

DK 536.7:662.61

Termodinamika kurilnih procesov

ZORAN RANT

Profesorju dr. ing. F. Bošnjakoviću ob šestdesetletnici

Namen kurjenja

Namen kurilnih procesov je različen: kurimo prostore ali sisteme, da jih s tem vzdržujemo na temperaturi, ki je višja od temperature okolice. Iz takih sistemov odteka toplota v okolico zaradi pomankljive izolacije ali pa zaradi fiziološko potrebne izmenjave zraka in to toploto nadomeščamo s kurjenjem. Določene spremembe na telesih se dajo doseči le pri višjih temperaturah n. pr. kovanje in varjenje kovin, razpad apnenca v apno in ogljikovo kislino ipd. Telesa je treba spraviti na višjo temperaturo; tudi tako »spravljanje na višjo temperaturo« ali segrevanje spada v kurilne procese. Nekatere spremembe teles zahtevajo dovod toplote ob natančno določenih višjih temperaturah n. pr. že omenjeno žganje apna, taljenje surovin za izdelavo stekla ipd., sèm sodi tudi vparjanje kapljev. Ne smemo pozabiti niti priprave jedi pri višjih temperaturah ali kuhanje.

Vsem kurilnim procesom je skupno dovajanje toplote telesom pri temperaturi, ki je višja — velikokrat znatno višja — od temperature okolice. Ta toplota se dovaja v kurjeno telo pretežno od zunaj — iz ognja, iz kurilne pare —, lahko pa se toplota ustvarja v sistemu samem n. pr. z elektriko (karbidna uporna peč, indukcijska toplota).

Kurilno toploto Q_k imenujemo tisto toploto, ki jo dovajamo kurjenemu sistemu ali kurjenemu telesu.

Kurilna eksergija in anergija

Kurilno toploto odvajamo iz toplega ali kurilnega telesa temperature T_t , ki je konstantna ali pa spremenljiva. Kurilno toploto dovajamo v kurjeno telo ob kurilni temperaturi T_k , ki je tudi lahko ali konstantna ali pa spremenljiva. Potek temperature T_t nad odvzeto toploto Q_k je temperaturna karakteristika kurilnega telesa

$$T_t = T_t(Q_k), \quad (1)$$

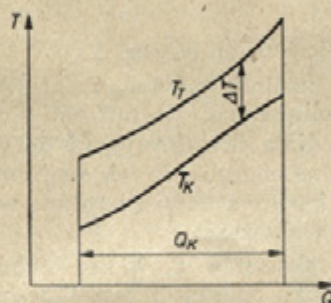
potek kurilne temperature T_k nad dovedeno toploto Q_k pa je temperaturna karakteristika kurjenega telesa ali sistema

$$T_k = T_k(Q_k) \quad (2)$$

Zaradi temperaturnih razlik ΔT , ki so potrebne za prenos toplote iz njenega vira v kurjeni sistem, mora temperaturna karakteristika kurilnega telesa

potekati vseskozi nad temperaturno karakteristiko kurjenega sistema (sl. 1).

Na sl. 2A vidimo temperaturno karakteristiko za kurjenje sistema ob spremenljivi (rastoči) temperaturi, na sl. 2B pa za kurjenje ob konstantni temperaturi. Temperatura dovoda toplote v kurjeni sistem je pogosto konstantna n. pr. pri kurjenju stanovanjskih prostorov.



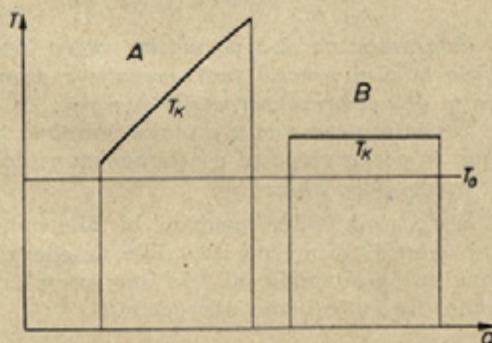
Slika 1

Kurilno toploto Q_k lahko ponazorimo v diagramu — T, S (sl. 3), v katerem nanašamo na ordinate temperaturo dovoda v kurjeni sistem, na abscise pa entropijo S , definirano z enačbo

