

UDK 621.165

## Plinska turbina in okolje

MARKO PERKAVEC

Profesorju Borisu Černigoju ob 75-letnici

### 1. UVOD

Že kmalu po letu 1960 je skrb za okolje postala v javnosti tako pomemben dejavnik, da so morali izdelovalci plinskih turbin napeti vse sile, da bi zmanjšali količino škodljivih snovi v izpušnih plinih plinskih turbin. Pri tem je šlo predvsem za dušikove okside ( $\text{NO}_x$ ), ki nastajajo pri zgorevanju goriva v zgorevalni komori plinske turbine.

Najprej je bilo treba raziskati mehanizme zgorevanja, da bi lahko spoznali, kdaj dušikovi oksidi nastanejo, katere razmere ta nastanek pospešujejo in katere ga zavirajo. Potem je bilo treba poskusiti s konstruktivnimi prijemi nastanek dušikovih oksidov zmanjšati na najmanjšo mogočo mero (npr. z vbrizgavanjem pare ali pa vode).

Pri plinskih turbinah, ki so uporabljale za gorivo zemeljski plin, so se uspehi dokaj hitro pokazali in takratna pričakovanja glede zmanjšanja količine dušikovih oksidov so bila razmeroma hitro izpolnjena. Sledile so plinske turbine na lahko kurilno olje in na začetku sedemdesetih let je bilo mogoče pričakovati v obeh primerih emisijo 75 ppmvd\* pri 15%  $\text{O}_2$  Nm<sup>3</sup> pod pogojem, da je bilo izvedeno vbrizgavanje pare ali pa vode v zgorevalno komoro. Pri tem je znašala za dosego teh vrednosti potrebna količina vode približno polovico količine goriva. Ugotovili so, da se je pri tem moč plinske turbine povečala za približno 3%, da pa se je obenem povečala tudi specifična poraba goriva za 1,8% (to pomeni, da se je termični izkoristek plinske turbine zmanjšal za enako vrednost).

Ameriška agencija za varstvo okolja EPA (Environmental Protection Agency) je nato te vrednosti prevzela kot mejne vrednosti za vse na novo instalirane plinske turbine. Za plinske turbine s termičnim izkoristkom nad 25% je bila predvidena domenjena vrednost, pri uporabi olja z vezanim dušikom pa so bile dovoljene večje vrednosti.

Tehniko vbrizgavanja pare oziroma vode so v naslednjih letih izpopolnili tako, da je agencija za varstvo okolja v Kaliforniji konec sedemdesetih let te mejne vrednosti lahko poostrila na 42 ppmvd pri 15%  $\text{O}_2$ . Za dosego teh vrednosti je bilo treba vbrizgati v zgorevalno komoro približno toliko vode, kolikor

je bilo goriva. Moč plinske turbine se je pri tem povečala za 5 odstotkov, termični izkoristek pa se je zmanjšal za 3 odstotke.

S preizkusi so ugotovili, da se pri nadaljnjem večanju količine vbrizgane pare pojavljajo težave s stabilnostjo plamena (predvsem pri obratovanju plinske turbine z delno močjo) in pri vbrizgavanju vode dodatno še precejšnja nihanja tlaka v zgorevalni komori. Zato so napore za zmanjšanje količine škodljivih snovi v izpušnih plinih v naslednjih letih usmerili na druge možnosti. Razvili so postopke s stopnjevitim dovodom zraka za zgorevanje na eni in s stopnjevitim dovodom goriva na drugi strani.

Danes imamo na voljo zgorevalne sisteme za plinske turbine, ki delajo po enem izmed teh postopkov (t.i. suhi postopek za zmanjšanje emisij) in omogočajo dosego zelo nizkih vrednosti za emisijo dušikovih oksidov.

### 2. NASTANEK ŠKODLJIVIH EMISIJ

Izpušni plini plinskih turbin vsebujejo več škodljivih snovi, in sicer take, za katere je kriva plinska turbina in take, ki so odvisne od kakovosti goriva. Med prve spadajo dušikovi oksidi, ogljikov monoksid in nezgoreli ogljikovodiki, med druge pa žveplov oksidi in trdni delci (pepel).

V tem članku se bomo ukvarjali z emisijami, za katere je kriva plinska turbina. Ker je količina nezgorelih ogljikovodikov v izpušnih plinih negovane plinske turbine neznatna (manj ko 10 ppmvd), se bomo v nadaljnjem omejili na dušikove okside ( $\text{NO}_x$ ) in na ogljikov monoksid (CO).

#### 2.1 Emisija dušikovih oksidov

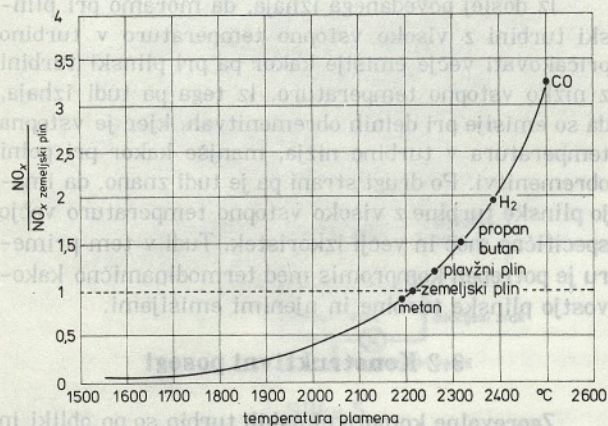
Nastanek dušikovih oksidov poteka pri zgorevanju v zgorevalni komori plinske turbine v treh smereh:

- termični,
- primarni in
- dušikovi oksidi iz dušika, vezanega v gorivu.

Za nastanek *toplotnih* dušikovih oksidov je odločujoča koncentracija atomarnega kisika O, ki nastane zaradi disociacije iz  $\text{O}_2$ . Ta disociacija je zelo intenzivna pri temperaturah plamena nad 1300 °C. Prav tako je tudi hitrost reakcije močno odvisna od temperature, tako da oba vpliva skupaj povzročita zvišanje emisij dušikovih oksidov z višanjem temperature plamena.

\* V ZDA je v uporabi kot enota za emisije ppmvd (parts per million, volume, dry), ki jo lahko preračunamo v mg/Nm<sup>3</sup> s faktorjem iz molne mase deljene z molno prostornino. Ta faktor znaša za  $\text{NO}_2$  2,05.

