

Đorđe G. Kozić

TERMODINAMIKA inženjerski aspekti

TERMODINAMIKA

inženjerski aspekti



Đorđe G. Kozić

Dr Đorđe G. Kozić, red. prof.

TERMODINAMIKA

INŽENJERSKI ASPEKTI

Recenzenti:

Dr Bogosav Vasiljević, vanr. prof.

Dr Miloš Banjac, red prof.

Izdavač:

MAŠINSKI FAKULTET

Univerziteta u Beogradu

Ul. Kraljice Marije br. 16, Beograd

Tel. (011) 3370-760

Fax. (011) 3370-364

www.mas.bg.ac.rs

Za izdavača:

Dekan, dr Radivoje Mitrović, red. prof.

Urednik:

Dr Milan Lečić, red. prof.

Predsednik komisije za izdavačku delatnost

Mašinskog fakulteta u Beogradu

Tiraž: 300 primeraka

Štampanje odobrila:

Komisija za izdavačku delatnost

Mašinskog fakulteta u Beogradu

i

Dekan Mašinskog fakulteta u Beogradu

br. odluke 07/2019,

od 25.2.2019.

Dizajn omota:

Iva Kozić

Štampa: „Planeta print“

www.planeta-print.co.rs

Beograd, 2019. godine

ISBN 978-86-6060-000-6

SADRŽAJ

Predgovor.....	XI
----------------	----

POGLAVLJE 1

Osnovni pojmovi. O energiji.....	1
Termodinamički sistem i okolina. Pojam međudejstva	2
Fenomenološki i statistički pristup	3
Pojam izolovanog sistema	3
Osnovni postulat termodinamike.....	4
Zakon o održanju energije.....	6
Mogućna međudejstva sistema i okoline	8
Zatvoreni sistem. Veličine stanja i veličine procesa	10
Energija sistema. Pojam unutrašnje energije	13
Pravilo znakova	17
Prvi zakon termodinamike (za zatvoren sistem)	18
Termičko stanje sistema. Veličine stanja	23
Pritisak	24
Koncept temperature. Nulti zakon termodinamike	27
Ravnotežno i neravnotežno stanje	32
Intenzivno stanje. Ekstenzivne, intezivne, specifične i molarne veličine stanja.....	33
Jednačina stanja čiste homogene supstancije	35
Jednačina stanja idealnog gasa	36
Jednačina stanja realnih gasova.....	39
Smeše idealnih gasova. Daltonov i Amagaov model.....	40

POGLAVLJE 2

Promene stanja termodinamičkog sistema. Kvizistatičke i nekvizistatičke promene	47
Kvantitativni efekti međudejstava.....	50
Rad promene zapremine i “radni dijagram”	51
Toplotni kapacitet i količina toplote	54
Poluidealni gasovi.....	58
Promene unutrašnje energije i entalpije idealnog gasa kao i smeše idealnih gasova.....	61
Potencijali i koordinate ravnotežnih međudejstava.....	65
Makrostanje i mikrostanja. Termodinamička verovatnoća.....	70

Geometrijski i "energijski" prostor.....	72
Procesi u adijabatski izolovanom cilindru	74
Kvazistatički procesi u cilindru sa dijaterskim zidovima.....	77
Entropija i "toplotni dijagram"	78
Termodinamički formalizam.....	84

POGLAVLJE 3

Politropske promene stanja idealnog gasa	87
Grafičko prikazivanje kvazistatičkih politropskih promena stanja	90
Termički koeficijenti	93
Karakteristične funkcije	96
Termodinamički potencijali	100
Diferencijalne relacije termodinamike	101
O nekim karakteristikama termodinamičkog metoda	104

POGLAVLJE 4

Neravnotežna međudejstva.....	105
Drugi zakon termodinamike. Promena entropije izolovanog sistema.....	107
Povratni i nepovratni procesi	117
Energija disipacije.....	120
Jednokratno i permanentno vršenje rada	122
Termodinamički stepen korisnosti.....	125
Džulov desnokretni ciklus.....	127
Karnoov desnokretni ciklus.....	130
Gubici rada i pravilo Gi–Stodola	134
Levokretni kružni procesi.....	137
Eksergija i anergija	140
Eksergija toplote.....	142
Eksergija radne supstance u zatvorenom sistemu	145
Apsolutna termodinamička temperatura.....	148
Treći zakon termodinamike i temperatura apsolutne nule	150
O ravnoteži termodinamičkih sistema.....	152
Uslovi ravnoteže neizolovanih sistema.....	155

POGLAVLJE 5

Sistemi koji razmenjuju supstanciju (masu) sa okolinom	157
--	-----

Koncept kontrolne zapremine	158
Stacionarni strujni procesi	159
Prvi zakon termodinamike za stacionarne strujne procese.....	165
Ciklusi motora sa unutrašnjim sagorevanjem.....	171
Značajna uloga entalpije.....	175
Stepeni dobrote adijabatske ekspanzije i kompresije	177
Adijabatsko prigušivanje.....	178
Primena drugog zakona termodinamike na stacionarne protočne procese.....	180
Eksergija struje fluida.....	181
Nestacionarni strujni procesi.....	183

POGLAVLJE 6

Otvoreni sistemi. Strukturno homogeni i nehomogeni sistemi.....	187
Hemijski potencijal.....	189
Uslovi fazne ravnoteže.....	192
Gibsovo pravilo faza.....	194
Klauzijus – Klapejronova jednačina	195
Realne supstancije	197
Apsolutna vrednost entropije	199
Još o entropiji.....	200

POGLAVLJE 7

Proces isparavanja vode	207
Veličine stanja vode i vodene pare. Step en suvoće pare	211
Dijagrami p - v , T - s i h - s za vodenu paru.....	212
Promene stanja vodene pare.....	217
Desnokretni ciklus sa vodenom parom.....	219
Kružni procesi u rashladnim uredjajima.....	221