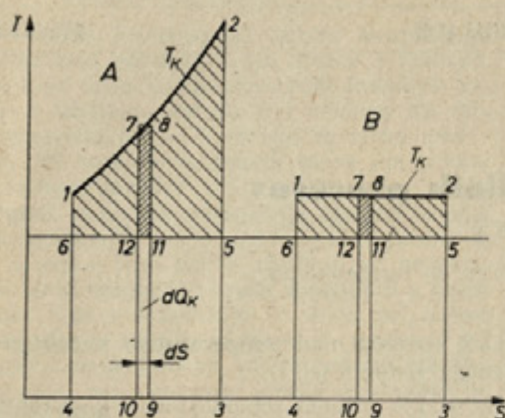
$$T_k dS = dQ_k \quad (3)$$

Količina kurilne toplote je enaka ploskvi pod temperaturo dovoda

$$Q_k = \int_1^2 T_k dS = \text{ploskev (1, 2, 3, 4)} \quad (4)$$



Slika 2



Slika 3

Kurilna toplota ima eksergijo E_k [1]

$$E_k = \int_1^2 (T_k - T_o) dS = \text{ploskev (1, 2, 5, 6)} \quad (5)$$

Eksergija E_k je kurilna eksergija.

Eksergiji kurilnih toplot sta na sl. 3 A in B enaki šrafiranim ploskvama. Nešrafirani ploskvi (5, 3, 4, 6) predstavljata brezeksergijski del kurilne toplote ali kurilne energije. Iz teh diagramov vidimo, da zahtevajo kurilni procesi energijo z natančno določenim delom eksergije.

Količina eksergije E , ki se nahaja v neki energiji W , lahko opišemo z brezdimenzijskim razmernikom

$$\bar{\varepsilon} = \frac{E}{W} \quad (6)$$

Ta razmernik se imenuje *eksergetična značajka* ali *eksergetično število* (kakor Reynoldsovo število) energije [2]. Kurilni procesi predpisujejo ne samo celoten $\bar{\varepsilon}$ za vse procese (sl. 3)

$${}_1\bar{\varepsilon}_2 = \frac{\text{ploskev (1, 2, 5, 6)}}{\text{ploskev (1, 2, 3, 4)}} \quad (7)$$

temveč tudi »lokalni« $\bar{\varepsilon}$ v posameznih diferencialnih procesa

$$\bar{\varepsilon} = \frac{dE}{dQ} = \frac{\text{ploskev (7, 8, 11, 12)}}{\text{ploskev (7, 8, 9, 10)}} \quad (8)$$

Iz diagramov na sl. 3 pa vidimo razen tega, da zahtevajo kurilni procesi tudi energijo z natančno določenim delom brezeksergetske energije. Ta energija je kurilnim procesom prav tako potrebna kakor eksergija in njena vloga ni v ničemer manjšega pomena, kakor vloga eksergije.

Iz čisto praktičnih razlogov bi bilo umestno dati tej energiji primerno ime. Ker ta energija ni sposobna opravljati dela, bi bilo ime *anergija** kar prikladno. Anergijo bomo označili z W_o .

* Kakor n. pr. anarhija, έργον (ergon) = delo (grški) α, αν (a, an) »alfa privativum« negira pojem.

Prišli smo torej do važnega spoznanja:

medtem ko je za termodinamične delovne procese pomembna zgolj eksergija in je anergija le nezaželen balast, zahtevajo kurilni procesi obe vrsti energije, in sicer v natanko določenem razmerju.

Pod vplivom čisto strojniškega gledanja se je udomačilo mnenje, da je energija brez eksergije, po naše torej anergija, neporaben in zaradi tega nepotreben del energije. Nekateri Francozi govore celo o »énergie non utilisable«. Pri delovnih procesih to sicer drži, so pa drugi procesi, ki vprav zahtevajo anergijo, v katerem primeru je anergija prav gotovo uporabljiva ali »utilisable«. Med take procese spadajo kurilni procesi.

Iz navedenih definicij izhaja:

$$W = E + W_o \quad (9)$$

in

$${}_1\bar{\varepsilon}_2 = \left| \frac{E}{E + W_o} \right|_1^2 \quad (10)$$

Kurilnemu procesu je treba dovajati »zmes« eksergije in anergije. Kako to zmes pripravimo, je za kurilni proces vseeno.

