

Dr. ERNEST BAZIJANAC  
Fakultet prometnih znanosti  
Zagreb, Vukelićeva 4

Promet i čovjekova okolina  
Pregledni članak  
UDK: 621.45 : 504.06 : 34  
Primljeno: 09. 11. 1992.  
Prihvaćeno: 30. 11. 1992.

# ONEČIŠĆENJE OKOLIŠA ISPUŠNIM PLINOVIMA MLAZNIH MOTORA I ZAKONSKE MJERE

## SAŽETAK

*Povećanje intenziteta zračnog prometa i briga za čisti okoliš zahtijevali su donošenje propisa za zaštitu atmosfere od onečišćenja ispušnim plinovima zrakoplovnih motora. U ovom pregledu pokazane su bitne značajke propisa koji tretiraju ispušne plinove mlaznih zrakoplovnih motora. Komentirani su očekivani učinci donijetih propisa kao i mogući pravci razvoja u konstrukciji ekološki čistijih mlaznih motora.*

## 1. UVOD

U današnje doba, pri razvoju bilo koje gospodarske aktivnosti, osobita se pozornost posvećuje zaštiti okoliša. Pojedini ekološki zahtjevi u proizvodnji motora s unutarnjim izgaranjem među najvažnijim su smjernicama u razvoju novih konstrukcija. Može se reći da to danas vrijedi i za mlazne motore za pogon zrakoplova komercijalne namjene. Tako je, npr., u švicarskoj kompaniji Swissair upravo koncentracija  $\text{NO}_x$  u ispušnim plinovima jedan od glavnih čimbenika pri odluci koji će od motora CFM56 ili IAE V2500 biti ugrađen u zrakoplove Airbus A320/321 [1]. U sjevernoeuropskim zemljama planira se uvođenje takse za zrakoplove koja bi se određivala na osnovi intenziteta onečišćavanja ispušnim plinovima. Glavni naglasci u razvoju mlaznih motora za velike komercijalne zrakoplove bili su do sada usredotočeni na potisak, ekonomičnu potrošnju goriva i ekonomično održavanje. Prema tomu, od sada i ekološke značajke motora imaju visoku komercijalnu važnost i njima se posvećuje sve više pozornosti.

Buka je prvi ekološki problem koji se počeo rješavati pri mlaznim motorima, a štetnim svojstvima ispušnih plinova veće se značenje počelo davati nešto kasnije. Sukladno tomu, buka je kao čimbenik onečišćavanja okoliša znatno zastupljenija i poznatija tema stručnih rasprava. Ne umanjujući problem buke, koji i dalje ostaje važan ekološki čimbenik, u ovom se radu pažnja posvećuje samo onečišćavanju okoliša ispušnim plinovima.

Cilj rada je prikaz tehničkih propisa koji reguliraju onečišćenje okoliša ispušnim plinovima mlaznih motora te njihov utjecaj na dalji razvoj mlaznih motora.

Prevoženje putnika i robe zrakoplovom odvija se na velikim visinama pa onečišćivanje atmosfere nikoga izrav-

no ne ugrožava, jer se okoliš onečišćuje na globalnoj razini i teže se uočava na lokalnoj razini. Stoga je ova problematika dugo i bila izvan interesa ekoloških stručnjaka. Znatan porast zračnog prometa u strukturi prometa povećao je i udio u onečišćivanju okoliša, pa je time poraslo i značenje ovog problema. Osim toga, porasla je i svijest stručne javnosti o potrebi ne samo lokalne ekološke zaštite već i zaštite na globalnom planu.