POGLAVLJE 8

Vlažan vazduh. Smeše pare i idealnog gasa	225
Dijagram h_{1+x} - x ZA vlažan vazduh	237
Idealizovane termodinamičke promene stanja vlažnog vazduha.....	239
Procesi izobarskog zagrevanja i hlađenja vlažnog vazduha.....	239
Procesi izobarskog mešanja dve struje vlažnog vazduha	241
Procesi dodavanja vodene pare ili vode vlažnom vazduhu.....	243

Merenje vlažnosti vazduha	244
Zaključna razmatranja	247

POGLAVLJE 9

Elementi nauke o prostiranju toplote	249
Provođenje toplote (kondukcija).....	250
Provođenje toplote kroz ravan zid	252
Provođenje toplote kroz cilindrični zid	253
Prelaženje toplote (konvekcija).....	254
Prolaženje toplote	260
Prolaženje toplote kroz ravan zid	260
Prolaženje toplote kroz cilindrični zid.....	261
Prostiranje toplote zračenjem	262
Emisija toplotnog zračenja. Zakoni zračenja crnog tela	263
Prijem energije toplotnog zračenja. Incidentno zračenje	266
Razmena toplote zračenjem između dva siva tela	268
Zračenje gasova	272
Izmenjivači toplote	273
Literatura	277

DODATAK (Tabele i dijagrami)

Postoje tri vodeće nauke koje – ako se sudi po raznovrsnosti dalekosežnih zaključaka, dobijenih iz malog broja polaznih postulata – zauzimaju poseban položaj. To su mehanika, elektrodinamika i termodinamika. One predstavljaju spomenik potencijalu čovekovog razuma. Izučavanje ovih nauka i saznavanje o poretku i jednostavnosti koji se otkrivaju među najsloženijim prirodnim pojavama, nagrađuje se instinskim estetskim i intelektualnim zadovoljstvom.

G. Luis

Aparat termodinamike predstavlja jedan od najpreciznijih instrumenata naučne analize. Oblast primenjivosti termodinamike obuhvata sav dijapazon čovekove delatnosti. U istoriji nauke nailazi se na mali broj dostignuća koja se po bogatstvu svojih ideja i raznovrsnosti primene mogu da uporede sa termodinamikom.

P. Etkins

Termodinamika je nauka sa čvrstim osnovama, preciznim pojmovima i jasnim granicama. Principi termodinamike bacaju svetlost na sve prirodne pojave.

Dž. Maksvel

Dok diplomatija može da se opiše kao umetnost mogućnog, termodinamika ima epitet nauke mogućnog. Klasična termodinamika predstavlja u većoj meri nauku o principijelnom mogućnom nego o onom što se praktično može da postigne.

L. Neš

Termodinamika poseduje veliku intelektualnu privlačnost.

M. Born

Zakon prema kome ukupna entropija uvek raste – drugi zakon termodinamike – mislim da zauzima vrhunsku poziciju među zakonima Prirode.

A. Edington

Teorija proizvodi utoliko jači utisak, ukoliko su jednostavnije njene pretpostavke, raznoobraznost predmeta koje povezuje i šira oblast njene primene. Otuda dubok utisak koji je na mene proizvela termodinamika. To je jedinstvena univerzalna teorija, za koju sam ubeđen da – u okvirima primenjivosti njenih osnovnih pojmova – nikada neće biti opovrgnuta.

A. Ajnštajn

Kad se predaje bilo koji predmet, izgleda da bi prirodan način bio da se počne sa jasnim objašnjenjem o prirodi, svrsi i obuhvatu predmeta. Ali, pri odgovoru na pitanje „Šta je termodinamika?“ u iskušenju sam da odgovorim: „To je veoma težak predmet, skoro, ako ne i potpuno nezgodan za predavanje.“

O. Rejnolds

PREDGOVOR

Osnovne ideje za tekst koji sledi nastale su na osnovu predavanja koje je pisac držao studentima Mašinskog fakulteta u Beogradu (kao i studentima drugih fakulteta) — tokom više od dvadeset godina profesorskog staža. Knjiga je koncipirana kao univerzitetski udžbenik, pri čemu je obimom i sadržajem prilagođena programu unekoliko proširenog jednosemestralnog kursa.

Pisac je u potpunosti svestan mogućnog pitanja: da li je pored toliko postojećih tekstova, od kojih su mnogi na visokom nivou, potreban još jedan tekst iz termodinamike? Uverenost u potvrđan odgovor može da se objasni činjenicom da su pitanja povezana sa dobijanjem, prenošenjem, transformacijama i korišćenjem energije u poslednje vreme postala posebno aktuelna. Ona se tiču ne samo fizičara i inženjera — već i svakog čoveka. Posebno je inženjerima, od kojih se traže rešenja za sadašnje i buduće probleme energetike, neophodno jasno razumevanje fizičkih pojava i procesa u ovoj oblasti. U tom smislu produbljeno i detaljisano obraćanje studentima, koji su na početku novog milenijuma dodatno opterećeni lavinom informacija — i na određen način im je uskraćeno da se potpunije upoznaju sa fizikalnošću procesa u kojima energija igra odlučujuću ulogu — može da se smatra ne samo korisnim, već i neophodnim.

Poznato je da termodinamika, nezavisno od toga što matematički formalizam u njoj nije komplikovan, predstavlja složenu naučnu disciplinu do čijeg se usvajanja ne dolazi sa lakoćom. Pravilan pristup i razumevanje konceptualne filozofske prirode termodinamičkih pojmova u velikoj meri zavisi od načina na koji se oni prezentiraju. Po mišljenju pisca rešavanju ovog didaktičkog izazova može da se pomogne ako izlaganje poseduje određenu redoslednost, pri čemu je potreba za narednim porcijama znanja već založena u prethodnom izlaganju. U tom smislu tekst poseduje određeni kontinuitet izlaganja, a pojedini naslovi treba da se shvate više kao formalno izdvajanje pojedinih celina.