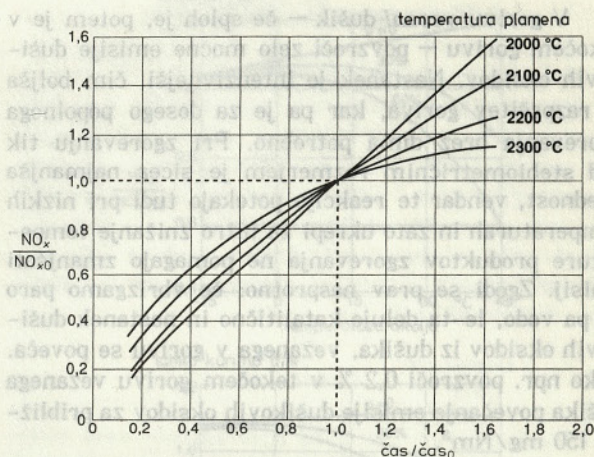
Raziskave so pokazale, da se emisije dušikovih oksidov s temperaturo plamena eksponentno večajo. Kakor je razvidno s slike 1, se povečajo emisije za 20 odstotkov, če se temperatura plamena poviša za 50 °C nad 2200 °C, ki jih ima plamen zemeljskega plina. Če se temperatura plamena poveča za nadaljnjih 50 °C, znaša povišanje emisij že skoraj 50 odstotkov. Znano je, da je temperatura plamena pri zgorevanju različnih plinov različno visoka: ogljikov monoksid zgoreva pri približno 2500 °C, vodik pri 2370 °C in propan oziroma butan pri 2300 °C. Torej je treba pri uporabi teh plinov pričakovati višje emisije dušikovih oksidov kakor pa pri uporabi zemeljskega plina. Tako npr. so emisije dušikovih oksidov pri uporabi utekočinjenega plina (navadno propan in/ali butan) tudi do 50 odstotkov višje kakor pri zemeljskem plinu. Pri mešanicah plinov je temperatura plamena odvisna od posameznih komponent in s tem so tudi emisije dušikovih oksidov močno odvisne od sestave plinske mešanice.



Slika 1

Za nastanek dušikovih oksidov pa je potreben čas. Torej je mogoče emisije zmanjšati, če poskrbimo, da je pot delcev skozi območje visoke temperature čim krajša. Kakor prikazuje slika 2, je odvisnost emisij od časa v območju visoke temperature pri razmeroma nizkih temperaturah plamena skoraj linearna, medtem ko je pri visokih temperaturah plamena odvisnost zelo položna; omembe vredno znižanje emisij je mogoče le z močnim skrajšanjem časa v območju visoke temperature. To skrajšanje je mogoče na eni strani s konstruktivno spremembo zgorevalne komore (naj bi bila kratka) in na drugi strani s tem, da produkte zgorevanja čimprej ohladimo na temperaturo vstopa v prvo stopnjo turbine. To ohladitev lahko izvedemo s tem, da primešamo ali sekundarni zrak ali pa drug medij (npr. paro ali vodo).

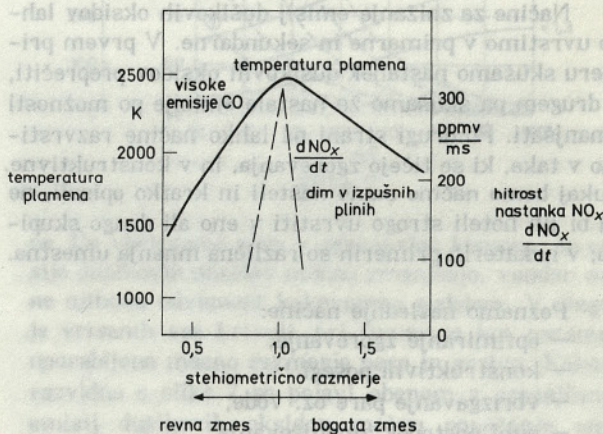
Nastanek toplotnih dušikovih oksidov pa je odvisen tudi od razmerja goriva in zraka med zgorevanjem; blizu stehiometričnega razmerja ( $\lambda = 0,95$ )



Slika 2

je temperatura plamena najvišja, v smeri revne kakor tudi bogate zmesi pa se znižuje. Temu ustrezno so emisije odvisne od zmesi.

Študij mehanizmov zgorevanja pa je pokazal, da je tudi hitrost nastajanja dušikovih oksidov največja pri zgorevanju pri stehiometričnem razmerju in da se v smeri revne kakor tudi v smeri bogate zmesi zmanjšuje. Torej naj bi zgorevanje ne potekalo blizu stehiometričnega razmerja. Vendar so preizkusi prinesli razočaranje; pri zgorevanju bogate zmesi se razvija dim in pri zgorevanju revne zmesi ostaja zgorevanje ogljikovodikov pri ogljikovem monoksidu. Pomisliti je namreč treba, da zgorevanje pri delni moči poteka pri zelo revni zmesi, če plinska turbina že pri polni moči dela z revno zmesjo. Temperatura plamena je v tem primeru tako nizka, da zgorevanje obstane pri CO. Na sliki 3 so te razmere prikazane grafično.



Slika 3

Nastanek primarnih dušikovih oksidov je predvsem odvisen od razmerja zraka in goriva med zgorevanjem; pri velikem presežku zraka nastajajo radikali, ki reagirajo z dušikom in kisikom in tvorijo  $\text{NO}_x$ .

V gorivu *vezani* dušik — če sploh je, potem je v tekočem gorivu — povzroči zelo močne emisije dušikovih oksidov. Nastanek je intenzivnejši, čim boljša je razpršitev goriva, kar pa je za doseg popolnega zgorevanja brez dima potrebno. Pri zgorevanju tik pod stehiometričnim razmerjem je sicer najmanjša vrednost, vendar te reakcije potekajo tudi pri nizkih temperaturah in zato okrepi za hitro znižanje temperature produktov zgorevanja ne pomagajo zmanjšati emisij. Zgodi se prav nasprotno: če vbrizgamo paro ali pa vodo, le-ta deluje katalitično in nastanek dušikovih oksidov iz dušika, vezanega v gorivu se poveča. Tako npr. povzroči 0,2 % v tekočem gorivu vezanega dušika povečanje emisije dušikovih oksidov za približno 150 mg/Nm<sup>3</sup>.

## 2.2 Emisije ogljikovega monoksida

Ogljikov monoksid nastane po eni strani v primeru bogate zmesi zaradi pomanjkanja kisika, nepopolne zmesi gorilnega plina in zraka oziroma nepopolne razpršitve tekočega goriva in po drugi strani v primeru revne zmesi zaradi nizke temperature plamena.

Ker poteka zgorevanje ogljika v ogljikov monoksid razmeroma hitro in zgorevanje ogljikovega monoksida v dioksid precej počasi, ima tudi čas delcev v območju visoke temperature močan vpliv na nastanek ogljikovega monoksida: pri kratkem času obstane zgorevalni proces pri ogljikovem monoksidu in le, če je časa dovolj, nastane iz njega dioksid. Vpliv je torej prav nasproten kakor pri dušikovih oksidih.