## 2. EMISIJA ISPUŠNIH PLINOVA MLAZNIH MOTORA

Kao i u klipnih motora s unutarnjim izgaranjem [7], tako su i u mlaznog motora osnovni štetni sastojci ispušnih plinova koji su predmetom kontrole: ugljični monoksid (CO), dušični oksidi ( $\text{NO}_x$ ), neizgorjeli ugljikovodici (HC) i koksne čestice koje se opisuju kao dimnost ispušnih plinova (SN). Štetnost tih spojeva uglavnom je poznata, a njihov utjecaj na okoliš potanko je razmatran u sklopu aktivnosti vezanih za smanjenje onečišćenja ispušnim plinovima automobilskih motora. Ipak, emisija štetnih plinova zrakoplovnih motora (klipnih i mlaznih) ima nekih specifičnosti, jer se najveći dio emitiranja odvija na velikim visinama. Za subsonične zrakoplove te visine su obično oko 6000 do 12 000 m, a za supersonične i do 20 000 m. Na tim visinama  $\text{NO}_x$  znatno utječe na razaranje ozonskog sloja atmosfere koji je važan kao regulator klime i kao regulator ultravioletnog zračenja što dopire do tla.

Količina štetnih sastojaka koja se iz mlaznih motora emitira u atmosferu može se sagledati na primjeru što ga je objavila kompanija Swissair u svom "Oekobilanzu". Prema tom izvješću, 55 zrakoplova je tijekom 1989. godine emitiralo sljedeće količine štetnih sastojaka ispušnog plina:

$\text{NO}_x$ .....	22 600 t
HC.....	1 098 t
CO.....	3 449 t

Ako uzmemo u obzir ukupan broj zrakoplova u svijetu, koji su danas u primjeni, onda postajemo svjesni veličine onečišćavanja pri radu mlaznih motora. Inače, u stručnoj je literaturi vrlo teško pronaći pouzdane podatke o udjelu onečišćavanja zrakoplovnih motora u odnosu na ostale onečišćivače. Udio pojedinih onečišćivača [2] pokazan je u tablici 1. iz koje se vidi da je, po količini emitiranih štetnih

plinova, onečišćivanje zrakoplovnim motorima ipak znatno manje nego npr. motora za putnička vozila.

**Tablica 1. Udio prometnih sredstava u onečišćivanju čovjekova okoliša**

Prometno sredstvo	Gorivo %	CO %	NO <sub>x</sub> %	CH %
Putnička vozila	60	95,9	64,3	80,5
Motorkotači	0,5	1,3	0,1	6,0
Autobusi	1,9	0,3	2,3	1,9
Teretna vozila	19,6	1,7	28,2	10,1
Željeznički promet	4,5	0,1	2,1	0,5
Riječni promet	1,7	0,2	1,5	0,4
Zračni promet	6,8	0,5	1,6	0,6

Prema Kelleru [3], zadnje procjene pokazuju da je udio NO<sub>x</sub> u onečišćivanju okoliša zrakoplovnim prijevoznim sredstvima između 2 i 5%.

Svaki od navedenih plinova štetan je na svoj način, ali da bi se procijenila zbrojna štetnost emisije ispušnih plinova motora, neki autori predlažu pojam "specifična ekvivalentna toksičnost"  $q_{\Sigma CO}$  [g/kW · h], kojom se toksičnost svih komponenata prevodi na toksičnost CO. Prema [4] specifična ekvivalentna toksičnost iznosi:

$$q_{\Sigma CO} = q_{CO} + 0,667 \cdot q_{HC} + 10 \cdot q_{NO_x} + 20 \cdot q_{SN}$$

Ugljični monoksid (CO) u ispušnim plinovima posljedica je nepotpunog izgaranja ugljika iz goriva, pri globalnom ili lokalnom nedostatku kisika u komori izgaranja.

Ugljikovodici (HC) u proizvodima izgaranja rezultat su nedovršenog procesa izgaranja uglavnom zbog lokalnoga gašenja plamena u blizini hladnijih stijenka komore izgaranja. Broj različitih ugljikovodika je veoma velik.

Dušični oksidi (NO<sub>x</sub>) nastaju reakcijom dušika i kisika pri visokim temperaturama koje se pojavljuju u procesu izgaranja. Na stvaranje NO<sub>x</sub> uz koncentraciju reagirajućih komponenata, odlučujući utjecaj imaju visoke temperature na kojima se odvija reakcija kao i vrijeme koje je na raspolaganju.

