају назив **топлотни мотори**. Као што је већ наведено (поглавље 7.2.1 Топлотни мотори), за непрекидно претварање топлоте у користан рад неопходно је да постоје топлотни извор, топлотни понор и радна материја која у топлотном мотору врши цикличне промене стања (слика 8.1).



Слика 8.1 Шема токова енергије код топлотног мотора

У топлотним моторима радна материја (радно тело) обавља деснокретни циклус, деснокретни кружни процес. При томе целокупну количину топлоте коју у току циклуса радна материја прима није могуће у потпуности трансформисати у користан рад (другим речима – перпетуум мобиле друге врсте није могућ), јер од радне материје у току циклуса мора постојати и предаја топлоте топлотном понору (слика 8.1).

Циклуси расхладних машина и топлотних пумпи

Расхладне машине¹ и **топлотне пумпе** су топлотне машине помоћу којих се преношење топлоте обавља са средине ниже температуре на средину више температуре, уз неопходно улагање енергије кроз компензациони процес. У овој књизи анализом су обухваћене компресорске машине, код којих се компензациони процес обавља утроском механичког рада.

У расхладним машинама и топлотним пумпама радна материја обавља **левокретни циклус**, односно левокретни кружни процес (видети поглавље 7.2.2.). Циклуси у њима су најчешће исти, али су циљеви рада расхладне машине и топлотне пумпе различити.

Циљ рада **расхладних машина** јесте одржавање температуре хлађеног простора (тела, средине) на температури нижој од температуре околине. Зато се од хлађеног простора, који представља топлотни извор (температуре T_{Ti}), одводи топлота. Предаја топлоте околини више температуре (топлотном понору $T_{Tp} = T_0$) неопходан је услов функционисања, а не циљ рада машине. Расхладне машине имају широку примену, почевши од домаћинстава (фрижидери, замрзивачи, клима уређаји), примењују се и у индустрији (системи за хлађење и складиштење смрзнуте хране, различити технолошки процеси и наменски поступци, као нпр. прављење леда), затим у медицини и многим другим областима живота и рада људи.

¹Поред термина расхладна машина у литератури на српском језику у употреби су и термини расхладни уређај и расхладно постројење. У овој књизи приказани су основни термодинамички процеси и наведене компоненте у којима се они изводе. Књига се не бави додатним приборима, направама и другим елементима потребним за рад уређаја, нити пројектовањем још комплекснијих расхладних постројења, тако да ће овде углавном бити коришћен термин расхладна машина.

Основе преношења топлоте

Услов за преношење топлоте јесте постојање разлике температура између термодинамичког система и околине. Једна од дефиниција Другог закона термодинамике наглашава да се топлота сама од себе увек преноси од средине (тела) више на средину (тело) ниже температуре. По успостављању термичке равнотеже између различитих тела преношење топлоте престаје. Термодинамика омогућава одређивање количине топлоте која се предаје систему, или коју систем предаје, при чему систем прелази из почетног у крајње равнотежно стање. Међутим, на основу термодинамичке анализе није могуће одређивање интензитета и брзине којом се преношење топлоте обавља, односно колико дуго ће процес трајати при датим условима. Такође, није могуће одређивање распореда температура у телу након истека одређеног времена. Те могућности, и још много других, даје посебна научна дисциплина – *наука о преношењу (простирању) топлоте*.

Основни начини преношења топлоте су:

- **провођење топлоте или кондукција,**
- **прелажење топлоте или конвекција,**
- **зрачење или радијација.**