## 3. NAČINI ZA ZNIŽANJE EMISIJ DUŠIKOVIH OKSIDOV

Načine za znižanje emisij dušikovih oksidov lahko uvrstimo v primarne in sekundarne. V prvem primeru skušamo nastanek dušikovih oksidov preprečiti, v drugem pa skušamo že nastale emisije po možnosti zmanjšati. Po drugi strani pa lahko načine razvrstimo v take, ki se tičejo zgorevanja, in v konstruktivne. Tukaj bomo načine samo našteali in kratko opisali, ne da bi jih hoteli strogo uvrstiti v eno ali drugo skupino; v nekaterih primerih so različna mnenja umestna.

Poznamo naslednje načine:

- optimiranje zgorevanja,
- konstruktivni posegi,
- vbrizgavanje pare oz. vode,
- suhi postopek zmanjševanja,
- selektivno katalitični postopek in
- katalitično zgorevanje.

### 3.1 Optimiranje zgorevanja

Ker naj bi plinska turbina obratovala pod zelo različnimi obremenitvami in naj bi pri tem v nobeni

obratovalni točki emisije ne prekoračile dopustnih vrednosti, je optimiranje zgorevanja zelo pomembno za doseg majhnih emisij.

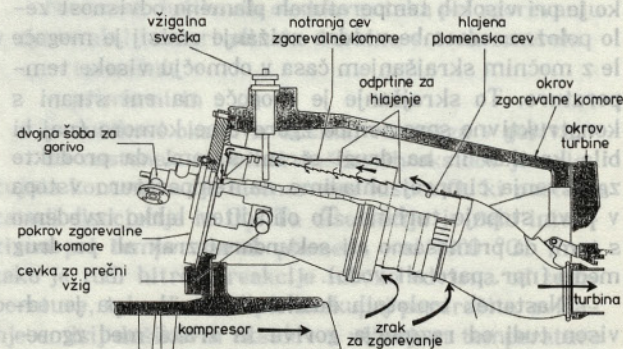
Plinska turbina ima (razen strojev z vrtiljivimi vstopnimi lopaticami) pri vseh obremenitvah približno enak pretok zraka in obratuje celo pri polni obremenitvi z velikim presežkom zraka. Torej je treba izbrati za režim polne obremenitve točko v revnem razmerju blizu stehiometričnega razmerja, da bi dosegli pri nizkih obremenitvah še vedno zadovoljiva zračna razmerja in bi bil plamen stabilen. Preostali zrak dovajamo v zgorevalno komoro kot sekundarni zrak za hlajenje zgorevalnih plinov, in sicer za mestom, kjer je zgorevanje končano.

To hlajenje pa ne sme iti predaleč, kajti ob vstopu v prvo stopnjo turbine moramo imeti določeno temperaturo zgorevalnih plinov, ki določa koristno moč turbine in njen izkoristek. Hlajenje mora biti enakomerno, da ne bi pri vstopu v prvo stopnjo turbine dobili temperaturnih profilov, ki bi ogrožali nje-lapatice.

Iz doslej povedanega izhaja, da moramo pri plinski turbini z visoko vstopno temperaturo v turbino pričakovati večje emisije kakor pa pri plinski turbini z nizko vstopno temperaturo. Iz tega pa tudi izhaja, da so emisije pri delnih obremenitvah, kjer je vstopna temperatura v turbino nižja, manjše kakor pri polni obremenitvi. Po drugi strani pa je tudi znano, da imajo plinske turbine z visoko vstopno temperaturo večjo specifično moč in večji izkoristek. Tudi v tem primeru je potreben kompromis med termodinamično kakovostjo plinske turbine in njenimi emisijami.

### 3.2 Konstruktivni posegi

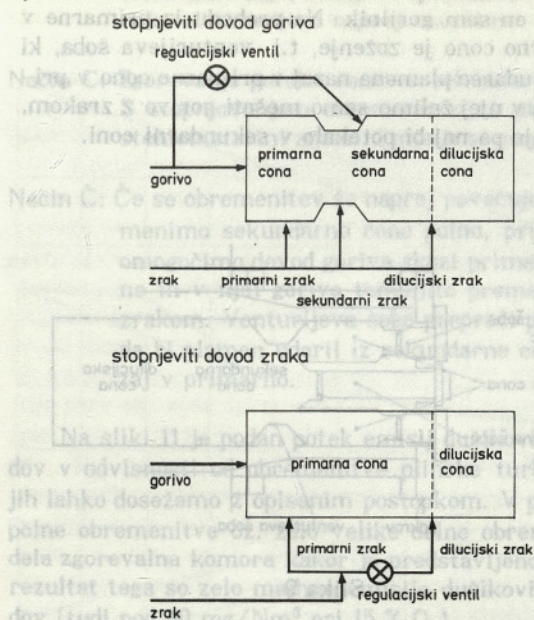
Zgorevalne komore plinskih turbin so po obliki in razporeditvi lahko zelo različne: nekateri izdelovalci se odločajo za eno ali dve veliki zgorevalni komori v obliki silosa, ki sta nameščeni nad plinsko turbino ali pa ob njej, drugi pa se odločajo za več manjših zgorevalnih komor, ki so nameščene koncentrično okrog plinske turbine. In spet tretji se odločajo — predvsem pri majhnih plinskih turbinah in letalskih motorjih — za obročne zgorevalne komore. Na sliki 4 je prikazana ena od koncentrično nameščenih zgorevalnih komor.



Slika 4

Konstruktivni posegi so mogoči v več smereh: po eni strani lahko poskrbimo za to, da je pot skozi komoro kar najbolj kratka, po drugi strani za to, da zgorevalne pline takoj ohladimo, čim je doseženo popolno zgoretje goriva in ne nazadnje, da je dovod goriva oz. dovod zraka stopnjeviti. Seveda so tudi kombinacije teh rešitev mogoče in vodijo k nadaljnjemu zmanjšanju emisij dušikovih oksidov.

Različni izdelovalci plinskih turbin sledijo različnim filozofijam, npr. eni uporabljajo stopnjeviti dovod goriva in kar najhitreje hlajenje zgorevalnih plinov in drugi uporabljajo stopnjeviti dovod zraka in hlajenje zgorevalnih plinov. Ti postopki so shematsko prikazani na sliki 5.