Količina koksiranih čestica ugljika - čađi - određuje njihovu boju odnosno dimnost. Izdvajanje čestica čvrstog ugljika nastaje pri temperaturama višim od 1000° i u uvjetima jakog nedostatka kisika.

Dosadašnji je razvoj mlaznog motora bio usmjeren k povećanju potiska i smanjenju specifične potrošnje goriva. To je imalo za posljedicu potrebu za porastom stupnja povećanja tlaka u kompresoru pa prema tomu i temperature zraka na ulazu u komoru izgaranja, a time se povećavala i temperatura izgaranja. S druge strane, za postizanje teoretskog minimuma potrošnje goriva potreban je stehiometrijski odnos goriva i zraka. Sve to upravo pogoduje razvoju dušičnih oksida u proizvodima izgaranja, pa je to postalo jedan od važnih ograničujućih čimbenika u razvoju snažnih i ekonomičnih mlaznih motora.

### 3. PROPISI

Prvim pisanim materijalom koji će u budućnosti odražavati stajalište ICAO (International Aviation Organization) prema ekološkim problemima može se smatrati klauzula u rezoluciji A18-11 donijeta na Konferenciji UN o "Čovjekovom okolišu", održanoj u Stockholmu 1972. godine. U izvršenju ovog zadatka ICAO je svjestan nepovolj-

nog ekološkog utjecaja koji je povezan s djelatnošću zračnog prometa i njegove odgovornosti, te se zemlje članice obvezuju postići maksimalnu usklađenost između sigurnosti i redovitog razvoja civilnog zrakoplovstva kao i kvalitete čovjekovog okoliša [5]. Danas se tom problematikom bavi nekoliko državnih i međudržavnih organizacija, a najvažnije od njih predočene su u tablici 2.

**Tablica 2. Međunarodna udruženja i organizacije za okoliš u zrakoplovstvu**

<b>International Civil Aviation Organization</b> (Međunarodna organizacija civilnog zrakoplovstva) - Komitet za zaštitu okoliša - Radna grupa za zaštitu okoliša
<b>International Air Transport Association</b> (Međunarodno udruženje zrakoplovnih prijevoznika) - Grupa za okoliš
<b>Air Transport Association of America</b> (Udruženje američkih zrakoplovnih prijevoznika) - ATA program zaštite
<b>European Community</b> (Europska zajednica) - Europska agencija za okoliš - DGXI uprava za okoliš
<b>European Civil Aviation Conference</b> (Europska konferencija za civilno zrakoplovstvo) - Umanjenje onečišćenja uzrokovanog zračnim prometom
<b>Association of European Airlines</b> (Udruženje europskih zrakoplovnih prijevoznika) - AEA grupa za okoliš

Dopuštene vrijednosti emitiranja štetnih proizvoda izgaranja propisane su 1981. godine od ICAO u Aneksu 16 "Konvencije međunarodnoga civilnog zrakoplovstva". Aneks 16 sadrži dva dijela:

Environmental Protection (Zaštita okoliša)	
Volume I	- Aircraft Noise (Buka zrakoplova)
Volume II	- Aircraft Engine Emissions (Emisija zrakoplovnih motora)

Prema Aneksu 16 ispušni plinovi se provjeravaju prema koncentraciji ugljičnog monoksida, dušičnih oksida, ugljikovodičnih spojeva i dimnosti. Kontrolni parametar toksičnosti za ispušne plinove određuje se u obliku:

$$\frac{G_i}{F_0} = f(\Pi_{k0})$$

gdje je:

- $G_i$  - količina i-tog proizvoda izgaranja izmjerena u jednom ciklusu mjerenja
- $F_0$  - maksimalni potisak raspoloživ za polijetanje pri ISA/SL uvjetima i bez ubrizgivanja vode
- $\Pi_{k0}$  - zbirni stupanj kompresije zraka u kompresorima na prethodno definiranom režimu rada motora

Kontrolni parametar za dimnost ispušnih plinova SN određuje se prema izrazu:

$$SN = f(F_0)$$

Maksimalno dopuštene vrijednosti kontrolnih parametara propisane su napose za subsonične i supersonične zrakoplove.