Udžbenik poseduje neke osobenosti u načinu izlaganja termodinamičke građe. Ovo se pre svega odnosi na pojam entropije, koji autor detaljno fizikalno osvetljava i svesno stavlja najpre u okvir prvog zakona termodinamike — u red i ravnopravno sa ostalim veličinama stanja — a tek onda, u sasvim drugoj ulozi, u kontekst drugog zakona termodinamike. Kako je pokazalo iskustvo u radu sa studentima, ovakav pristup naišao je na dobar didaktički prijem. Osim toga, posebno su detaljno obrađeni pojmovi za koje se pokazalo da studentima zadaju najviše teškoća (npr. koncept povratnosti i nepovratnosti, pojam entalpije itd.). Tekst je mestimično „osvežen“ nekim napomenama koje bi trebalo da posluže kao dodatne informacije iz predmetne problematike. Na kraju knjige se nalazi niz termodinamičkih tabela i dijagrama, tako da knjiga može da posluži kao zaokružena celina za studiranje i praksu.

Pisanje je potrajalo duži niz godina i piscu su u čitanju rukopisa, kompjuterskoj obradi teksta i slika pomagali mnogobrojne kolege i saradnici. Uz veliku zahvalnost svima njima izdvaja se ona koja je upućena Dragiši Ivaniševiću, dipl. ing., za strpljenje i trud oko izrade i stalna poboljšavanja brojnih originalnih slika i skica.

Knjiga uključuje veoma opširan faktografski materijal i zato je moguće da je došlo do propusta i grešaka. Pisac će biti zahvalan svim studentima, i čitaocima uopšte, na sugestijama i primedbama.

Februar 2019.

D. G. K

je $T' = T_{T.I, \min} = T_3$ i $T'' = T_{T.P, \max} = T_1$ (slika 4.11.(b)). Za slučaj kada je, u ovakvoj situaciji, npr. $T' = 1400$ K, a $T'' = 300$ K, pri odnosu pritiska $\pi = 10$, proizilazi da termodinamički stepen korisnosti Džulovog kružnog procesa iznosi $\eta_i = 0,457$.

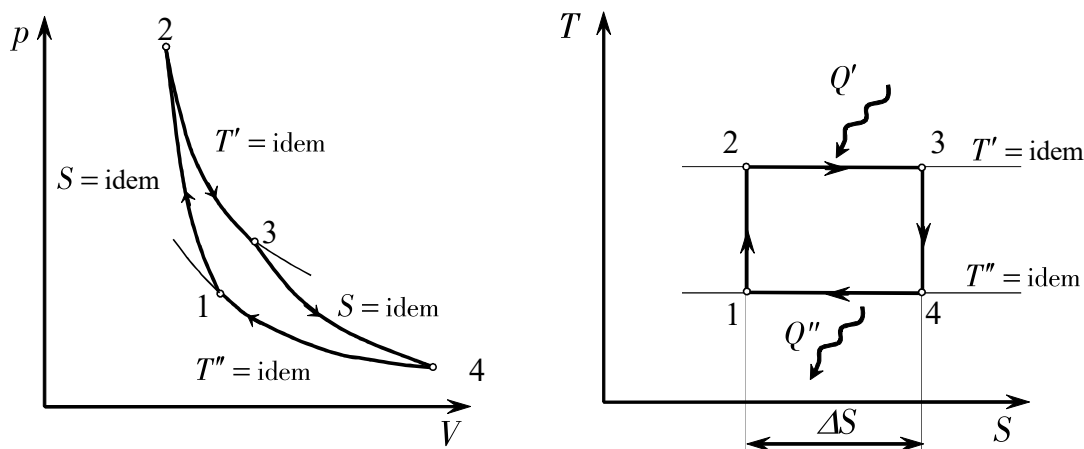
KARNOOV DESNOKRETNI CIKLUS

§ 78. Ponovo se postavlja pitanje: da li se, i na koji način (odustajući pri tome od koncepta Džulovog ciklusa) – pri istim temperaturama toplotnog izvora i toplotnog ponora – može da dobije veći stepen korisnosti?

Neposredno se nameće ideja da se, na neki način, iskoriste temperaturske razlike koje postoje pri dovođenju i odvođenju toplote. Kao što je pokazano, uvek kada između sistema (radne supstancije) i njegove okoline postoji temperaturska razlika, na osnovu nje se, posredstvom kružnog procesa, koji izvodi radna supstancija, može da dobije određeni rad.

Čitalac već naslućuje da ovakvo razmišljanje vodi prema kružnom procesu u kome bi se dovođenje i odvođenje toplote odvijalo pri beskonačno malim razlikama temperatura, odnosno prema “prekvalifikaciji” i ovih procesa u povratne procese. Upravo je to put za ostvarivanje kružnog procesa sa maksimalnom vrednošću termodinamičkog stepena korisnosti. Pokazuje se da – između zadatih temperaturskih granica – nijedan kružni proces ne može da ima veću vrednost od stepena korisnosti povratnog kružnog procesa.

Kao najpogodniji za analizu je kružni proces koji je na svakom svom delu povratan i koji se sastoji od dve izoterme spojene sa dve kvazistatičke adijabate, pri čemu se izoterma pri kojoj se dovođenje toplote (praktično) poklapa sa izotermom toplotnog izvora, a izoterma pri kojoj se odvodi toplota - sa izotermom toplotnog ponora. Ovaj kružni proces, poznat je u nauci kao *Karnoov kružni proces* ili, kraće, kao *Karnoov ciklus* (slika 4.12).