Eksergetska značajka kurilnih energij je lahko zelo različna. Nekateri kurilni procesi zahtevajo zelo malo eksergije. Primer zato je kurjenje prostorov pri nizkih konstantnih temperaturah. Za $T_k = 293 \text{ K (20 °C)}$ = konst in temperaturo okolice $T_o = 273 \text{ K (0 °C)}$ je

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{T_k - T_o}{T_k} = 0,068 \quad (11)$$

Podobno je pri vparjanju vode pri $T_k = T_s = 373 \text{ K (100 °C)}$ in enaki temperaturi okolice

$$\bar{\varepsilon}_k = 0,268 \quad (12)$$

Nasprotno pa zahteva kurjenje pri visoki temperaturi n. pr. $T_k = 1073 \text{ K (800 °C)}$ razmeroma veliko eksergijo

$$\bar{\varepsilon}_k = 0,745 \quad (13)$$

Viri eksergije in anergije

Eksergijo dobimo le iz tehniško pripravljenih virov energije: n. pr. pri vodnem padcu s turbinami, iz električnega toka, iz kinetične energije, iz goriv z zgorevanjem. Zaradi tega stane eksergija denar; le-ta je draga, včasih celo zelo draga. Eksergija pa je tudi dragocena. Njena zaloga v našem svetovnem sistemu je dokončna in ker jo v praktično izvajanih nepovračljivih termodinamičnih procesih stalno uničujemo [1], se njena nam razpoložljiva količina stalno zmanjšuje. Posledica nepovračljivih procesov je nepopravljiva škoda.

Najvažnejša naloga tehniške termodinamike je pokazati pota, kako bi se dalo to nepopravljivo uničevanje eksergije čim bolj omejiti.

Tipičen primer čiste anergije je kalorična notranja energija okolice. Okolica je povsod prisoten in neizčrpen vir anergije. Ta anergija je na voljo zastonj.

Anergijo dobimo lahko tudi iz eksergije. Vsaka nepovračljivost pretvarja eksergijo v anergijo. Kot primer navajamo prehod toplote pri končnih temperaturnih razlikah.

Črpanje anergije iz okolice je termodinamično pravilno; ta anergija je vendar zastonj. Pridobivanje anergije iz eksergije pa je termodinamično napačno; ta anergija seveda ni zastonj, saj smo jo napravili iz plačane eksergije.

Načini kurjenja

Možni načini kurjenja se razlikujejo po tem, kako pripravimo kurilno zmes eksergije in anergije.

Imamo dve načelni možnosti:

ali si pripravimo kurilno energijo tako, da v pravilnem razmerju »pomešamo« eksergijo in anergijo,

ali pa si pripravimo kurilno energijo tako, da energiji, katere eksergetška značajka $\mathcal{E}_T$ je večja od eksergetške značajke $\mathcal{E}_k$ kurilne energije, odvzamemo presežek eksergije ali pa da ta presežek uničimo oziroma pretvorimo v anergijo.

Mešanje anergije in eksergije s toplotno pumpo

Diagram — T, S idealne toplotne pumpe je narisana na sl. 4, na sl. 5 pa shema take naprave. V napravi se odvija levi krožni proces z delovno snovjo, ki spada v skupino »hladilnih« sredstev. Ta proces poteka v območju mokre pare.

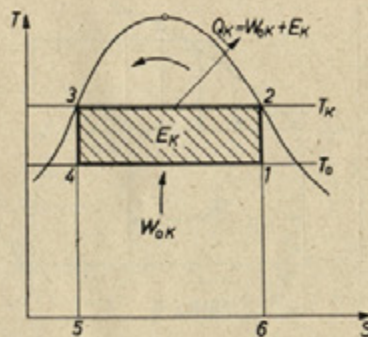
Ob preobrazbi 4,1 dovajamo v parjalniku P toploto iz okolice ob temperaturi okolice T_0 . Okolici odvzamemo kalorično notranjo energijo ali anergijo W_{ok} . Pri tem se večji del delovne snovi v pari. Nato sledi izentropna kompresija 1,2 v kompresorju K, pri čemer se poviša temperatura delovne snovi na kurilno temperaturo T_k . Za kompresijo se porabi delo ${}_1W_2$. V kondenzatorju (radiatorju) Kd se delovna snov vkapa — preobrazba 2,3 in pri tem odvaja v kurjeni sistem kurilna toplota Q_k . Slednjič se delovna snov z izentropno ekspanzijo 3,4 vrača v začetno stanje 4. Ta preobrazba poteka v ekspanzijskem stroju EKs in daje delo ${}_3W_4$. Iz diagrama — T, S izhaja

$$W_{ok} = \text{ploskev (1, 4, 5, 6)}$$

$$|{}_1W_2| - {}_3W_4 = E_k = \text{ploskev (1, 2, 3, 4)} \quad (14)$$

$$Q_k = W_{ok} + E_k = \text{ploskev (2, 3, 5, 6)}$$

V praksi izvedeni krožni proces toplotne pumpe odstopa od opisanega idealnega procesa. Odstopki