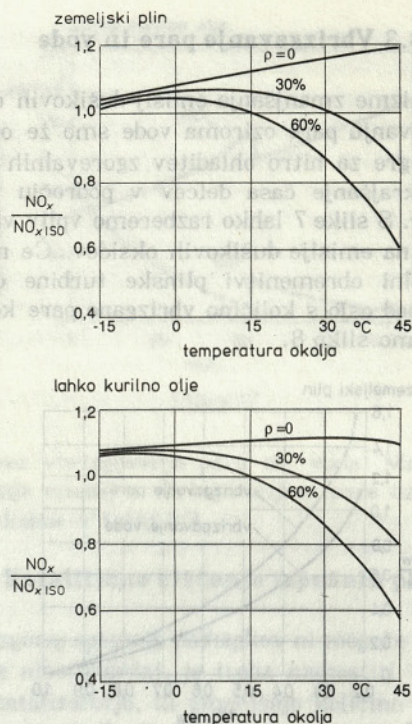


Slika 5

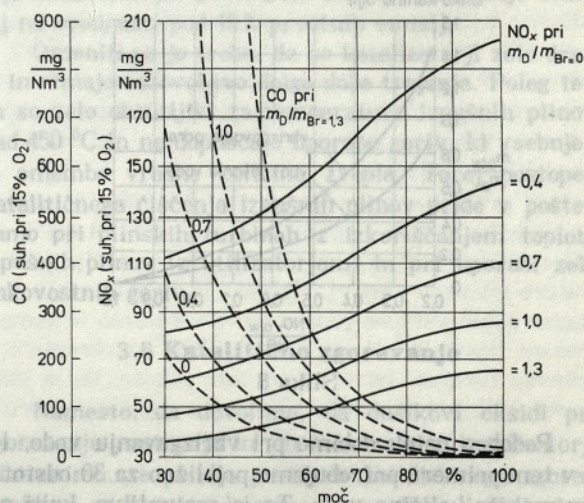
Na splošno velja, da je lažje izvesti regulacijo stopnjevitega dovoda goriva kakor pa stopnjeviti dovod zraka (količine, ki jih je treba regulirati, so manjše). Razen regulacijskega ventila za dovod goriva niso potrebni premični deli.

Emisije pa niso odvisne samo od temperature plamena, vstopne temperature v turbino, od konstruktivne izvedbe zgorevalne komore, ampak tudi od temperature okolja in relativne vlage v njem. Na sliki 6 je podan tipičen primer za odvisnost emisij dušikovih oksidov od okolja: pri dani visoki relativni vlagi lahko pri visokih temperaturah okolja pričakujemo občutno manjše emisije dušikovih oksidov, kajti pri visokih temperaturah vsebuje vlažen zrak razmeroma veliko količino vode, ki ima podoben učinek kakor voda, ki jo vbrizgamo v zgorevalno komoro z namenom, da bi zmanjšali emisijo dušikovih oksidov.

Poleg tega so emisije dušikovih oksidov odvisne tudi od obremenitve plinske turbine. Na sliki 7 je predstavljena odvisnost emisij dušikovih oksidov in ogljikovega monoksida od obremenitve plinske turbi-



Slika 6



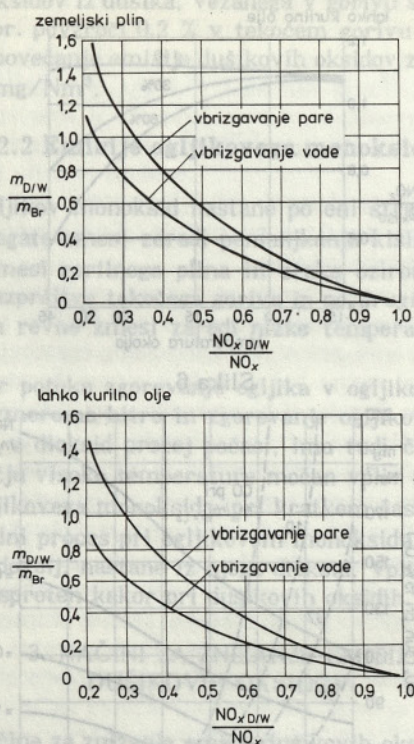
Slika 7

ne. Če vbrizgamo paro v zgorevalno komoro, se emisije dušikovih oksidov močno zmanjšajo, vendar ostane njihova odvisnost kakovostno podobna. V diagram je vrisanih več krivulj, pri čemer je kot parameter uporabljeno masno razmerje pare in goriva. Kakor je razvidno s slike 7 se pojavi obenem z zmanjšanjem emisij dušikovih oksidov močno povečanje emisij ogljikovega monoksida, in to tem bolj, čim več pare smo vbrizgali.

To lahko po eni strani razložimo z zelo revno zmesjo pri majhnih obremenitvah in po drugi strani z razmeroma intenzivnim hlajenjem plinov z vbrizgano paro; v nekaterih primerih gre to celo tako daleč, da niti zgorevanje ni več popolno.

### 3.3 Vbrizgavanje pare in vode

Mehanizme zmanjšanja emisij dušikovih oksidov pri vbrizgavanju pare oziroma vode smo že omenili: v glavnem gre za hitro ohlajitev zgorevalnih plinov, torej za skrajšanje časa delcev v področju visokih temperatur. S slike 7 lahko razberemo vpliv vbrizgavanja pare na emisije dušikovih oksidov. Če nanese-mo pri polni obremenitvi plinske turbine odbrane vrednosti nad osjo s količino vbrizgane pare kot me- rilom, dobimo sliko 8.



Slika 8

Podoben potek dobimo pri vbrizgavanju vode, le da v tem primeru potrebujemo približno za 30 odstotkov manjšo količino vode. To je razumljivo, kajti po eni strani je temperatura vode nižja od temperature pare in po drugi strani odvzame voda zgorevalnim plinom toploto tudi za izparevanje.

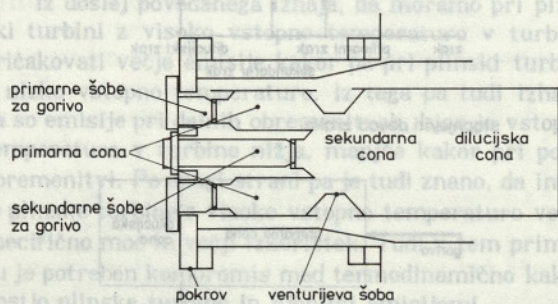
Iz diagrama pa je tudi razvidno, da nadaljnje stopnjevanje vbrizgavanja pare oziroma vode ni več primerno; krivulja postane pri zmanjšanju emisij na vrednosti pod 30 odstotki zelo strma in nadaljnje večanje vbrizgane količine ne prinese več zelenega uspeha, pač pa povzroči nestabilnost plamena, ki je pri majhnih obremenitvah plinske turbine tako problematična, da predstavlja mejo uporabnosti tega postopka.

### 3.4 Suh postopek

Težave s stabilnostjo plamena so se pojavile že zelo zgodaj v razvoju postopka za vbrizgavanje pare

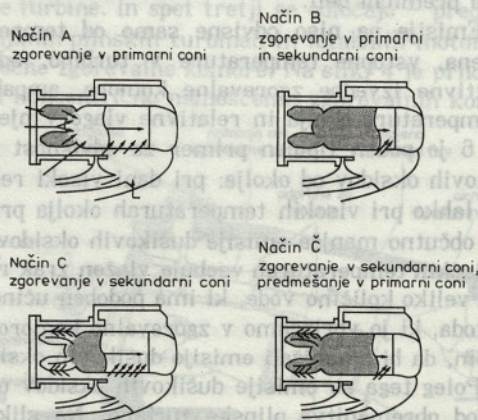
oz. vode, zato so se že takrat začeli ukvarjati z alternativnimi postopki. Kakor smo že omenili, lahko pri tem sledimo različnim filozofijam: stopnjeviti dovod goriva je ena, recimo preprostejša, in stopnjeviti dovod zraka je druga smer. Seveda je tudi kombinacija obeh mogoča. Pri tem pa je poleg hitre ohlajitve zgorevalnih plinov neposredno po zgorevanju pomembno tudi intenzivno mešanje goriva z zrakom pred njim.

V tem članku se bomo ukvarjali s postopkom stopnjevitega dovoda goriva. Kakor je razvidno s slike 9, ima zgorevalna komora dve coni zgorevanja: primarno, v kateri je na obodu zgorevalne komore nameščenih več gorilnikov (v našem primeru jih je 6), in sekundarno, ki je v središču zgorevalne komore in je v njej en sam gorilnik. Na prehodu iz primarne v sekundarno cono je zoženje, t.i. venturijeva šoba, ki prepreči udarec plamena nazaj v primarno cono v primeru, da v njej želimo samo mešati gorivo z zrakom, zgorevanje pa naj bi potekalo v sekundarni coni.



Slika 9

V nadaljnjem delu zgorevalne komore je podobno kakor pri standardnih zgorevalnih komorah predvideno intenzivno hlajenje zgorevalnih plinov s sekundarnim zrakom. Na sliki 10 so predstavljeni štirje načini obratovanja take zgorevalne komore:



Slika 10

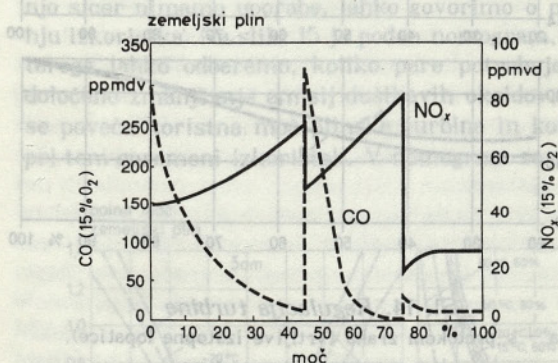
**Način A:** Zgorevanje se odvija v primarni coni. Poskrbeti je treba, da zgorevanje poteka v revni zmesi. Z večanjem obremenitve plinske turbine, to je s približevanjem k stehiometrični zmesi, se večajo emisije dušikovih oksidov.

**Način B:** Če povečujemo obremenitev plinske turbine še naprej, je treba poskrbeti za zgorevanje tudi v sekundarni coni; emisije dušikovih oksidov se povečujejo še naprej. Pri tem se zgorevanje v primarni coni prej približa stehiometrični zmesi kakor pa v sekundarni coni. Zato zgorevanje v primarni coni od neke obremenitve naprej ustavimo.

**Način C:** Zgorevanje poteka samo v sekundarni coni. S stopnjevanjem obremenitve se približuje stehiometrični zmesi. Emisije se povečujejo.

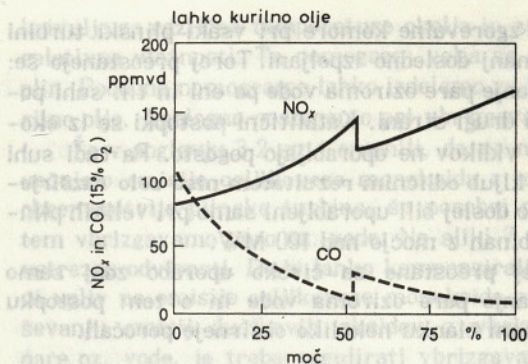
**Način Č:** Če se obremenitev še naprej povečuje, obremenimo sekundarno cono polno, pri čemer omogočimo dovod goriva skozi primarno cono in v njej gorivo temeljito premešamo z zrakom. Venturijska šoba prepreči pri tem, da bi plamen udaril iz sekundarne cone nazaj v primarno.

Na sliki 11 je podan potek emisij dušikovih oksidov v odvisnosti od obremenitve plinske turbine, ki jih lahko dosežemo z opisanim postopkom. V področju polne obremenitve oz. zelo velike delne obremenitve dela zgorevalna komora kakor je predstavljeno pod Č; rezultat tega so zelo majhne emisije dušikovih oksidov (tudi pod  $40 \text{ mg/Nm}^3$  pri  $15\% \text{ O}_2$ ).



Slika 11

Treba pa je priznati, da ta postopek (kakor tudi vsi drugi t.i. suhi postopki) omogoča tako majhne emisije dušikovih oksidov samo pri zgorevanju zemeljskega plina. Če uporabljamo za gorivo lahko kurilno olje, so emisije občutno večje in za občutno zmanjšanje emisij je še naprej potrebno vbrizgavanje pare oziroma vode, kar s predstavljeno zgorevalno komoro lahko izvedemo. V diagramu na sliki 12 so podane emisije za obratovanje z lahkim kurilnim



Slika 12

oljem brez vbrizgavanja pare oz. vode. Možnosti za zmanjšanje emisij z vbrizgavanjem pare oz. vode so podobne kakor v točki 3.3.

### 3.5 Katalitično čiščenje izpušnih plinov

Če zgoraj opisanih postopkov ni mogoče uporabiti, ali pa če niso uspešni, je treba namestiti v izpušne kanale katalizatorje, ki zmanjšajo količino dušikovih oksidov v izpušnih plinih na zeleno raven. Z vgraditvijo katalizatorjev je mogoče doseči zmanjšanje emisij na vrednosti pod  $10\%$  prvotnih emisij.

Omeniti pa je treba, da so katalizatorji zelo dragi in nimajo zadovoljivo dolge dobe trajanja. Poleg tega so zelo občutljivi za temperature izpušnih plinov nad  $450^\circ\text{C}$  in ne dopuščajo uporabe goriv, ki vsebujejo omembe vredne količine žvepla. Torej postopek katalitičnega čiščenja izpušnih plinov pride v poštev samo pri plinskih turbinah z izkoriščanjem toplote izpušnih plinov (z utilizatorjem) in pri uporabi zelo kakovostnih goriv.

### 3.6 Katalitično zgorevanje

Namesto, da dovolimo, da dušikovi oksidi pri zgorevanju nastanejo in jih šele nato s katalizatorji odstranimo, se ponuja postopek katalitičnega zgorevanja: v zgorevalno komoro namestimo katalizator, ki naj bi preprečil nastanek dušikovih oksidov. Ta postopek sicer deluje, vendar ne zadovoljivo: doba trajanja katalizatorjev v zgorevalni komori je kratka in znaša v najboljšem primeru samo nekaj sto ur.

Torej je katalitično zgorevanje za zdaj še neuporabno. Potrebni bo še precej let razvojnega dela in lahko pričakujemo, da bo na prelomu tisočletja ta postopek dobil ustrezno veljavo.

## 4. OBRATOVANJE PLINSKE TURBINE Z ZMANJŠANJEM EMISIJ

Vseh pod točko 3 omenjenih rešitev za zmanjšanje emisij plinskih turbin ni mogoče uporabiti hkrati. V glavnem lahko predpostavimo, da sta prvi dve rešitvi, tj. optimiranje zagorevanja in konstruktivna

obdelava zgorevalne komore pri vsaki plinski turbini več ali manj dosledno izpeljani. Torej preostanejo še: vbrizgavanje pare oziroma vode po eni in t.i. suhi postopki po drugi strani. Katalitični postopki se iz ekonomskih vidikov ne uporabljajo pogosto. Pa tudi suhi postopki kljub odličnim rezultatom niso zelo razširjeni, ker so doslej bili uporabljeni samo pri velikih plinskih turbinah z močjo nad 100 MW.

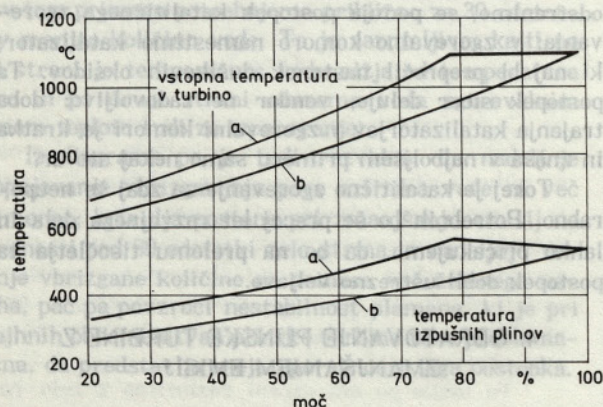
Torej preostane za široko uporabo zdaj samo vbrizgavanje pare oziroma vode in o tem postopku bomo v tem članku nekoliko obširneje poročali.

#### 4.1 Regulacija plinske turbine

Preden preidemo k podrobnostim, si je treba ogledati načine regulacije moči plinske turbine. V glavnem uporabljamo dva različna postopka in ker imata vpliv na emisije plinske turbine, ju moramo omeniti.

Oglejmo si plinsko turbino, ki poganja generator, torej morajo biti njeni vrtljaji stalno enaki. Koristno moč plinske turbine lahko reguliramo ali z regulacijo vstopne temperature zgorevalnih plinov v turbino, ali pa (če ima kompresor plinske turbine na vstopu vrtljive vodilne lopatice) z regulacijo pretoka zraka skozi plinsko turbino. Ker vrtljivih lopatic ne moremo popolnoma zapreti, pa tudi zapreti ne, ker takrat se izkoristek kompresorja močno zmanjša, je seveda treba v tem primeru tudi regulirati z vstopno temperaturo, potem ko smo izčrpali možnosti za regulacijo z vrtljivimi lopaticami.

V prvem primeru govorimo o regulaciji vstopne temperature, v drugem pa o regulaciji pretoka zraka (to regulacijo lahko imenujemo tudi regulacija temperature izpušnih plinov). Na sliki 13 je shematsko prikazan potek vstopne temperature v turbino in temperature izpušnih plinov v odvisnosti od obremenitve plinske turbine. Jasno se pri tem pokaže, da je temperatura izpušnih plinov v primeru regulacije pretoka



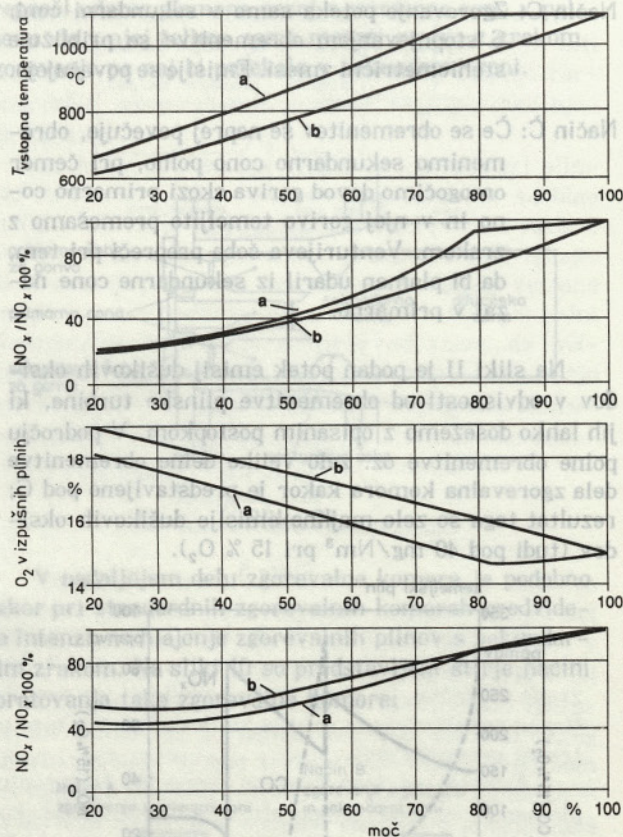
Sl. 13. Regulacija turbine

a - s pretokom zraka (vrtljive izstopne lopatice).

b - z vstopno temperaturo.

zraka pri določeni obremenitvi vedno višja kakor v primeru regulacije vstopne temperature. Torej uporabljamo regulacijo pretoka zraka vedno takrat, kadar je predvideno izkoriščanje toplote izpušnih plinov (utilizator).

Omenili smo že, da so emisije zelo odvisne od vstopne temperature v turbino, pa tudi, da se emisije dušikovih oksidov zmanjšajo z manjšanjem obremenitve. Seveda smo pri tem predpostavili, da se obenem z obremenitvijo niha tudi vstopna temperatura. Iz diagrama na sliki 13 pa je razvidno, da to vedno ne drži. V primeru z regulacijo pretoka zraka namreč vstopna temperatura ostane konstantna vse do približno 80 odstotkov obremenitve, torej moramo pričakovati, da v tem primeru ostanejo tudi emisije skoraj konstantne (sl. 14).



Sl. 14. Regulacija turbine

a - s pretokom zraka (vrtljive izstopne lopatice).

b - z vstopno temperaturo.

Šele potem, ko z vrtenjem lopatic ne moremo več regulirati moči plinske turbine, preidemo na regulacijo z vstopno temperaturo. Obenem, ko vstopno temperaturo znižujemo, se zmanjšujejo tudi emisije dušikovih oksidov. Splošno velja, da so emisije dušikovih oksidov pri regulaciji z vstopno temperaturo občutno manjše kakor pa pri regulaciji s pretokom zraka. V območju majhnih obremenitev se te razlike precej izenačijo, tako da niso več omembe vredne.

Ustrezno so tudi emisije ogljikovega monoksida odvisne od načina regulacije. Slika 14 prikazuje, kako potekajo v enem in kako v drugem primeru.

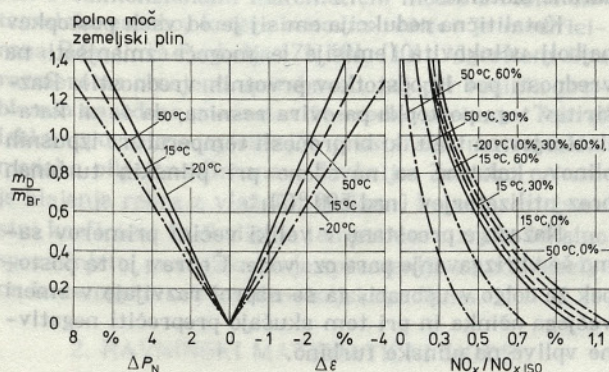
Omeniti pa je treba, da emisije tako dušikovih oksidov kakor tudi ogljikovega monoksida vedno preračunavamo na 15 odstotkov  $O_2$  (pri napravah z uporabo toplote izpušnih plinov preračunavamo na 3 odstotke  $O_2$ ). To pa zato, da vrednosti različnih plinskih turbin lahko med seboj primerjamo. Preračun izpeljemo po naslednji formuli:

$$\text{emisija}_{\text{relat.}} = \frac{20,9 - 15,0}{20,9 - O_2 \text{ meritev}} \times \text{emisija}_{\text{meritev}}$$

iz katere je razvidno, da je treba delež kisika v izpušnih plinih precej natančno poznati. Kajti že pri odstopku 1 % se spremeni relativna vrednost emisije za skoraj 17 odstotkov.

Koristna moč plinske turbine se z vbrizgavanjem pare ali pa vode poveča; po eni strani zato, ker se poveča pretok skozi plinsko turbino, po drugi pa tudi zato, ker moramo dovajati v zgorevalno komoro več goriva, da bi dosegli enako vstopno temperaturo v turbino kakor v primeru brez vbrizgavanja. Paro oz. vodo moramo namreč segreti na temperaturo vstopa v turbino. Iz povedanega izhaja, da se pri vbrizgavanju pare oz. vode spremeni tudi specifična poraba toplote oz. izkoristek plinske turbine.

Tukaj bomo govorili samo o spremembi in bomo prepustili sodbo posameznemu obratovalcu. Paro za vbrizgavanje lahko namreč odvajamo iz sistema parne turbine oz. iz nekega procesa. V tem primeru moramo govoriti o zmanjšanju izkoristka. Če pa jo pridobimo v izpušnem sistemu plinske turbine in zanj sicer nimamo uporabe, lahko govorimo o povečanju izkoristka. Na sliki 15 je podan nomogram, iz katerega lahko odberemo, koliko pare potrebujemo za določeno zmanjšanje emisij dušikovih oksidov, koliko se poveča koristna moč plinske turbine in koliko se pri tem spremeni izkoristek. V nomogram so vrisane



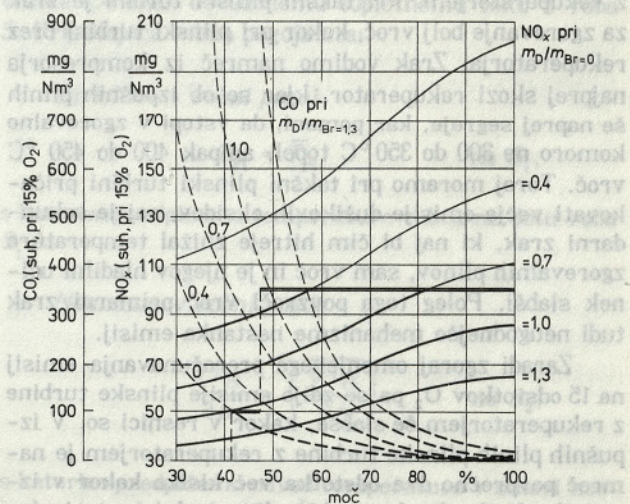
Sl. 15. Vbrizgavanje pare

$\epsilon$  – specifična toplotna poraba,  $P_N$  – koristna moč.

$m_{Dr}$  – gorivo,  $m_D$  – para.

krivulje za različne temperature okolja in za različne relativne vlažnosti. Ta nomogram velja za zemeljski plin. Podobne nomograme lahko izdelamo za lahko kurilno olje. Analogno postopamo pri vbrizgavanju vode.

Že v poglavju 3.2 smo omenili, da se močno povečuje emisije ogljikovega monoksida z manjšajočo obremenitvijo plinske turbine, še posebej pa, če pri tem vbrizgavamo paro oz. vodo. Na sliki 7 so podane ustrezne odvisnosti. Da bi lahko kompenzirali negativni vpliv na emisije ogljikovega monoksida pri zmanjševanju emisij dušikovih oksidov z vbrizgavanjem pare oz. vode, je treba regulirati vbrizgavanje v odvisnosti od obremenitve plinske turbine. Na sliki 16 je vrisana dopustna mejna vrednost za emisije dušikovih oksidov (npr. 100 mg/Nm<sup>3</sup> pri 15 %  $O_2$ , Nm<sup>3</sup>). Poskrbeti je treba, da vbrizgamo samo toliko pare, da te vrednosti ne prekoračimo pri nobeni delni obremenitvi. S tem obdržimo povečanje emisije ogljikovega monoksida v dopustnih mejah.



Slika 16

— emisija  $NO_x$ , --- emisija  $CO$ .

Z manjšanjem obremenitve se manjša količina vbrizgane pare in od neke obremenitve naprej ni treba več vbrizgavati pare. Pri tem postopku dosežjo emisije ogljikovega monoksida mejno vrednost (npr. tudi 100 mg/Nm<sup>3</sup> pri 15 %). Šele pri precej manjši delni obremenitvi (manj ko 50 %).

Z regulacijo vbrizgavanja pare v odvisnosti od obremenitve dosežemo dve prednosti. Po eni strani preprečimo povečanje emisij ogljikovega monoksida, po drugi pa varujemo zgorevalni sistem plinske turbine pred nepotrebnimi obremenitvami. Znano je namreč, da predvsem vbrizgavanje vode povzroča bolj ali manj znatno skrajšanje dobe trajanja delov, ki so v stiku z vročimi plini, predsem pa skrajšuje servisne intervale (oboje velja manj za vbrizgavanje pare kakor pa za vbrizgavanje vode).

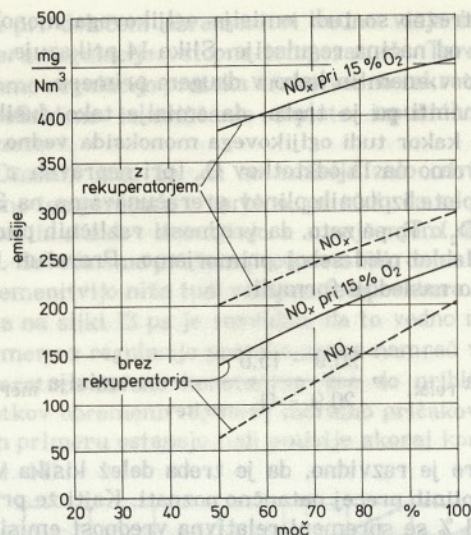
Postopek vbrizgavanja pare oz. vode uporabljajo že več ko 20 let. Medtem obratuje na svetu že več 100 plinskih turbin s tem sistemom in že več milijonov ur obratovanja potrjuje zanesljivost postopka. Postopek lahko označimo kot preizkušen in brez problemov. In vendar se raziskovalci trudijo, poleg uvedbe suhega postopka tudi pri plinskih turbinah manjše moči (pod 100 MW), izpopolniti postopek vbrizgavanja pare oz. vode v tej smeri, da se poveča stabilnost plamena. S tem bi bilo mogoče vbrizgati v plinsko turbino več pare, doseči večje zmanjšanje emisij dušikovih oksidov, povečati koristno moč in izkoristek plinske turbine (v primeru, da pridobimo paro v njenem izpušnem sistemu in zanjo nimamo druge uporabe), ne da bi se pri tem skrajšali servisni intervali in se skrajšala doba trajanja delov plinske turbine.

#### 4.2 Plinska turbina z rekuperatorjem

Omeniti pa moramo še posebnost plinske turbine z rekuperatorjem. Pri takšni plinski turbini je zrak za zgorevanje bolj vroč, kakor pri plinski turbini brez rekuperatorja. Zrak vodimo namreč iz kompresorja najprej skozi rekuperator, kjer se ob izpušnih plinih še naprej segreje, kar pomeni, da vstopi v zgorevalno komoro ne 300 do 350 °C tople, ampak 400 do 450 °C vroč. Torej moramo pri takšni plinski turbini pričakovati večje emisije dušikovih oksidov, saj je sekundarni zrak, ki naj bi čim hitreje znižal temperaturo zgorevalnih plinov, sam vroč in je njegov hladilni učinek slabši. Poleg tega povzroči vroč primarni zrak tudi neugodnejše mehanizme nastanka emisij.

Zaradi zgoraj omenjenega preračunavanja emisij na 15 odstotkov  $O_2$  pa se zdijo emisije plinske turbine z rekuperatorjem še slabše, kakor v resnici so. V izpušnih plinih plinske turbine z rekuperatorjem je namreč povprečno dva odstotka več kisika kakor v izpušnih plinih plinske turbine brez rekuperatorja (za dosego enake moči potrebujemo pri enakem pretoku zraka manj goriva). Pri preračunavanju povečamo emisije umetno za približno eno tretjino. Zaradi tega se izdelovalci plinskih turbin z rekuperatorjem trudijo, da zakonski predpisi glede emisij zanje ne bi veljali oziroma, da bi dosegli za take plinske turbine določene vrednosti. Z vgradnjo rekuperatorja se namreč poveča izkoristek plinske turbine in za dosego določene moči potrebujemo manj goriva, zato je absolutna količina škodljivih snovi v izpušnih plinih kljub večjim relativnim vrednostim manjša.

Skratka emisije plinske turbine z rekuperatorjem so občutno večje od emisij plinske turbine brez njega in opisane rešitve za zmanjšanje emisij pri njej manj učinkovite. Na sliki 17 so prikazane emisije dušikovih oksidov plinske turbine z rekuperatorjem in za primerjavo tudi emisije enake plinske turbine brez njega. Učinek vbrizgavanja pare oziroma vode je v odstotkih sicer podoben, vendar vodi zaradi večjih izhodiščnih vrednosti do večjih emisij.



Slika 17

#### 5. SKLEP

Za sodobno plinsko turbino, katere zgorevalni sistem je optimiran in njena konstrukcija izpopolnjena, preostanejo samo še trije načini za zmanjšanje emisij: po eni strani vbrizgavanje pare oz. vode, po drugi pa zmanjšanje emisij s katalizatorji v izpušnem sistemu. Če je razvoj tekkel že od vsega začetka v tej smeri, je mogoče standardne zgorevalne komore zamenjati s posebnimi, ki delujejo na osnovi suhega postopka.

Suhi postopek je postopek, ki bo v prihodnosti prevladal. Pri velikih plinskih turbinah je že pokazal odlične lastnosti. Emisije dušikovih oksidov pod 40 mg/Nm<sup>3</sup> pri 15 %  $O_2$  so mogoče. Trenutno poteka razvoj v smeri k manjšim plinskim turbinam. Ker na svetu obratuje več tisoč plinskih turbin, ki še niso za odpad, se seveda razvijajo sistemi, ki lahko z zelo majhnimi spremembami zamenjajo dosedanje standardne sisteme.

Katalitična redukcija emisij je od vseh postopkov najbolj učinkovita (emisije je mogoče zmanjšati na vrednosti pod 10 odstotkov prvotnih vrednosti). Razširitev tega postopka pa ovira resnica, da še ni katalizatorjev na trgu, ki bi prenesli temperature izpušnih plinov, kakršne so navedene pri plinskih turbinah brez utilizatorjev (nad 500 °C).

Nazadnje preostane v veliki večini primerov samo še vbrizgavanje pare oz. vode. Čeprav je ta postopek že dolgo v uporabi, ga še naprej razvijajo v smeri večjega učinka in pri tem skušajo preprečiti negativne vplive na plinsko turbino.