Slika 4.12 Karnoov desnokretni kružni proces p - V i T - S koordinatnim sistemima

Izraz za termodinamički stepen korisnosti Karnoovog ciklusa, može najjednostavnije da se dobije na osnovu geometrijskih odnosa, korišćenjem prikaza procesa u T - S koordinatnom sistemu (slika 4.12). Na osnovu izraza (4.28) dobija se

$$\eta_t^{\text{Karno}} = 1 - \frac{|Q''|}{Q'} = 1 - \frac{T'' \Delta S}{T' \Delta S}, \quad (4.34)$$

odakle sledi

$$\boxed{\eta_t^{\text{Karno}} = 1 - \frac{T''}{T'}}. \quad (4.35)$$

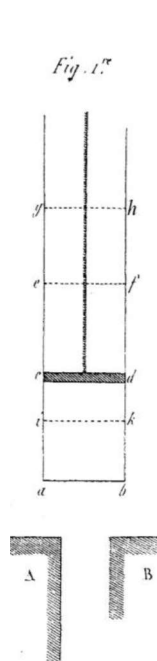
Iz dobijenog rezultata (4.35) proizlaze veoma važne konstatacije:

– termodinamički stepen korisnosti Karnoovog ciklusa zavisi isključivo od temperaturskih nivoa izvora i ponora toplote, a ne zavisi od svojstava radne supstancije koja služi za transformaciju toplote u rad;

– za date temperature T' (nepromenljiva temperatura toplotnog izvora) i T'' (nepromenljiva temperatura toplotnog ponora) termodinamički stepen korisnosti nijednog ciklusa ne može da prevaziđe vrednost termodinamičkog stepena korisnosti Karnoovog ciklusa; tj. za realne cikluse važi

$$\boxed{\frac{|W_C|}{Q'} \leq 1 - \frac{T''}{T'}}. \quad (4.36)$$

U tom smislu jednačina (4.36) može da se nazove “*pravilom toplotnih motora*”.



Poznato je da su se prve stacionarne i samohodne mašine pojavile zahvaljujući “pokretačkoj snazi” vodene pare. Značajno usavršavanje ovih uređaja u novijem dobu započinje Severi, koji je 1698. god. patentirao pumpu pokretanu parom, a kasnije se nastavlja naporima Njukomena, Papena, Polzunova i drugih. Godine 1763. škotski mehaničar Džems Vat završno unapređuje koncept parne mašine predlogom da se uvede poseban deo postrojenja u kome se para kondenzuje - kondenzator, čime praktično otpočinje nova epoha tehnike.

U to vreme umešnost projektovanja i izgradnje ovih mašina malo su se oslanjali na proračune. Različita poboljšanja bila su u najvećoj meri rezultat empirijskih pokušaja – metodom probe i greške. Tako se npr. čak nije ni postavljalo pitanje o tome koliki se rad (u najboljem slučaju) može da dobije utroškom, tj. sagorevanjem jednog kubnog metra drva, ili tone uglja.

Prvi koji je uspeo da pruži egzaktno odgovor na ovo pitanje bio je mladi oficir francuske vojske Sadi Karno (1796-1832), koji je u vojnu službu stupio sa 18 godina, posle odslužane dve godine studija na Politehničkoj školi u Parizu. O značaju i prestižnosti ove škole, koja je počela sa radom dve godine pre njegovog rođenja, govori podatak da su među njenim studentima i profesorima bila mnoga poznata imena nauke. Pored Karno na njoj su studirali Koši, Koriolis, Puason, Gej-Lisak, Pti, Frenel, Klapejron i Puazej, dok su predavači, među ostalima, bili Lagranž, Laplas, Furije, Bertole, Dilong i Amper.

U knjizi nevelikog obima koja nosi naziv “Razmišljanja o pokretačkoj snazi vatre”, izdatoj 1824. godine, Karno je na originalan način uveo pojam cikličnog procesa i – na primeru idealizovane toplotne mašine – sproveo njegovu detaljnu analizu. Upravo se pojava ove knjige smatra početkom nastajanja termodinamike kao nauke. Sledi prevod dela originalnog teksta:

“...zamislimo elastičan fluid, na primer, atmosferski vazduh, zatvoren u cilindričnom sudu $abcd$ snabdeven jednom pokretnom dijafragmom ili klipom cd , neka osim toga budu dva tela A i V održavana svako na nekoj stalnoj temperaturi, temperatura od A da bude viša nego temperatura od V . Zamislimo sada niz situacija:

1. Dodir tela A sa vazduhom zatvorenim u prostoru $abcd$ ili sa zidom toga prostora, za koji ćemo pretpostaviti da lako prenosi toplotu. Vazduh se usled toga dodira nalazi na istoj temperaturi kao telo A ; cd je sadašnji položaj klipa;

2. Klip se postepeno izdiže i zauzima položaj ef. Postoji stalan dodir između tela A i vazduha koji se tako održava na stalnoj temperaturi za vreme razređivanja. Telo A daje toplotu potrebnu za održavanje stalne temperature;

3. Telo A je udaljeno i vazduh više nije u doticaju ni sa jednim telom koje bi mu moglo davati toplotu; međutim, klip nastavlja svoje kretanje i prelazi iz položaja ef u položaj gh. Vazduh se razređuje bez primanja toplote, i njegova temperatura pada. Zamislimo da ona pada dok ne postane jednaka temperaturi tela V: u tom trenutku klip se zaustavlja i zauzima položaj gh;

4. Vazduh je stavljen u doticaj sa telom V; on je sabijen vraćanjem klipa koji je doveden iz položaja gh natrag u položaj cd. Ovaj vazduh međutim ostaje na stalnoj temperaturi, zbog dodira sa telom V, kome on ustupa svoju toplotu;

5. Telo V je uklonjeno i nastavlja se kompresija vazduha čija se temperatura podiže jer je on tada izolovan. Kompresija se nastavlja dok vazduh ne dostigne temperaturu tela A. Klip za to vreme pređe iz položaja cd u položaj ik, i

6. Vazduh je ponovo doveden u doticaj sa telom A; klip se vraća iz položaja ik u položaj ef; temperatura ostaje nepromenjena.

Situacija opisana pod brojem 3 ponavlja se, zatim jedna za drugom situacije 4, 5, 6, 3, 4, 5, 6, 3, 4, 5 itd..."

Karno je problematiku toplotnog motora razmatrao u najopštijem obliku, bez ulaženja u izučavanje svojstava radne supstancije. Dokazao je da je njen izbor potpuno proizvoljan i da su u zabludi bili oni praktičari koji su očekivali da bi se principijelna poboljšanja ekonomičnosti parne mašine mogla da dobiju zamenom vode – npr. živom ili alkoholom. Najveću pažnju je usmerio prema načinu na koji se obavlja ciklus, tj. potrebi da, ako se teži da on u termodinamičkom smislu bude savršen (najkvalitetniji), sva relevantna međudejstva moraju da budu povratna (reverzibilna). "Ovaj uslov biće ispunjen ako se u telima ne dešava nikakva promena temperature koja nije uslovljena promenom zapremine, ili – što je isto samo drugačije iskazano – da nigde ne dolazi do kontakta između tela sa primetnom razlikom temperatura." Pored ovako izraženog uslova termičke ravnoteže, Karno ukazuje i na potrebu za nepromenljivom mehaničkom ravnotežom koja se ostvaruje jednakošću pritiska usled sile koja deluje na klip i pritiska radne supstancije. Drugim rečima, ukazao je na potrebu da svi procesi budu (kako bi se to danas reklo) kvazistatički.

Tako se dolazi do, u T - S koordinatnom sistemu prepoznatljivog, "pravougaonog" kružnog procesa, sastavljenog od dve izoterme (koje se praktično poklapaju sa izotermama izvora i ponora) i dve izentropne (Karnoov ciklus). Posebno je istakao značaj neophodnosti postojanja ne samo izvora već i ponora toplote, kao dva "tela" čije temperature moraju da budu različite (i istovremeno nemogućnosti postojanja *perpetuum mobila* druge vrste).

Na taj način Karno je dobio mnoge rezultate koji su u ovom tekstu već razmatrani, u tom smislu da oni i u sadašnje vreme predstavljaju centralni deo opšte teorije toplotnih motora. Jedino što je moralo da bude ispravljeno tokom razvoja termodinamike, tj. ono što nije bilo ispravno u Karnoovoj teoriji, bila je (u njegovom delu – "memoarima") prisutna zavisnost od, u tom vremenu vladajuće, kaloričke koncepcije toplote, čije su osnovne ideje ovde date u § 32.

Pokazalo se, međutim, da čak i pomenuti "nedostaci" ne mogu da se posmatraju potpuno bezuslovno i jednostrano. Iz beležaka koje je posle Karnoove smrti objavio njegov brat Ipolit u drugom izdanju pomenute knjige (1878.), vidi se da Karno, u suštini nije priznavao zasnovanost teorije kalorika i da su njegovi stavovi o prirodu toplotnih interakcija odgovarali kasnijim pravilnim naučnim shvatanjima. Jedan od dokaza za to je da je u njima sa izuzetnom jasnoćom izložen zakon o održanju energije i izračunat u to vreme aktuelan mehanički ekvivalent toplote sa tačnošću koja premašuje npr. tačnost kasnijeg Majerovog rezultata.

Postoje čak i pretpostavke da je Karno problematiku toplotnog motora smišljeno zasnovao na teoriji kalorika kako bi je učinio pristupačnom većini svojih savremenika – naučnika i inženjera, koji su stajali na stanovištu da se količina toplote održava. Treba razumeti da nije bilo jednostavno promeniti postojeću paradigmu i odupreti se vladajućem konceptu, prema kome je količina toplote razmatrana analogno sa masom vode koja pada. Ovo se odnosilo i na temperaturu,

tačnije, razliku temperatura, koja je upoređivanja sa visinom padanja vode (što je kao model procesa dobijanja rada primenljivo kada se razmatra slučaj hidraulične turbine).

*

Karno je objavio samo jedno pomenuto delo (umro je od posledica kolere u svojoj 37. godini). Međutim, nezavisno od toga što ni ovo njegovo delo mnogo godina nije bilo primećeno od strane naučne javnosti, njegov sadržaj obezbedio mu je priznanje i trajno mesto u istoriji nauke i tehnike. U tom smislu jednačine (4.35) i (4.36) priključuju se napred pomenutim jednačinama Bolemana i Ajnštajna (§ 48.), kao izrazi najvećih dometa čovekovog intelekta.

*

U Univerzitetnoj biblioteci "Svetozar Marković" u Beogradu nalazi se primerak pomenute knjige - originalno izdanje iz 1824. god. Na knjizi, koja je veoma dobro očuvana, nalazi se prepoznatljiv eks libris (ilustracija iz poznate autobiografije "Od pašnjaka do naučenjaka") i natpis: "Poklonio Univerzitetnoj Biblioteci u Beogradu, Mihajlo Pupin. Nju Jork, 1933.". Prevod citata i priložena skica cilindra sa klipom i "toplotnim rezervoarima" A i B preuzeta je iz ovog originala.

Očigledno je da, sa stanovišta termodinamičke analize, razmatranja povezana sa Karnoovim ciklusom spadaju u sam njen vrh! Nezavisno od toga što nijedan realan toplotni motor ne radi po ovom ciklusu, upravo su zaključci koji proizilaze iz Karnoove analize savršenog toplotnog motora predstavljali svojevremeno osnovu za formulaciju ovde ranije diskutovanog fundamentalnog principa koji se naziva drugi zakon termodinamike. (U ovom tekstu već je dat analitički iskaz drugog zakona (4.2) – koji predstavlja njegovu najopštiju formulaciju).

U klasičnom izlaganju termodinamike navodi se više formulacija drugog zakona, kako je to već navedeno u §71. Ove formulacije se u krajnjoj meri sve mogu da svedu na ovaj iskaz, odnosno da se poistovete sa pomenutim analitičkim iskazom.

Razmotrimo prvo razloge zbog kojih Karnoov ciklus ne može da se ostvari u realnosti. Pre svega adijabatski procesi kvazistatičke ekspanzije i kompresije ne mogu da se realizuju kao ravnotežni (povratni) procesi – makar zbog postojanja trenja. Osim toga, procesi dovođenja i odvođenja toplote bez konačnih temperaturnih razlika između toplotnog izvora (odnosno ponora) i radnog tela samo bi u principu mogli da se ostvare sa velikim površinama za razmenu toplote i pri beskonačno malim razlikama temperatura, što bi teorijski zahtevalo beskonačno veliko vreme.

Kao logički kuriozitet može da se navede činjenica da – iako bi motor koji bi striktno radio po Karnoovom ciklusu (za date temperature izvora i ponora toplote) imao najveći termodinamički stepen korisnosti – snaga koju bi razvijao takav motor bila bi jednaka – nuli! Ovaj svakako neočekivani rezultat proizilazi iz definicije snage kao količnika izvršenog rada i vremena za koje se taj rad vrši (4.29). A vreme potrebno za ostvarivanje procesa dovođenja i odvođenja toplote u Karnoovom ciklusu, zbog svega što je navedeno (beskonačno male razlike temperatura pri dovođenju i odvođenju toplote), očigledno teži beskonačnosti. Ovo je još jedna potvrda iluzije o ostvarivanju realnog motora koji bi radio po Karnoovom ciklusu.

I kao ilustraciju izreke: "da ništa nije novo pod kapom nebeskom" – povodom prethodnog komentara – mogu da se navedu stihovi koje je 500 godina pre nove ere napisao kineski pesnik i filozof Lao Ce: "...Savršeni kvadrat nema uglove / Savršena mašina ne služi ničemu / Velika muzika nema tonove / Veliki simbol nema oblik,...".

Mada je ovde reč o idealizovanim procesima, analizom Karnoovog ciklusa dolazi se do principijelnih zavisnosti koje ostaju na snazi i za realne procese. Kao što se vidi termodinamički stepen korisnosti Karnoovog ciklusa η_t^{Karno} utoliko je veći ukoliko je manji odnos T''/T' , tj. što je niža temperatura toplotnog ponora T'' i viša temperatura toplotnog izvora T' . Ovaj zaključak važi i za realne cikluse o čemu svedoči npr. analiza izraza (4.33)

koji se odnosi na Džulov kružni proces. U sadašnje vreme postoji mogućnost da se tehnički ostvare veoma visoke temperature (reda veličine stotina hiljada stepeni), koje bi potencijalno mogle da budu temperature toplotnih izvora. Međutim, u realnim motorima takve temperature praktično su neostvarive – iz razloga što materijali od kojih su izrađeni delovi motora ne mogu da izdrže tako visoke temperature. U većini motora maksimalne temperature koje se dostižu u ciklusu iznose između 1000 i 2000 K. U tom smislu, čelici, koji nisu specijalno legirani, mogu u pogonu da izdrže stalnu temperaturu od oko 900 K.

S druge strane, za temperaturu T'' može da se usvoji približna vrednost 300 K, zbog toga što se u ulozi prijemnika toplote, tj. kao toplotni ponor, kod realnih motora, koji rade u uobičajenim uslovima, pojavljuju ili atmosferski vazduh, ili voda iz reka, jezera, mora i drugih vodenih rezervoara. Tehnički mogu da se ostvare i znatno niže temperature od temperature okoline, ali je njihovo dobijanje (kao što će se videti u daljem) povezano sa dovođenjem rada iz okoline i to na takav način da su troškovi "proizvodnje" tog rada veći od efekta koji se postiže povećanjem η_t^{Karno} . Na taj način ni ovakav put za povećanje termodinamičkog stepena korisnosti očigledno nije prihvatljiv.

Za temperature izvora i ponora toplote, koje su napred pomenute kao karakteristične, dobija se

$$\eta_t^{\text{Karno}} = 1 - \frac{300}{900} \approx 0,67 \quad \text{ili} \quad 67\% . \quad (4.37)$$

Iako dobijeni rezultat predstavlja samo pokaznu, odnosno orijentacionu vrednost, on jasno ukazuje da – prema želji ostvarivanoj, kontinualnoj transformaciji toplote u mehanički rad – čak i termodinamički najkvalitetniji kružni proces ima relativno skroman učinak. Za date uslove, od ukupno dovedene toplote samo dve trećine imaju korisnu primenu, dok jedna trećina mora da bude odvedena toplotnom ponoru. U realnosti, tj. kada se ostvaruju ciklusi sa nepovratnim procesima, situacija je još nepovoljnija. Kao prvo približenje obično može da se računa sa polovinom vrednosti sračunatom prema (4.35) (pri tome se za T' i T'' usvajaju najviša i najniža temperatura radnog fluida u datom ciklusu).

GUBICI RADA I PRAVILO GI-STODOLA

§ 79. Razlika između rada koji bi mogao da se dobije u Karnoovom ciklusu (kao teorijski principijelno najvećeg mogućeg rada za datu vrednost Q' i zadate nepromenljive vrednosti T' i T'') i stvarnog rada koji se dobija u nekom realnom ciklusu – kada je reč o istoj dovedenoj količini toplote i istim temperaturama izvora i ponora toplote – može da se razmatra kao *nerealizovan rad*, odnosno kao *gubitak rada* usled nepovratnosti koja je prisutna pri odvijanju realnih ciklusa.