Slika 4

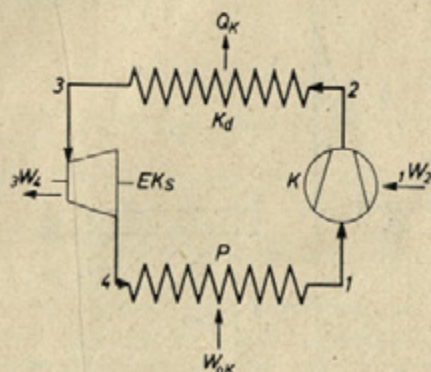
so sicer praktično pomembni, za razumevanje bistva procesa pa jih ni niti potrebno niti kazno upoštevati.

Rezultat prednjega pa je dokaj presenetljiv, čeprav je v vsem čisto enostaven in logičen: s krožnim procesom 1, 2, 3, 4 je uspelo brezplačno anergiji okolice W_{ok} primešati eksergijo E_k in tako pripraviti kurilno zmes eksergije in anergije. Idealizirani postopek je v vseh delih povračljiv in zaradi tega optimalen. Ta kurilni proces porablja minimalno količino dragocene in plačane eksergije, kurilno anergijo pa črpa v celoti iz brezplačnega vira, iz okolice.

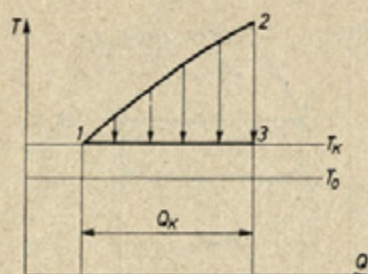
Pravi kurilni proces s toplotno pumpo pa se približuje optimalnemu tem bolj, čim manjše so nepovračljivosti v krožnem procesu ter pri dovodu toplote iz okolice v proces in pri odvodu toplote iz njega.

Direktno kurjenje z ognjem

Najenostavnejši in zdaj še najbolj rabljeni način kurjenja je direktno kurjenje z ognjem. V odprtih ognjiščih, v štedilnikih, v pečeh pa tudi v kotlih centralnih kurjav kurimo neposredno z »ognjem«. Tu je treba razlikovati dva procesa: zgorevanje in kurjenje. Pri zgorevanju se kemična notranja energija goriv pretvarja v kalorično notranjo energijo produktov zgorevanja, dimnih plinov. Ta kalorična energija dimnih plinov se črpa iz njih z ohlajanjem in prenaša v kurjeni sistem kot ku-



Slika 5



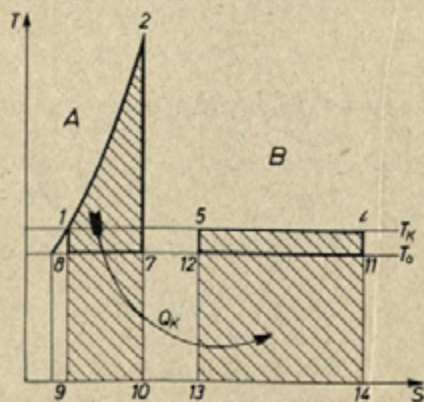
Slika 6

rilna toplota. Ta drugi proces je kurilni proces in le z njim se bomo ukvarjali natančneje.

Proces zgorevanja je proces zase in o njem povemo le to, da je v današnji domači in tehniški izvedbi zelo nepovračljiv. V produktih zgorevanja imamo le del eksergije, ki smo jo dovedli v proces z gorivom [2, 4, 5]. Eksergetski izkoristek praktičnega zgorevanja leži med 0,75 in 0,25.

Dimnim plinom odvezemo kurilno toploto izobarno ob tlaku okolice. Na sl. 6 vidimo diagram — T, Q kurilnega procesa. Krivulja 2,1 je temperaturna karakteristika ali hladilna krivulja dimnih plinov od najvišje temperature zgorevanja T_2 do kurilne temperature T_k . Ta je v tem primeru konstantna. V idealnem primeru lahko ohladimo dimne pline prav do kurilne temperature T_k in jim odvezemo kurilno toploto Q_k . Ta toplota prehaja v kurjeni sistem začeniši od stanja 2 pretežno ob velikih temperaturnih razlikah, ki se zmanjšujejo na majhne vrednosti šele v bližini stanja 1. Če na prvi pogled lahko ocenimo, da so nepovračljivosti tega prehoda zelo velike.