Režim rada motora tijekom mjerenja količine pojedinih komponenata ispušnog plina propisan je i otprilike simulira rad motora u jednom prosječnom poletno-slijetnom ciklusu.

Tablica 3. Režim rada motora u pojedinim fazama ispitivanja

R. br.	Režim rada motora	Subsonični		Supersonični	
		F [%]	Δt [min]	F [%]	Δt [min]
1.	Polijetanje	100	0,7	100	1,2
2.	Penjanje	85	2,2	65	2,0
3.	Prilaženje	30	4,0	34	2,3
4.	Rulanje/prazan hod	7	26,0	5,8	26,0
5.	Poniranje	-	-	15	1,2

Oznake u tablici 3:

F - potisak u % u odnosu na maksimalni

Δt - vrijeme rada motora

Količina određene komponente u ispušnom plinu  $G_j$  (g) što se tijekom jednog ciklusa mjerenja emitira računa se prema izrazu:

$$G_j = \sum_{i=1}^4 K \cdot EI_{ij} \cdot G_{fj} \cdot \Delta t_j \quad [g]$$

gdje je:

K - koeficijent prevođenja rezultata mjerenja na standardne uvjete

$EI_{ij}$  [g/kg] - indeks emisije za komponentu i u režimu j (prema Aneksu 16 "Emission index")

$G_{fj}$  [kg/min] - potrošnja goriva u j-tom režimu

$\Delta t_j$  [min] - vrijeme rada motora u j-tom režimu

Indeks emisije za i-ti režim računa se na osnovi mjerenja i on predstavlja:

$$EI_{ij} = \frac{\text{masa komponente } j \text{ u [g]}}{\text{masa potrošenoga goriva u [kg]}}$$

Da bi mlazni motor za subsonične brzine zadovoljio ICAO propise, izmjerene vrijednosti kontrolnog parametra  $G_j/F_0$  trebaju biti manje od graničnih koje su određene prema sljedećem:

Ugljikovodici (HC):  $\frac{G_{HC}}{F_0} = 19,6$

Ugljični monoksid (CO):  $\frac{G_{CO}}{F_0} = 118$

Dušični oksidi ( $NO_x$ ):  $\frac{G_{NO_x}}{F_0} = 50 + 2 \cdot \Pi_{k0}$

Dimnost (SN):  $SN = 83,6 \cdot F_0^{-0,274}$   
ili za  $SN > 50$ ,  $SN = 50$

Za supersonične brzine vrijedi:

Ugljikovodici (HC):  $\frac{G_{HC}}{F_0} = 140 \cdot 0,92^{\Pi_{k0}}$

Ugljični monoksid (CO):  $\frac{G_{CO}}{F_0} = 4550 \cdot \Pi_{k0}^{-1,03}$

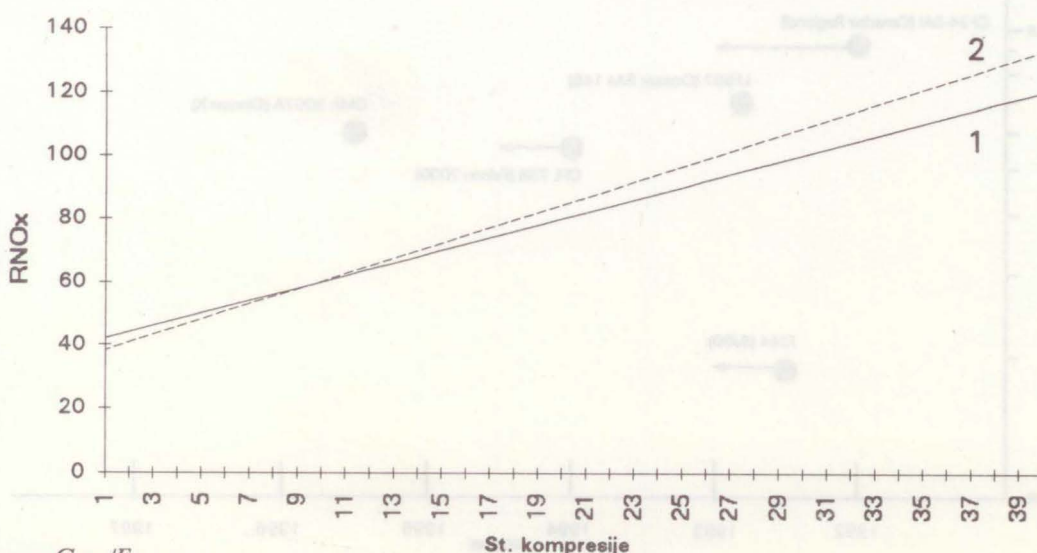
Dušični oksidi ( $NO_x$ ):  $\frac{G_{NO_x}}{F_0} = 36 + 2,42 \cdot \Pi_{k0}$

Dimnost (SN):  $SN = 83,6 \cdot F_0^{-0,274}$   
ili za  $SN > 50$ ,  $SN = 50$

Na slici 1. pokazane su granične vrijednosti kontrolnog parametra za emisiju  $NO_x$  koji u zadnje vrijeme zadaje najviše brige pri razvoju novih motora.

#### 4. UTJECAJ EKOLOŠKIH NORMA NA RAZVOJ MLAZNIH MOTORA

Samo tri tvornice danas razvijaju mlazne motore potiska preko 267 kN (60 000 lb) koji su namijenjeni za širokotrupne zrakoplove za 2000-te godine. Tvornica Rolls-Royce razvija motor Trent, tvornica Pratt & Whitney razvija PW4000, a General Electric motor GE90. Stanje



$RNO_x \dots \dots \dots G_{NO_x}/F_0$   
1.....za subsonične brzine  
2.....za supersonične brzine

Slika 1. Dopuštene vrijednosti kontrolnog parametra za emisiju  $NO_x$ :

planova razvoja i usavršavanja mlaznih motora pokazano je na slici 2 [6].

Važeći ICAO-propisi ne predstavljaju nikakav problem konstruktorima u razvoju novih motora, jer i sadašnja generacija motora koja je u primjeni bez problema ispunjuje te zahtjeve (sl.3) [2]. Samo pooštrenje postojećih propisa i donošenje novih mogu potaknuti nove izazove u još većem smanjenju emisije. Jedan takav propis koji se očekuje u budućnosti svakako je propis o emisiji  $\text{NO}_x$  na velikim visinama.

Na osnovi spomenutih triju tipova motora za velike potiske, mogu se procijeniti putovi kojim će se ići u nastojanju da se smanje emisije štetnih komponenata ispušnih plinova. Tvornice Rolls-Royce i Pratt & Whitney na svojim novim motorima uglavnom rade samo na usavršavanju postojećih koncepcija komora za izgaranje i ubrizgavanja goriva, dok se tvornica General Electric odlučila za relativno novi pristup s tzv. dvostupnjevitom komorom za izgara-

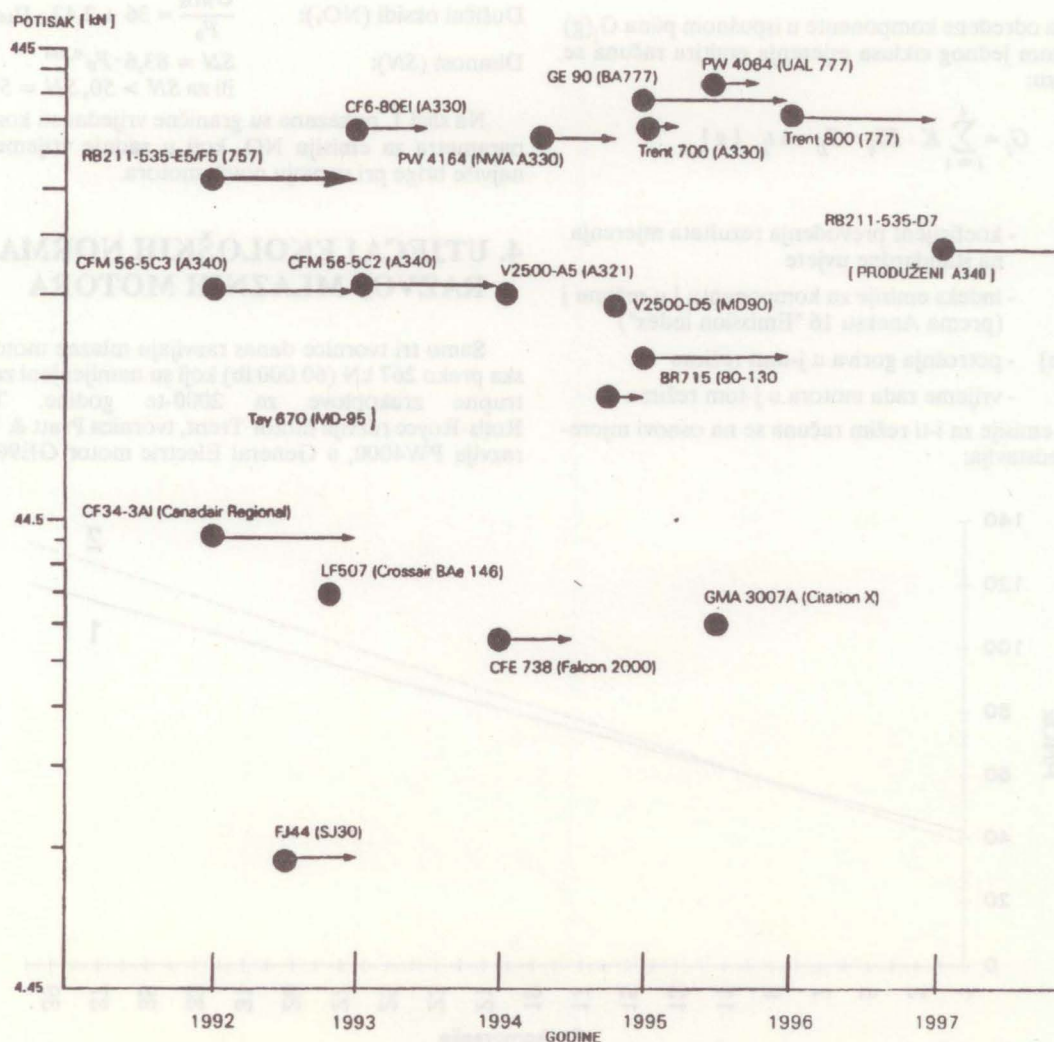
nje. Najavljuje se da će ta koncepcija omogućiti 38% manje emisije  $\text{NO}_x$  od današnjih motora s najmanjom emisijom  $\text{NO}_x$ .

Ne treba zaboraviti da se znatno smanjenje onečišćenja okoliša može postići i uvođenjem odgovarajućih postupaka u prometnim postupcima kao što su npr.:

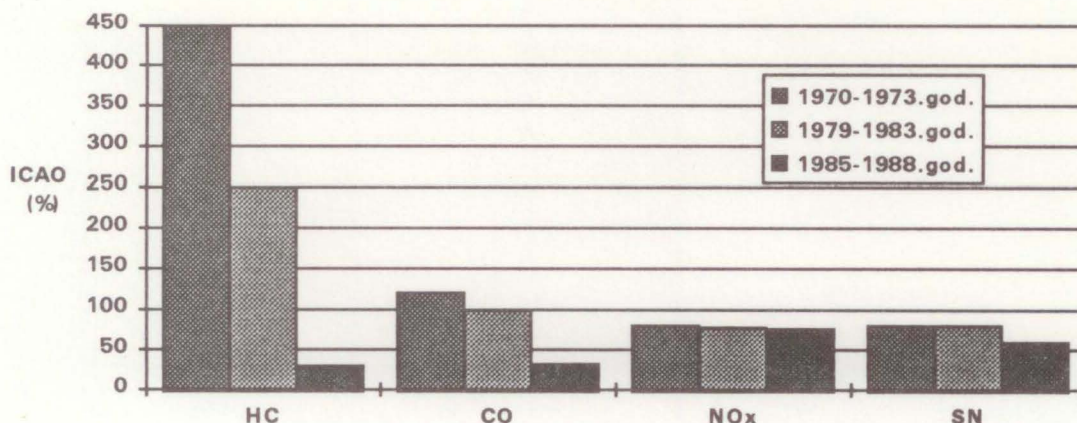
- smanjivanje vremena rada mlaznih motora na praznom hodu,
- gašenje motora tijekom ukrcavanja robe i putnika itd.

## ZAKLJUČAK

Povećana briga za okoliš i ekonomično trošenje raspoloživih izvora energije zahtijeva danas velike napore. Ti se napori očituju, s jedne strane, u razvoju čistijih i ekonomičnijih pogonskih grupa, a s druge strane u poboljšanju teh-



Slika 2. Planovi razvoja mlaznih motora



Slika 3. Emisija ispušnih plinova u odnosu na propise primijenjene na zrakoplove Boeing stopostotno odgovara razini

nologije prometa. Povećanjem opsega zračnog prometa porastao je i opseg onečišćenja okoliša ispušnim plinovima mlaznih motora. Od 1981. godine dopuštena se razina onečišćenja ispušnim plinovima zrakoplovnih mlaznih motora određuje ICAO-normama u Aneksu 16. Iznijeti pregled pokazuje kako je realno očekivati smanjenje onečišćenja od zrakoplovnih mlaznih motora nove generacije što će pridonijeti čistijem zraku usprkos predviđenom daljnjem porastu intenziteta zračnog prometa. Nužno je da takve i slične propise poznaje stručna javnost i zrakoplovne vlasti u našoj zemlji, jer se ona sada nalazi pred ratifikacijom i primjenom tih propisa.

#### SUMMARY

#### ENVIRONMENTAL POLLUTION FROM JET ENGINE EXHAUST EMISSIONS AND LEGAL PROVISIONS

*An almost explosive growth of air transport and concern for environmental protection set a requirement for the enactment of regulations for the protection of atmosphere against aircraft engine exhaust emissions. Some essential features of subject provisions have been outlined as referring to the*

*exhaust gases from jet aircraft engines. The expected effects of subject provisions have been discussed as well as the possible paths of development on designing environmentally more friendly jet engines.*

#### LITERATURA

- [1] B. SWEETMAN: How to make engines less obnoxious. *Interavia Aerospace Review*, May 1991.
- [2] N. ŠTRUMBERGER, H. ĐANIĆ: Mjere za štednju goriva i smanjenje emisije ispušnih plinova. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 1991.
- [3] J. KELLER: Big fan designs target pollutants. *Interavia Aerospace Review*, January 1992.
- [4] P.M. KANILO: Toksičnost GTD i perspektivi primenjenja vodoroda. Kijev, 1982.
- [5] ICAO: Environmental protection. Annex 16, Volume 16, Aircraft engine emissions, First edition, 1981.
- [6] B. MILLER: Civil thrust for engine alliances. *Interavia Aerospace Review*, November 1991.
- [7] D. JERAS: Ekološke značajke cestovnih vozila i zakonske mjere. *Promet* 3, 1991, 6.
- [8] G. NORRIS: Green supersonic. *Flight International*, 5-11 September 1990.