Količinski iznos pomenutog gubitka može da se odredi analizom ukupne promene entropije proširenog sistema u koji su uključena sva tri konstituenta kojima se ostvaruje kružni proces: *radna supstancija, toplotni izvor i toplotni ponor*. Za bilo koji ciklus ukupna promena entropije, sa stanovišta celokupno razmatranog sistema (radne supstancije, toplotnog izvora i toplotnog ponora), može da se izrazi u obliku

$$\Delta S_{\text{UK}} = \Delta S_{\text{R,S}} + \Delta S_{\text{T,I}} + \Delta S_{\text{T,P}} . \quad (4.38)$$

Uz konstataciju da je promena entropije radne supstancije, kada ona obavlja kružni proces, jednaka nuli ($\Delta S_{R,S} = 0$), kao ukupna promena entropije celokupnog (izolovanog) sistema, u kome postoje izotermiski izvor i izotermiski ponor, može da se napiše u obliku

$$\Delta S_{UK} = \Delta S_{T,I} + \Delta S_{T,P} = -\frac{Q'}{T'} + \frac{Q''}{T''} = \Delta S_{NEP} \quad (4.39)$$

U izrazu (4.39) ukupna promena entropije izolovanog sistema iskazana je kao promena entropije usled nepovratnosti procesa (ΔS_{NEP}). Proizlazi da je

$$Q'' = Q' \left(\frac{T''}{T'} \right) + T'' \Delta S_{NEP} \quad (4.40)$$

i dalje

$$Q' - Q'' = Q' \left(1 - \frac{T''}{T'} \right) - T'' \Delta S_{NEP}, \quad (4.41)$$

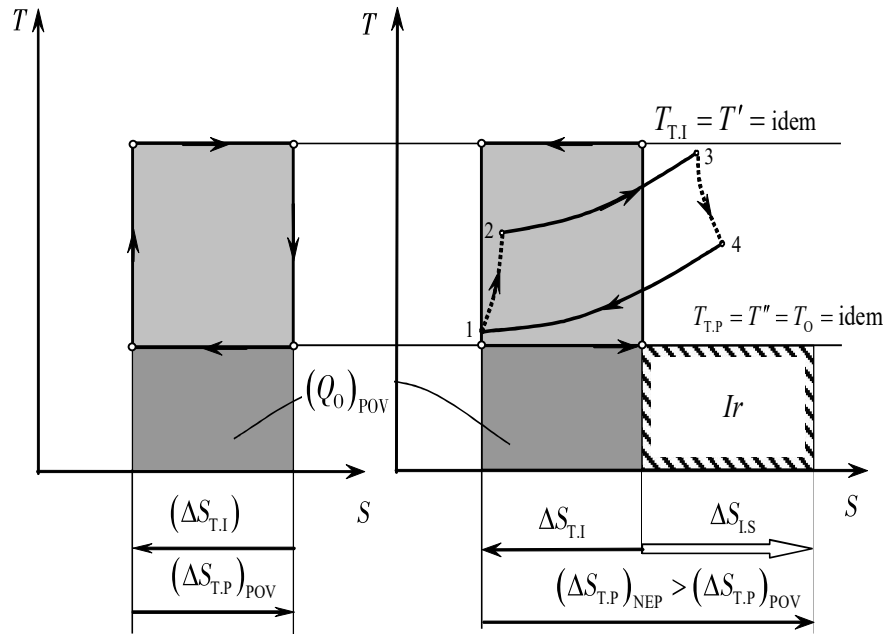
ili

$$|W_{C,realno}| = |W_C^{Karno}| - T'' \Delta S_{NEP}. \quad (4.42)$$

Ovo je rezultat koji ukazuje na to kako nepovratnost utiče na termodinamički stepen korisnosti nekog realnog ciklusa.

Na slici 4.13 je prikazan grafički postupak kojim se omogućava vizuelno sagledavanje realno dobijenog rada, tj. rezultata (4.42) i, istovremeno, pomenutog gubitka rada. U T - S koordinatnim sistemima nacrtani su jedan Karnoov ciklus i jedan realan Džulov ciklus, oba pri istim nepromenljivim temperaturama izvora i ponora toplote, kao i sa jednakim količinama toplote koje se dovode od toplotnih izvora. To znači da je na slici desno, površina ispod izobare 2 – 3 u realnom Džulovom ciklusu identična količini toplote koja se dovodi u povratnom Karnoovom ciklusu, a površina ispod krive 4 – 1 odgovara odvedenoj količini toplote u Džulovom ciklusu. U poređenu sa povratnim Karnoovim ciklusom uočava se da je, zbog nepovratnosti koja je prisutna pri odvijanju realnog nepovratnog Džulovog ciklusa, neophodno da se u toplotni ponor odvede znatno veća količina toplote Q'' . Odvedena količina toplote, koja odgovara površini ispod izobare 4 – 1 predstavljena je na dijagramu desno zbirnom (ukupnom) površinom (dva spojena pravougaonika) ispod izoterme toplotnog ponora.

Ako je površina zatamljenog pravougaonika u desnom dijagramu identična sa površinom koja na slici levo predstavlja količinu toplote koja se odvede u povratnom Karnoovom ciklusu, proizilazi da površina nezatamljenog pravougaonika na desnom dijagramu ukazuje na podatak - koliko se *više* toplote u realnom ciklusu odvede u toplotni ponor. S obzirom na to da rad ciklusa predstavlja razliku dovedene i odvedene toplote – sledi da je koristan rad u realnom nepovratnom ciklusu, kada se uporedi sa povratnim ciklusom, manji za iznos $T'' \Delta S_{1,S} = T'' \Delta S_{NEP}$. (površina označena sa Ir).



Slika 4.13 Uporedni prikaz Karnoovog i nepovratnog Džulovog ciklusa

Kao što se vidi koristan rad koji se predaje okolini u realnom ciklusu (u kome postoje nepovratnosti) razlikuje se od teorijski najvećeg mogućnog rada (korisnog rada u Karnoovom ciklusu) za veličinu proporcionalnu povećanju entropije usled nepovratnosti ($\Delta S_{I.S} = \Delta S_{NEP}$). Pri tome ulogu koeficijenta proporcionalnosti igra temperatura toplotnog ponora (može da se primeti da je to najniža temperatura u celokupno razmatranom sistemu). Ova temperatura je određena uslovima koji vladaju u sredini koja okružuje radnu supstanciju; to je dakle zadata veličina, kojom ne može da se upravlja. U tom smislu temperatura T'' može da se razmatra kao univerzalna konstanta T_0 (temperatura okolne sredine ili kraće – okoline). Zbog toga, kao što se vidi iz (4.42) veličina ΔS_{NEP} poprima poseban značaj jer, upravo je ona proporcionalna radu koji u ciklusu nije mogao da bude realizovan (odnosno, izgubljen je) – zbog nesavršenstva realnog radnog ciklusa toplotnog motora.

Očigledno je da je veličina ΔS_{NEP} , posle množenja sa zadatim nepromenljivim množiteljem T_0 , dobila smisao količinske mere one količine toplote koja je principijelno mogla da bude pretvorena u rad, ali je (usled različitih disipativnih efekata i zbog nepovratnosti ciklusa), transformisana u toplotu koja se odvodi u toplotni ponor, povećavajući onu količinu toplote koja inače mora da bude odvedena – da bi se realizovao permanentan i po želji dugotrajan (cikličan) rad motora. U određenom smislu ova činjenica je povezana sa ekološkim terminom koji se odnosi na dodatno, tj. povećano tzv. “toplotno zagađenje okoline”.

Razlika između maksimalno mogućnog i stvarnog rada u ciklusu, tj. rad koji zbog nepovratnosti realnog ciklusa ne može da bude realizovan (a teorijski, u principu, bi mogao da bude) – predstavlja jedan od pokazatelja stepena nesavršenstva takvog ciklusa i označava se kao *nepovratnost* ili *ireverzibilitet* (takođe prikazan na slici 4.13):

$$Ir = T_0 \Delta S_{NEP} \quad (4.43)$$

Izraz (4.33) se često u literaturi naziva *pravilom Gi-Stodola*, prema francuskom fizičaru Giju i slovačkom inženjeru Stodoli.

Ukazano pravilo Gi-Stodola u principu može da se primeni i na pojedinačne, odnosno neciklične procese koji se odvijaju npr. u pojedinim delovima nekog složenog postrojenja. Tako npr., primenjeno na procese koji se odvijaju u dva različita uređaja ili elementa, koja bi u nekom postrojenju imala istu ulogu, može da ukaže koji je od njih kvalitetniji (štedljiviji, ekonomičniji) – u energetsom (termodinamičkom) smislu.

Time što je izrazom (4.42) u eksplicitnom obliku ustanovljena veza između smanjenja korisnog efekta i količine generisane entropije usled nepovratnosti procesa, *pojam entropije* je poprimio još jedno značenje (ili lice). Termodinamička analiza je obogaćena novom idejom, kojom se omogućava razmatranje kvaliteta energijskih transformacija. Na taj način nepovratnost (ireverzibilitet) nekog procesa se povezuje sa tzv. *kvalitativnim gubicima* (ili gubicima na osnovu drugog zakona termodinamike), za razliku od tzv. *kvantitativnih gubitaka* (povezanih sa bilansiranjem po prvom zakonu termodinamike), pri čemu se ovi drugi najčešće odnose npr. ili na nesavršenost toplotne izolacije, ili na činjenicu da neki rad ili neka količina toplote – prema zahtevima procesa – moraju da budu odvedeni iz cilusa (postrojenja) što se, naravno, samo uslovno i simbolički razmatra kao “gubitak” odnosno kvantitativno smanjenje energije koja učestvuje u daljem toku transformacija. Očigledna je principijelna razlika između pomenute dve vrste gubitaka. U daljem će se ova ideja još više razvijati i produbljivati.

LEVOKRETNI KRUŽNI PROCESI

§ 80. Napred je pokazano da je za sve toplotne motore (mašine od kojih se dobija rad, pogonske mašine), karakteristično da se u njima odvijaju desnokretni kružni procesi (što se u dijagramima predstavlja kao niz procesa koji se odvijaju u smeru kazaljke na časovniku). Pri tome je količina toplote koja se u takvom ciklusu dovodi uvek veća od količine toplote koja se odvodi, i razlika ovih količina toplote predstavlja upravo koristan rad. Osim toga, kod toplotnih motora se, globalno posmatrano, toplota prenosi od toplotnog izvora, koji je na višoj temperaturi – na toplotni ponor, koji je na nižoj temperaturi. Ovo prenošenje nije direktno, tj. toplotni izvor i toplotni ponor nisu u direktnom kontaktu, već postoji posrednik – sistem, tj. radna supstancija – sa obaveznim svojstvom da poseduje dva stepena slobode (§ 10.). Rezultantna posledica je rashlađivanje određene grupe visokotemperaturskih tela uz istovremeno zagrevanje druge grupe niskotemperaturskih tela i pri tome, kao ciljani efekat, dobijanje mehaničkog rada, koji se u okolini može da koristi po nahodjenju.

Sada će se razmotriti proces koji se odvija u suprotnom smeru, dakle kao *levokretni kružni proces* (u smeru suprotnom od kazaljke na časovniku). U ovom slučaju čitava situacija se preokreće (slika 4.14). Toplota se sada dovodi radnom telu od određene grupe niskotemperaturskih tela i predaje grupi visokotemperaturskih tela, tj. toplotni izvor je sada na nižoj, a toplotni ponor na višoj temperaturi.

Na taj način, koristeći metod kružnih procesa, u sprezi sa mogućnošću uzajamnog, međusobnog pretvaranja toplotnih i mehaničkih interakcija, omogućeno je ostvarivanje procesa prenošenja toplote sa nižeg temperaturskog nivoa na viši temperaturski nivo – dakle procesa koji, na osnovu drugog zakona termodinamike, sam po sebi (samoproizvoljno) ne može da se obavlja. Rad koji, kao kompenzacija, treba od strane okoline da bude saopšten sistemu (radnoj supstanciji) predstavlja sada razliku u ciklusu odvedene i dovedene toplote. Odatle sledi da, prema energijskom bilansu, količina toplote koja se odvodi toplotnom ponoru, na višem temperaturskom nivou, predstavlja zbir dovedenog rada iz okoline i toplote dovedene od toplotnog izvora na nižem temperaturskom nivou. (Nije naodmet da se napomene da u procesu dovođenja toplote radno telo u većem delu ciklusa mora da ima nižu