To vidimo lepo iz diagrama — T, S tega postopka (sl. 7). Proces A predstavlja odvoz kurilne toplote iz zgorelih plinov od temperature T_2 do temperature T_k . Ta kurilna toplota Q_k je enaka diagramski ploskvi (2, 1, 9, 10). Eksergija kurilne toplote pri odvzemu iz plinov E_p je enaka ploskvi (2, 1, 8, 7), njena anergija W_{op} pa je enaka ploskvi (7, 8, 9, 10). Dovod toplote v kurjeni sistem pa vi-



Slika 7

dimo v diagramu B. V sistem dovedena toplota je enaka plinom odvzeti. Kurilna toplota je enaka ploskvi (4, 5, 13, 14). Kurilna eksergija E_k pa je enaka ploskvi (4, 5, 12, 11). Samo to eksergijo sprejema kurilni proces, ostanek kurilne toplote je anergija W_{ok} , ploskev (11, 12, 13, 14). Vidimo, da je

$$E_p > E_k \text{ velikokrat celo } E_p \gg E_k$$

$$W_{op} < W_{ok} \text{ in}$$

$$E_p + W_{op} = E_k + W_{ok} \quad (15)$$

$$\Xi_p > \Xi_k$$

V tem primeru smo kurilno »zmes« eksergije in anergije pripravili tako, da smo vzeli kot izhodišče energijo z večjim eksergetskim številom Ξ , kakor ga zahteva kurilni proces. Presežek eksergije smo nepovračljivo pretvorili v anergijo. Ta pretvorba poteče nekako avtomatično v temperaturnem padcu med virom toplote in kurjenim sistemom.

Termodinamično je ta kurilni postopek prav gotovo zelo slab, saj smo del kurilne anergije napravili iz drago plačane eksergije. Ta del W_{oe} je enak

$$W_{oe} = W_{ok} - W_{op} \quad (16)$$

Ostali del kurilne anergije W_{op} pa je bil že v dimnim plinom odvzeti energiji.

Eksergetski izkoristek takega kurjenja se suče nekje okoli vrednosti 0,07. Velika prednost tega načina kurjenja pa je njegova enostavnost in še to, da je povsod izvedljivo brez posebnih tehniških naprav.

Direktna kurjava z električnim tokom

Energija električnega toka W_e je zgolj eksergija. Kadar kurimo z električnim tokom, si moramo pripraviti vso kurilno anergijo iz eksergije toka E_e . Za tako kurjavo velja:

$$E_e > E_k$$

$$W_{oe} = 0$$

$$E_e = E_k + W_{ok} \quad (17)$$

$$\Xi_e = 1 > \Xi_k$$

W_{oe} je anergija električnega toka, Ξ_e pa je eksergetsko število električnega toka. Direktna kurjava z električnim tokom je s čisto termodinamičnega vidika zelo slab proces. Seveda je stopnja te slabosti zelo odvisna od eksergetskega števila kurilne toplote Ξ_k . Pri majhnih Ξ_k je treba razmeroma zelo veliko anergije pridobiti iz eksergije in narobe. Pri kurjavi prostora ob 20 °C se n. pr. pretvori 0,932 dovedene eksergije v anergijo [formula (11)], pri segrevanju ob temperaturi 800 °C pa le še 0,255 [formula (13)].

Povračljivi odvzem odvečne eksergije iz dimnih plinov

Kurjenje z ognjem lahko izboljšamo tako, da presežka eksergije v dimnih plinih ne pretvarjamo v kurilno anergijo, temveč ga povračljivo odvzamemo in izkoristimo n. pr. za opravljanje dela ali za proizvod električne energije.

Na sl. 8 imamo pod B spet narisano kurilni proces, kakršnega smo študirali že na sl. 7; količino dimnih plinov odmerimo sedaj tako, da je »entropijska širina« S iz njih odvzete toplote enaka entropijski širini kurilnega procesa (A na sl. 8). V toploti iz dimnih plinov nahajamo sedaj toliko anergije, kolikor je potrebuje kurilni proces, kar se takoj vidi s slike:

$$W_{op} = \text{ploskev (7, 8, 9, 10)} = W_{ok} = \text{ploskev (11, 12, 13, 14)} \quad (18)$$

Eksergija iz dimnih plinov odvzete energije pa je večja kakor kurilna eksergija.

$$E_p = \text{ploskev (2, 1, 8, 7)} > E_k = \text{ploskev (4, 5, 12, 11)} \quad (19)$$

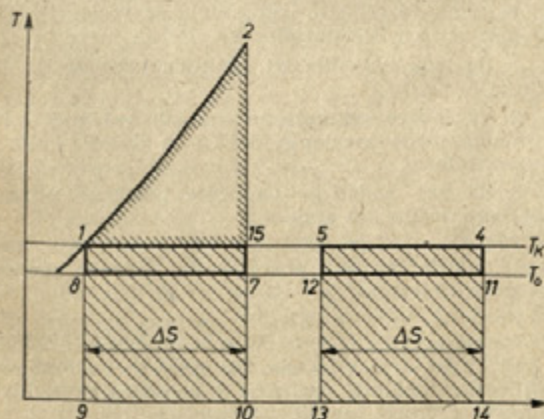
Presežek eksergije ΔE je

$$\Delta E = E_p - E_k = \text{ploskev (2, 1, 15)} \quad (20)$$

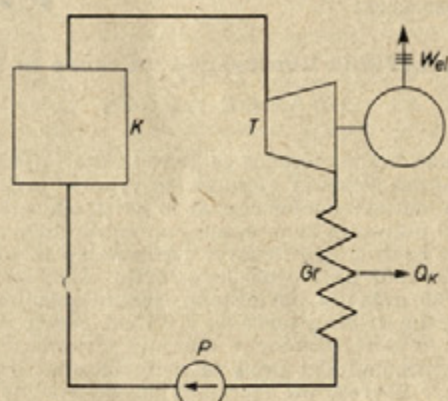
Presežek eksergije ΔE lahko odvezamo energiji dimnih plinov z delovnim (desnim) krožnim procesom (2, 15, 1), ki ga vključimo brez vrzeli med preobrazbo odvzema toplote iz dimnih plinov in dovoda toplote v kurilni proces. Tak krožni proces daje delo W_{kr} , ki je enako presežku eksergije

$$E_{kr} = \Delta E, \quad (21)$$

iz krožnega procesa odvedena toplota (15, 1, 9, 10) pa je kongruentna kurilni toploti (4, 5, 13, 14). Tako smo si povračljivo pripravili pravilno kurilno zmes energije. Dognali pa smo tudi, da so desni krožni procesi ločilniki eksergije od anergije.



Slika 8



Slika 9

Na ideji opisanega procesa so zasnovane moderne toplotarne za kombiniranje kurjenja in proizvodnje električne energije. Namen takih naprav je, pripraviti kurilno energijo na pravilen način, torej racionalizirati kurjenje. Velikokrat pa se trdi, da je namen toplotarn proizvodnja cenene električne energije. Kdor se je poglobil v izvajanja tega članka, razume, da je ta trditev in vse, kar se iz nje zaključuje, seveda napačno.

V praksi ni mogoče vključiti delovnega krožnega procesa brez vrzeli med toplotni karakteristiki dimnih plinov in kurilnega procesa. Pri vključitvi parnega delovnega procesa obstajajo ob karakteristiki dimnih plinov precejšnje vrzeli, medtem ko teh pri odvodu toplote skoraj ni. Pri procesih plinskih turbin pa je ravno narobe. Tu ni vrzeli na zgornji strani, razmere na kurilnem koncu procesa pa so slabše. Za velike naprave obeta kombinacija plinskega in parnega procesa veliko izboljšanje.

Na sliki 9 vidimo shemo parne toplotarne. Z dimnim plinom odvzeto toploto proizvajamo v kotlu K paro. Ta para ekspandira v parni turbini T na kurilni temperaturi T_k ustreznosti tlak nasičenosti. Pri tem pridobimo električno energijo W_{el} . Para kondenzira v grelniku Gr in odda pri tem kurilno toploto Q_k z zahtevanim ε_k . Skozi napajalno pumpo P se voda vrača v kotel.

Literatura:

- [1] Rant, Z.: Vrednost in obračunavanje energije, SV 1 (1955), str. 4/7.
- [2] Rant, Z.: Der Einfluss der Luftvorwärmung auf die Nichtumkehrbarkeiten der Verbrennung, BWK 13 (1961), str. 496/500.
- [3] Rant, Z.: Vrednotenje energije v tehniški praksi, SV 2 (1956), str. 111/15.
- [4] Rant, Z.: Eksergija goriv, SV 5 (1959), str. 161/63.
- [5] Rant, Z.: Exergiediagramme für Verbrennungsgase, BWK 12 (1960), str. 1/8.

Avtorjev naslov: prof. dr. ing. Zoran Rant, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani