



Reserapport från NepCap2012

5th International Symposium on Non-equilibrium Processes,
Plasma, Combustion, and Atmospheric Phenomena

TOMAS HURTIG OCH LEIF ADELÖW

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se

FOI-R--3502--SE
ISSN 1650-1942

Oktober 2012

Tomas Hurtig och Leif Adelöw

Reserapport från NepCap2012

5th International Symposium on Non-equilibrium Processes,
Plasma, Combustion, and Atmospheric Phenomena

| | |
|------------------------|-----------------------------|
| Titel | Reserapport från NepCap2012 |
| Title | Travel report NepCap2012 |
| Rapportnr/Report no | FOI-R--3502—SE |
| Månad/Month | Oktober |
| Utgivningsår/Year | 2012 |
| Antal sidor/Pages | 23 p |
| ISSN | 1650-1942 |
| Kund/Customer | Energimyndigheten |
| FoT område | |
| Projektnr/Project no | B20019 |
| Godkänd av/Approved by | Torgny Carlsson |
| Ansvarig avdelning | 2 |

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk. All form av kopiering, översättning eller bearbetning utan medgivande är förbjuden.

This work is protected under the Act on Copyright in Literary and Artistic Works (SFS 1960:729). Any form of reproduction, translation or modification without permission is prohibited.

Sammanfattning

Denna reserapport avhandlar en del av de föredrag som gavs vid ”5th International Symposium on Non-equilibrium Processes, Plasma, Combustion, and Atmospheric Phenomena” 2012, NepCap2012. Denna gång präglades konferensen av diskussionerna kring de så kallade singlet tillstånden $O_2(a^1\Delta_g)$ och $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ för syre. Många menar att förekomsten av även ganska små fraktioner av dessa elektroniskt exciterade tillstånd i luft eller molekylärt syre kan öka förbränningshastigheten väsentligt vid åtminstone vätgas- och metanförbränning. Ett annat vanligt förekommande tema var den kontinuerliga spindetonationsmotorn (eng. Continuous Spin Detonation Wave Engine, CSDW) en gammal idé som plockats upp och blivit het igen de senaste fem åren. Denna rapport innehåller inte alla konferensens bidrag, vi har bara tagit upp och refererat de bidrag vi hann med att bevista och de vi tror oss ha förstått någorlunda. En del referat är mycket korta då det ibland kunde vara svårt att hänga med, vi har ändå tagit med dem så den intresserade kan kontakta författarna för mer information.

Nyckelord: Plasmastyrd förbränning, förbränning, singlet-tillstånd syre, kontinuerlig detonationsmotor, HCCI

Innehållsförteckning

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Inledning | 8 |
| 2 | Kommentarer till föreläsningar och diskussioner | 9 |
| 2.1 | Dag 1: Fundamentals of ignition and combustion..... | 9 |
| 2.1.1 | Chain-branching reactions with excited molecules: From fundamentals to practical applications..... | 9 |
| 2.1.2 | Simulation of ignition and combustion in perspective engines for high-speed vehicles with the use of detailed and reduced reaction mechanisms..... | 10 |
| 2.1.3 | Turbulence – chemistry interaction model for simulating the operation process in piston engines | 11 |
| 2.1.4 | Diskussioner | 11 |
| 2.2 | Dag 2: Combustion and detonation | 11 |
| 2.2.1 | Perspectives of industrial application of detonation..... | 11 |
| 2.2.2 | High-frequency pulsed detonations in heptane/oxygen mixtures | 12 |
| 2.2.3 | Rethinking hydrogen jet flames | 12 |
| 2.2.4 | Generation of gaseous detonation due to chamber walls impact..... | 12 |
| 2.2.5 | Diskussioner | 13 |
| 2.2.6 | Study of singlet delta oxygen $O_2(1\Delta_g)$ impact on H_2-O_2 mixture ignition in flow reactor | 13 |
| 2.3 | Dag 3: Fundamentals of ignition and combustion..... | 13 |
| 2.3.1 | Numerical simulation of layered galloping detonation in supersonic flows | 13 |
| 2.3.2 | Detonation combustion of the synthesis gas | 13 |
| 2.3.3 | Experimental study of initiation detonation in liquid kerosene – gaseous oxidizer mixture | 14 |
| 2.3.4 | Detonation combustion of coal in a flow-type plane-radial combustor | 15 |
| 2.4 | Dag 4: Kinetics and elementary processes | 15 |
| 2.4.1 | Comprehensive analysis of kinetic and micro physic processes during oxidation of methane with Al-nanoparticle additives..... | 15 |
| 2.4.2 | Theoretical study of elementary processes in $H+O_2(a^1\Delta_g)$ reacting system..... | 16 |
| 2.4.3 | The use of artificial plasma for reduction of aircraft radar visibility..... | 16 |
| 2.4.4 | Numerical optimization of a novel resistojet powered by super capacitors..... | 17 |
| 2.4.5 | Diskussioner | 17 |
| 2.5 | Dag 5: Plasma and laser assisted combustion..... | 17 |
| 2.5.1 | Reactive species production and ignition of the hydrogen-oxygen mixture by RF DBD | 17 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.5.2 | Kinetics of methane partial oxidation by nonequilibrium low temperature plasma | 18 |
| 2.5.3 | Modeling study of the effect of singlet oxygen molecules on the HCCI engine performance | 19 |
| 2.5.4 | Effect of the exposure of air flow to resonance laser radiation on the combustion performance in scramjet model combustor | 20 |
| 2.5.5 | Excited oxygen generation by atmospheric RF plasma discharge for combustion intensification | 20 |
| 3 | Slutsatser och intryck | 22 |
| 4 | Referenser | 23 |

1 Inledning

Konferensen arrangeras i huvudsak av Alexander Starik och Sergey Frolov och har förlagts till en mindre ort strax utanför Sochi vid Svarta Havet. Starik är från Central Institute of Aviation Motors (CIAM) i Moskva och Frolov är från Semenov Institute of Chemical Physics, båda är mycket framstående forskare inom sina respektive områden.

Första kvällen träffar vi Arkadiusz Kobiera och Jan Kiandrick från Polen. De anländer till hotell AquaLoo samtidigt som vi och kan lite grundläggande Ryska vilket visar sig användbart då man inte talar ett ord engelska i receptionen och vi hamnat i fel byggnad. Efter diverse förvirrade diskussioner förstår våra Polska vänner vart vi ska och vi promenerar iväg till vår hotellbyggnad och lyckas efter en timmes diskussioner kring betalning och pass få våra nycklar. Jan jobbar med en kontinuerlig (roterande) detonationsmotor och Arkadiusz skall presentera sitt arbete på funktionen hos en resistojet. En beskrivning av dessa arbeten finns nedan, 2.3.3 och 2.4.4. Arkadiusz har fått ansvaret att bygga upp diagnostiktekniken i sitt laboratorium på Universitetet i Warszawa. Av denna anledning hade han varit för att hälsa på Marcus Aldéns grupp vid Lunds Universitet under sommaren. Han var där i flera veckor för att studera hur labbet är uppbyggt och vilken utrustning som är nödvändig för att kunna diagnostisera förbränningsförlopp av olika typer.

Konferensen varade i fem dagar men på grund av många inställda föredrag blev sista dagen bara halv. NepCap har inga parallella sessioner utan alla bevistar samma föredrag och stämningen är kamratlig även om diskussionerna ibland kan hårdna. I år präglades konferensen mycket av diskussionerna kring de så kallade singlet oxygen tillstånden $O_2(a^1\Delta_g)$ och $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ för syre. Många menar att förekomsten av även ganska små fraktioner av dessa elektroniskt exciterade tillstånd hos syremolekylen i luft eller syrgas kan öka förbränningshastigheten väsentligt av åtminstone vätgas- och metanförbränning. Ett annat vanligt förekommande tema var den kontinuerliga spindetonationsmotorn (eng. Continuous Spin Detonation Wave Engine, CSDW) en gammal idé som blivit aktuell igen de senaste fem åren. Denna rapport innehåller inte alla konferensens bidrag. Vi har bara tagit upp och refererat de bidrag vi hann med att bevista och de vi tror oss ha förstått någorlunda. En del referat är mycket korta då det ibland kunde vara svårt att hänga med, vi har ändå tagit med dem så den intresserade kan kontakta författarna för mer information.

2 Kommentarer till föreläsningar och diskussioner

2.1 Dag 1: Fundamentals of ignition and combustion

2.1.1 Chain-branching reactions with excited molecules: From fundamentals to practical applications

Starik A.M

(Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russia)

En imponerande översikt av arbetet med att identifiera molekyllära och atomära tillstånd som kan öka reaktionshastigheter och flamhastighet i förbränningar. Molekyler med exciterade vibrationstillstånd och elektroniskt exciterade tillstånd är mer effektiva i att öka reaktionshastigheten i förbränning än molekyler med hög translationsenergi eller rotationsenergi. Starik påpekar också att man kan öka förbränningshastigheten även genom att minska hastigheten för de reaktionsvägar som avslutar kedjereaktionerna och inte bara genom att öka hastigheten för de reaktionsbyggande kedjorna.

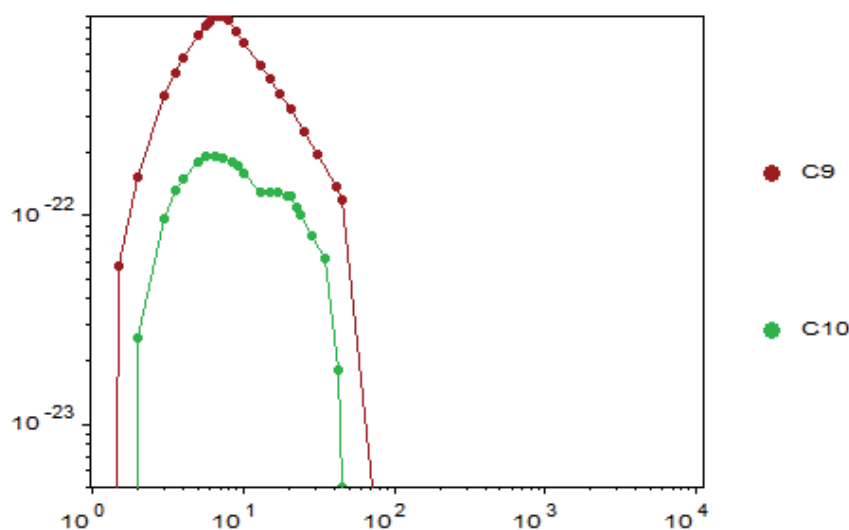
För vätgas- och metangasförbränning har man visat att $O_2(a^1\Delta_g)$ och $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ är mycket effektiva på att öka reaktionshastigheten för vissa reaktioner i förloppet. Dessa är elektroniskt exciterade 'singlet oxygen' (SO) tillstånd. Då mycket av konferensen kom att handla om dessa tillstånd används den kortare benämningen 'SO-tillstånd' eller bara SO för att hänvisa till dessa exciterade tillstånd. Med 5 % inblandning av första SO tillståndet i luften kan man minska mängden NO som bildas en faktor två (då $N + O_2(a^1\Delta_g) \rightarrow NO$ är långsammare än $N + O_2 \rightarrow NO$) och öka reaktionshastigheten för $CH_4 + O_2$ högst väsentligt i metan-luft förbränning. Tyvärr gavs två olika siffror på denna hastighetsökning och det var inte uppenbart för författarna av denna rapport vilken hastighetsökning som hörde till just det redovisade experimentet, båda siffrorna var av storleksordningen 10^5 men skall nog tas med en nypa salt. Tveklöst är det dock så att Starik hävdar att SO tillstånden kan öka reaktionshastigheter för åtminstone H_2 och CH_4 förbränning markant. Mer om detta i senare föredrag, se t.ex. 2.2.6, 2.4.2 eller 2.5.3.

Starik redovisade även plasmaassisterade scramjetsimuleringar med $E/N=10$ Td (elektriska fältet delat med gastätheten mäts i enheten Townsend, Td) där man lyckats minska induktionslängden med en faktor tio (från 500mm till 50mm). Dessa simuleringar bygger troligtvis på CIAMs stora (600 reaktioner) reaktionsmekanism, som inkluderar bland annat ovan nämnda SO-tillstånd och deras reaktioner. Vidare nämnde Starik även problematiken kring att bestämma SO-tillståndens livslängd, dvs tiden till 'quenching' men gav tyvärr inga siffror på detta.

Kommentarer och kompletteringar till ovanstående föredrag.

Tvärsnittet (mätt som den energi en elektron behöver för att kunna excitera O_2 till något av dessa tillstånd) för de två tillstånden $O_2(a^1\Delta_g)$ och $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ har relativt låga tröskelnivåer (0.98 respektive 1.63 eV) se Figur 1 som framställts med hjälp av gratisprogramavaran BOLSIG+. Tar man bara hänsyn till strålning som enda sönderfallsmekanism har de dessutom lång livstid, storleksordning 10^3 s, respektive 10 s. I en tät gas är det naturligtvis inte sönderfall genom strålning som blir avgörande utan hänsyn måste tas till kollisioner med andra reaktanter (quenching, som nämns ovan) och då blir livslängden väsentligt kortare. I den mekanism som nämndes av Starik

(600 reaktioner) måste man naturligtvis ha med någon form av data på livslängden av dessa tillstånd men dessa verkar inte vara publicerade. Starik publicerade 2010 en artikel med en mekanism om över 400 reaktioner (som finns listade i artikeln) men denna är utvecklad i huvudsak för kemin i en stötvåg [1]. I en senare paus fick vi möjlighet att tala kort med Chukalovsky som presenterade en poster med simuleringar av experiment utförda av Starik mfl. Han menar att livslängden på lägsta SO-tillståndet i H_2 förbränning är ungefär $100 \mu s$ innan quenching. Detta är bara exakt sant i just detta experiment men kan tas som en indikation på typisk livslängd för detta tillstånd. Senare föredrag och diskussioner visar dock att det råder stor oenighet om detta och Stariks grupp arbetar med en mer komplett och teoretiskt väl underbyggd modell för reaktionshastighet och quenching av lägsta SO-tillståndet.



Figur 1. Tvärsnitt [m^2] plottat mot elektronenergin [eV] för $O_2(a^1\Delta_g)$ (C9) och $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ (C10) genererade med mjukvaran BOLSIG+ baserat på data kompillerade av A. V. Phelps.

2.1.2 Simulation of ignition and combustion in perspective engines for high-speed vehicles with the use of detailed and reduced reaction mechanisms

Bezgin L.V., Babushenko D.I., Guskov O.V., Kopchenov V.I., Titova N.S., Starik A.M.
(Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russia)

Alla möjliga olika simuleringar och modeller redovisades, mycket hög informationstäthet och svårt hänga med. Mycket en uppvisning i CIAMs olika modeller för reaktionskinetik. Bland mycket annat så påpekades den stora vikten av reaktionen $H+OH+M = H_2O+M$ (där M står för vilken annan molekyl som helst) vid simulering av scramjetmotorer.

Här refererades också till kontinuerligt roterande detonationsvågsmotor. Tydligt en ny motorkonstruktion som studerats intensivt de senaste åren. Mer om denna i efterföljande bidrag.

2.1.3 Turbulence – chemistry interaction model for simulating the operation process in piston engines

Frolov S.M., Ivanov V.S.

(Semenov Institute of Chemical Physics, Moscow, Russia)

Intressant föredrag om allt från datainsamling för att bygga upp databas för förbränning till beskrivning av simuleringsmetoder. Man använder en så kallad 'flame tracking' metod (FT) för att hålla reda på flamfronten och kemin modelleras med hjälp av partiklar som reagerar. Flamfronten är alltid innehållen i en enda cell i rörelseriktningen och på detta sätt, menar man, så undviks artificiell diffusion helt och hållet. Metoden används för att lösa upp mycket fina strukturer och skarpa gradienter så att man kan modellera t.ex. knockning utan att behöva ta till DNS. Endast bensinmotorer simuleras och antändningen sker med 100 mJ i en tändstiftsmodell som inte beskrevs i detalj men förmodligen stoppar man in 100 mJ värme lokalt där tändstiftet skall sitta. Man samarbetar med fordonsindustrin och enligt utsago var simuleringsexemplen som förvisades tagna från verkliga kolv-cylinder geometrier. Vem motortillverkaren var fick vi dock inte reda på.

2.1.4 Diskussioner

På kvällen fick vi möjlighet att tala mer om kontinuerliga detonationsvågsmotorer med Arkadiusz Kobiera och han menar att denna typ av motor föreslogs redan under 60-talet men att den fallit i glömska för att återigen bli ett hett forskningsområde under de senaste fem åren. Han menar vidare att det nyvaknade intresset för denna typ av motor härstammar delvis från svårigheterna att få en PDE att fungera tillförlitligt. En ytterligare anledning till intresset är att denna typ av motor kan arbeta vid mycket hög frekvens, upp till några kilohertz, något som gör den mer intressant för t.ex. turbintillämpningar än den traditionella pulsdetonationsmotorn (eng. Pulse Detonation Engine, PDE) som troligtvis aldrig kan nå högre frekvens än cirka 100 Hz. Notera här att även om motorn kallas kontinuerlig så gäller detta snarare tillförseln av bränsle-oxidator blandningen. Själva detonationsvågen är intermitterent.

2.2 Dag 2: Combustion and detonation

2.2.1 Perspectives of industrial application of detonation

Frolov S.M.

(Semenov Institute of Chemical Physics, Moscow, Russia)

Tyvärr stuvade man om i schemat med kort varsel och vi missade det mesta av detta bidrag. Vi kom in när Frolov berättade om simuleringar av roterande detonationsmotorer. De använder, precis som i bensinmotorsimuleringarna, partikel (Monte Carlo) metoder för kemin. Han jämförde med experiment utförda av Pratt&Whitney 2012, filmade med höghastighetskamera. Där ser man tydligt hur, efter initiering, detonationsvågorna först

jagar omkring närmast stokastiskt för att efter en kort stund orientera sig i ett regelbundet mönster. Oklart om dessa experiment är publicerade.

2.2.2 High-frequency pulsed detonations in heptane/oxygen mixtures

Baranyshin E.N., Krivosheyev P.N., Penyazkov O.G.

(A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute, Minsk, Belarus)

Mycket kort föredrag om PDE som går på heptan-syre blandning och testats experimentellt i upp till 100 Hz. Tydligt har man idéer kring rymdfart då man avser att prova den i vakuum i nästa steg.

2.2.3 Rethinking hydrogen jet flames

Vladimir Molkov, Jean-Bernard Saffers

(Hydrogen Safety Engineering and Research Centre (HySAFER), University of Ulster, Newtownabbey, Northern Ireland, UK)

Långt utanför vårt område men vad vi kunde förstå anser man att det vanliga sättet att uppskatta flamlängden hos underexpanderade vätgasflammar (eng. underexpanded hydrogen jet flames) är felaktigt. Man visar att medelpositionen för icke förblandad turbulent vätgasflamfront inte alls ligger på den punkt där blandningen är stökiometrisk utan 2 till 5 gånger längre bort.

2.2.4 Generation of gaseous detonation due to chamber walls impact

Vladimir A. Levin, Ivan S. Manuylovich, Vladimir V. Markov

(Institute of Mechanics, Moscow State University, Moscow, Russia)

Vladimir Levin redovisade tvådimensionella simuleringar av olika typer av kammare med rörliga väggar. I kammaren antar man en stökiometrisk blandning av bränsle och syre och undersöker sedan hur fort väggarna måste röra sig för att blandningen inuti skall gå till detonation. Även simuleringar av roterande, icke cylindriska kammare, där detonation i gasblandningen initieras genom hastig rotation och cylindriska kammare med små oregelbundenheter på inre kammarväggarna som initierar detonationen redovisades. Syftet är att studera alternativa metoder för initiering i en PDE. Man tänker sig att gasblandningen strömmar hastigt genom ett rör vars tvärsnitt förändras i enlighet med ovan nämnda modeller. Man kan t.ex. anta att gasblandningen strömmar hastigt igenom ett rör med elliptiskt tvärsnitt och där ellipsens storaxel vrider sig längs med röret. Vladimir menar att hans beräkningar ger en första uppskattning av hur fort gasen måste strömma genom röret för att gå till detonation.

Efter presentationen får vi möjlighet att tala kort med Vladimir och han erkänner att detta problem naturligtvis är mycket svårare än han beskrev det i sin presentation. Ett verkligt flöde kommer att vara turbulent och för att få noggrannare approximationer av nödvändiga flödes hastigheter måste man genomföra kompletta tredimensionella CFD simuleringar som klarar av att beskriva initiering av detonation och detonationens utbredning. Detta menar han kräver dock datorresurser som man inte ännu har tillgång till.

2.2.5 Diskussioner

I pausen hade vi även möjlighet att tala med Sergej Frolov om PDE och anpassningen av detonationspuls till omgivande atmosfär. Han menar att det inte finns något enkelt sätt att dimensionera en dysa till en PDE men att man genom erfarenhet, gissningar och 'trial and error' kommit fram till dysor som ger en 10% ökning av verkningsgraden hos denna typ av motor. Han tror inte heller att man kommer att nå mycket längre än så.

2.2.6 Study of singlet delta oxygen $O_2(1\Delta_g)$ impact on H_2-O_2 mixture ignition in flow reactor

A.A. Chukalovsky¹, K.K. Klopovsky¹, M.A. Liberman^{1,2}, Yu.A. Mankelevich¹, N.A. Popov¹, O.V. Proshina¹, and T.V. Rakhimova¹

(1Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia
2Department of Physics and Astronomy, Uppsala University, Uppsala, Sweden)

Ett posterbidrag som redovisar tvådimensionella simuleringar av tidigare utförda experiment där man försökt isolera inverkan av $O_2(a^1\Delta_g)$ på förbränningsförloppet. Experimenten utfördes tidigare av Stariks grupp och denna poster är ett försök att modellera dessa experiment. Experimentet var designat för att speciellt studera inverkan av SO-tillstånden. Huvudsyftet med modelleringsarbetet är att ta med påverkan från SO-tillstånden och se om den ökning av förbränningshastigheten som registrerades kan förklaras med hjälp av dessa. Kort kan man säga att Alexander Chukalovsky menar att enligt hans beräkningar har SO-tillstånden ingen inverkan på flammen, de quenchar innan de når flammen och eventuell ökad förbränningshastighet bör bero på en ökning av O och O_3 i flammen.

Ett mycket intressant arbete som tyvärr fått hård kritik under granskningen av bidragen inför konferensen. Bland annat så hävdar man att Chukalovsky använt fel quenchnastighet för $O_2(a^1\Delta_g)$, se 2.4.2 nedan.

2.3 Dag 3: Fundamentals of ignition and combustion

2.3.1 Numerical simulation of layered galloping detonation in supersonic flows

Vladimir A. Levin

Konstigt bidrag som använder enstegsmekanism för propan-luft förbränning och studerar hur en stökiometrisk blandning som hastigt strömmar genom en tub går till detonation när den träffar på ett hinder. Detta har naturligtvis bäring på PDE men det är svårt att se hur så avancerade förlopp kan studeras med så enkel mekanism.

2.3.2 Detonation combustion of the synthesis gas

F.A. Bykovskii, S.A. Zhdan, E.F. Vedernikov

(Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Novosibirsk, Russia)

Redovisar experiment med kontinuerlig detonationsmotor som använder syngas. Man kommer fram till att man får högsta detonationshastigheten om man använder 15 % mer

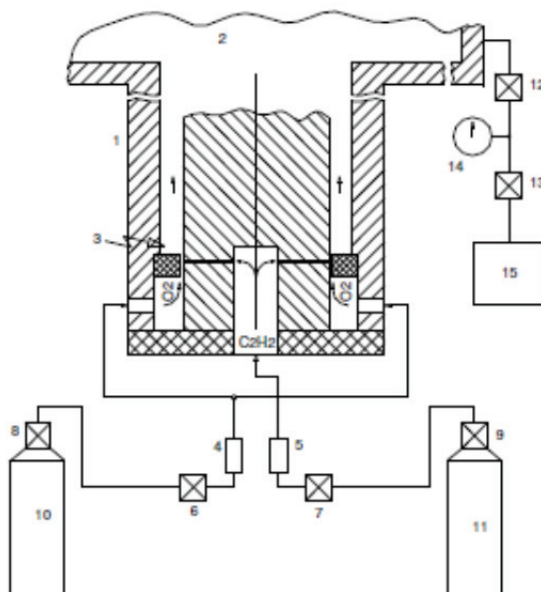
bränsle än den stökiometriska blandningen och att man kan öka hastigheten ytterligare genom att använda mer vätgas.

2.3.3 Experimental study of initiation detonation in liquid kerosene – gaseous oxidizer mixture

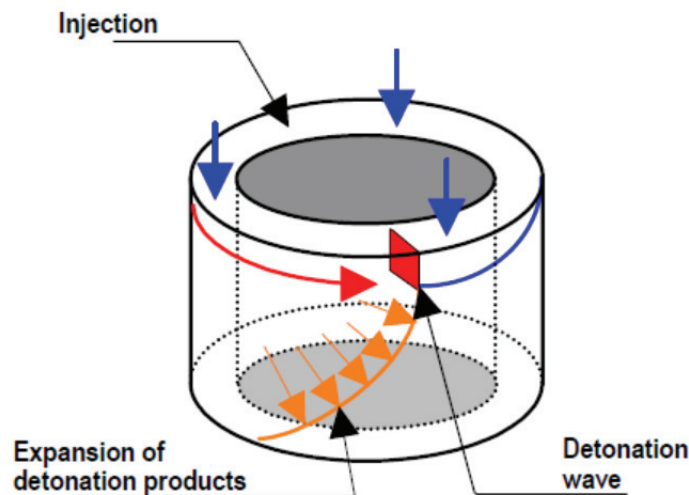
J. Kindracki

(Institute of Heat Engineering, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland)

Experiment för att klarlägga hur man bäst initierar fotogen-luft blandning till detonation. Jan visade också experiment på vad som verkade vara en ganska fungerande demonstrationsmotor. Denna matades med luft, fotogen och en mindre mängd vätgas och hade en pulsfrekvens runt 1 kHz. Motorn har en mycket enkel geometri och matas med en stökiometrisk blandning av fotogen och luft, med en 10 % inblandning av vätgas. Luft matas axiellt in i den spalt som bildas mellan ett yttre rör med en koncentriskt placerad cylinder, fotogen och vätgas injiceras radiellt in i samma spalt, schematisk bild på uppställning visas i Figur 2 hämtad från [2]. En bra introduktion till denna typ av motor är [3] som kan laddas ned från nätet, principskissen i Figur 3 är hämtad från denna publikation.



Figur 2. Schematisk beskrivning av experiment med detonationsmotor. Bilden hämtad från [2] och beskriver ett något annorlunda experiment (med C_2H_2 , syrgas och fotogen) än det Jan refererade till i sitt föredrag.



Figur 3. Mer förklarande bild av detonationsvågsmotorns funktion, hämtad från [3] som kan rekommenderas som en bra genomgång av denna typ av motor.

2.3.4 Detonation combustion of coal in a flow-type plane-radial combustor

F.A. Bykovskii, S.A. Zhdan, E.F. Vedernikov, and Yu.A. Zholobov

(Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Novosibirsk, Russia)

Detonationsvågsmotor (Continuous Spin Detonation, CSD) som går på koldamm med viss inblandning av vätgas. För att åstadkomma detonation var man tvungen att blanda i åtminstone 6 % vätgas (i förhållande till kolmängd). Detta var mindre än 1 % av luftförbrukningen.

2.4 Dag 4: Kinetics and elementary processes

2.4.1 Comprehensive analysis of kinetic and micro physic processes during oxidation of methane with Al-nanoparticle additives

Stelmah O.M., Kostritsa S., Smirnov V.V., Starik A.M., Titova N.S.

(Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russia)

Titova inleder med att påpeka att man med 2 % nano Al-partiklar i JP8 kan öka förbränningshastigheten med 50 %. Huvuddelen av föredraget handlar dock om Al inblandning i CH₄ förbränning. Hon påpekar att för Al partiklar med diameter under 5 nm minskar ytspänningen markant och detta kan utnyttjas i förbränningsssammanhang. Vidare nämner hon att Al-partiklar använts länge, speciellt i raketmotorer, men att det inte finns någon reaktionskinetik utvecklad och redovisar första stegen i riktning mot en sådan kinetik. Efter detta visas experimentella data på förbränning av CH₄ + luft med 5 % Al-inblandning och en mycket förhöjd förbränningshastighet. I avgaserna får man Al₂O₃-partiklar med en storlek om ungefär 200 nm. Detta föredrag får ses som ganska exotiskt och kanske har bäring på vissa militära applikationer men som en av åhörarna påpekade så

är det inte så trevligt med aluminiumpartiklar i avgaserna eftersom de kan förstöra avgassystemet även på vissa typer av raketmotorer.

2.4.2 Theoretical study of elementary processes in $H+O_2(a^1\Delta_g)$ reacting system

Sharipov A.S., Starik A.M.

(Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russia)

Denna presentation handlade helt och hållet om att ta reda på reaktionshastigheter för $H+O_2(a^1\Delta_g)$ och jämföra dessa mot befintliga experimentella data över ett brett temperaturområde (300-1500K). Speciellt lades stor vikt vid att ta fram quenchtider för $O_2(a^1\Delta_g)$, dessa befanns vara nästan en faktor fem lägre än de värden man hittills ofta använt. Sharipov redovisade komplicerade beräkningar och mycket siffror så det var mycket svårt att hänga med och vi försökte få ta del av själva presentationen men arbetet är inte publicerat ännu. Sharipov lovade dock att sända oss en del bakgrundsmaterial och meddela oss när artikeln publiceras.

Kommentar

Det verkar finnas en konflikt kring vilka de rätta reaktionshastigheterna skall vara. Chukalkovsky (2.2.6) menar att: $H+O_2(a^1\Delta_g) \rightarrow O + OH$ har en rate motsvarande $k = \alpha k_r$ och att den quenchange reaktionen $H+O_2(a^1\Delta_g) \rightarrow O_2 + H$ har en rate motsvarande $k = (1-\alpha)k_r$ där $\alpha = 0.2$, vilket alltså skulle betyda att detta SO tillstånd snabbt quenchar. I just det specifika experiment som han analyserat menar han att de flesta SO-molekyler aldrig når flamman utan quenchar på storleksordningen 100 μs innan de hinner in i flamman.

Sharipov och Starik menar å andra sidan att deras teoretiska utredningar visar på ett $\alpha = 0.9$ vid $T > 300$ K, nästan en faktor fem större. Som nämns ovan hade de dessutom tagit fram reaktionshastigheten, k_r , över ett brett temperaturområde.

2.4.3 The use of artificial plasma for reduction of aircraft radar visibility

A.I. Golovin, A.S. Koroteev

Syftet är att generera ett plasma framför luftintaget på flygplan för att minska radarsignaturen. Här genererar man plasmat med hjälp av en elektronstråle som emitteras ut från flygplanskroppen framför de två luftintagen. Man genererar en förvånansvärt stor plasmavolyum med en jonisationsgrad om 10^{-6} i förhållande till omgivande atmosfärstäthet. Med 5-50 kW effekt i elektronkanonen kan man erhålla tillräcklig dämpning av radareko på flyghöjder mellan 15 och 25 km. Vill man flyga ned till 8 km behöver man storleksordningen 500 kW och det blir knappast rimligt att använda metoden annat än mycket korta stunder. Det presenterade arbetet var i huvudsak teoretiskt men man visade även data av radarsignaturen från experiment på motorer som kördes i mycket stor lågtryckskammare.

Elektronkanonen som användes är en ryskproducerad (Novosibirsk) 'off the shelf' produkt som enligt Koroteev även köptes in av USA när man ville sterilisera post som kunde misstänkas innehålla farliga bakterier och virus efter 9/11.

2.4.4 Numerical optimization of a novel resistojet powered by super capacitors

Arkadiusz Kobiera, Jan Kindracki, Łukasz Boruc, Łukasz Mężyk

(Warsaw University of Technology, Warszawa, Poland)

En resistojet är en mycket enkel elektrotermisk motor som i huvudsak används för satellitpositionering. Normalt driver man en resistojet direkt från satellitens elförsörjningssystem men då en resistojet kräver hög effekt blir det inte praktiskt genomförbart på små satelliter. Men då driften på denna typ av motor är mycket intermitterant (den används bara mycket liten del av tiden men behöver då hög effekt) undersöker man olika elektriska energilagringssystem. Här presenteras en undersökning där man laddar superkondensatorer långsamt (vid låg effekt) som sedan kan laddas ur under hög effekt. Man finner att det är en fullt genomförbar metod vars effektivitet begränsas i huvudsak av de i resistojeten ingående metallernas tålighet för höga temperaturer. Uttryckt på annat sätt innebär detta att metoden bli effektivare ju högre effekt man kan driva motorn med.

2.4.5 Diskussioner

På torsdagskvällen var det bankett och vi fick möjlighet att beskriva vårt projekt EFFECT för Starik. Han tycker det låter mycket intressant och kan tänka sig att samarbeta med oss men när vi försöker bjuda honom till Sverige för att ge föreläsningar säger han att han inte har tid men att vi är välkomna att besöka honom och hans grupp i Ryssland.

2.5 Dag 5: Plasma and laser assisted combustion

2.5.1 Reactive species production and ignition of the hydrogen-oxygen mixture by RF DBD

I.A. Shkurenkov, Yu.A. Mahkelevich and T.V. Rakhimova

(Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov's Moscow State University, Moscow, Russia)

Shkurenkov redovisar simuleringar av en RF (RadioFrekvens) DBD (Dielectric Barrier Discharge, en kapacitiv urladdning) genom vilken en stökiometrisk blandning av syrgas och vätgas strömmar. Urladdningen arbetar vid atmosfärstryck och man använder en mycket komplett mekanism som innehåller mer än 500 reaktioner för molekyler, atomer och joner, även elektroniskt och vibrationellt exciterade tillstånd finns med. Det mest intressanta med detta bidrag är att man använt en modulerad spänning för att driva urladdningen, dels en bärvåg på 1.76 MHz och dels en lågfrekvent signal på 100 kHz. Drivspänningen var av typen $\phi(t) = \phi_0 \sin(2\pi f t)$ med $f = f_0 + \alpha \sin(2\pi f_1 t)$ och $f_1 = 100$ kHz, modulationsparametern α varierades mellan 0.05 och 0.25. Detta ger, i jämförelse med att bara driva den med 1.76 MHz, en tiofaldig ökning av mängden radikaler i bränsle-luft blandningen vid samma temperatur. Orsaken är nog inte helt klarlagd men Shkurenkov menar att då skillnaden i frekvens mellan drivspänningarna inte är ett heltal blir det inte heller någon periodisk upprepning av urladdningsförhållandena. Han ser också i simuleringarna att urladdningens geometri förändras markant jämfört mot fallet då f_0/f_1 är ett heltal.

Kommentar

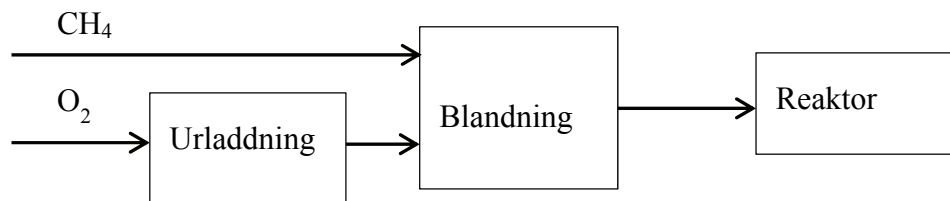
Det verkar finnas en hel del konkurrens mellan gruppen från CIAM och gruppen från Universitetet i Moskva då representanter från dessa organisationer ofta kritiserar varandras bidrag ganska hårdhänt. Starik hade t.ex. en stor mängd invändningar mot den kinetik som användes av Shkurenkov. Representanter från Moskva Universitet har å sin sida ofta invändningar mot kinetiken som används på CIAM.

2.5.2 Kinetics of methane partial oxidation by nonequilibrium low temperature plasma

Kuleshov P.S., Loukhovitski B.I., Naumov V.V., Titova N.S., Starik A.M.

(Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russia)

Naumov inleder med lite bakgrund på plasmareformering och nämner faktiskt plasmatronen som utvecklades på MIT av Cohn och Bromberg. Det är annars rätt ovanligt att man överhuvudtaget refererar till amerikanskt material på denna konferens. Han beskriver plasmatronen som färdig och fullt fungerande, vilket inte är helt sant¹. En skiss på uppställningen som simulerats kan ses i Figur 4. Bränsle och syre har en temperatur på 800-1000 K och trycket har varierats mellan 1 och 5 atm. Syret strömmar genom en elektrisk urladdning och blandas omedelbart med metan. Blandningen modelleras som omedelbar. I reaktorn där man kan mäta induktionslängd (hur långt in i reaktorn blandningen hinner innan den antänder) och på så sätt få ett mått på tändningsfördröjningen.



Figur 4. Schematisk beskrivning av systemet som modellerats i detta bidrag.

Urladdningsmodellen är mycket komplett och tar hänsyn till elastiska kollisioner mellan atomer och molekyler med elektroner, dissociation, jonisation och excitation av inre atomära och molekylära tillstånd som följer av elektronkollisioner. Modellen inkluderar $O(^3P)$, $O(^1D)$, $O(^1S)$, $O_2(X^3\Sigma_g^-, V=1, \dots, 4)$, $O_2(a^1\Delta_g)$, $O_2(b^1\Sigma_g^+)$, $O_2(A^3\Sigma_u^+)$, e , O^- , O^+ och O_2^+ . Detta kan verka mycket ambitiöst men faktum är att detta nog är ganska enkelt att göra med BOLSIG+ och ZDplaskin som finns att ladda ned gratis från nätet och tvärsnitten för ovan nämnda tillstånd bör gå att få tag på om de inte redan ingår i de tvärsnittsdata-baser man också kan ladda ned. Problemet är snarare att ta med de exciterade tillstånden i förbränningsmodellen då detta kräver reaktionskinetik för dessa tillstånd.

¹ I verkligheten togs konceptet över av en motorfirma som strax efter man börjat arbeta med anpassningen av plasmatronen till motorn blev uppköpt och rekonstruerad. Efter rekonstruktionen hade plasmatronen rationaliserats bort (källa: samtal med Daniel R Cohn vid MIT).

Slutsatsen i detta föredrag var lite svår att få kläm på men Naumov menar, vad vi förstod, att utbytet blir effektivast om elektriska fältet (mätt i Townsend, $E/N \cdot 10^{21} = 1 \text{ Td}$) är cirka 10 Td vilket är ett förvånansvärt lågt värde (genomslagshållfasthet för luft är ungefär 125 Td). Den huvudsakliga orsaken till den ökade brinnhastigheten (kortare induktionslängden) var förekomsten av elektroniskt exciterade tillstånd i syrgasen.

2.5.3 Modeling study of the effect of singlet oxygen molecules on the HCCI engine performance

Titova N.S., Kozlov V.E., Starik A.M.

(Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russia)

Starik inleder med att tala om kompressionsmotorer (utan tändstift) och speciellt dieselmotorer men går sedan över till att redovisa modelleringsarbete som gäller CH_4 + luft i kompressionsmotor. Återigen handlar det om att excitera SO-tillstånden, speciellt $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$, detta kan göras antingen med hjälp av 762 nm laser (detta är ju alltför energikrävande och knappast realistiskt i en praktisk applikation) eller med en elektrisk urladdning, vilket är mer realistiskt. Syftet med detta arbete är att troliggöra att man både kan öka förbränningseffektiviteten och minska NO_x . Då SO-tillstånden har en kort livslängd är det viktigt att excitera dem sent i motorns cykel. Det är å andra sidan svårare att med elektrisk urladdning få en enkel produktion vid högt tryck så detta är en avvägning.

Starik inleder med att redovisa för CIAMs modell där man tagit hänsyn till inverkan av $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$ på NO_x och CO produktion och jämför denna med en mängd andra teoretiska, väl beprövade modeller, för att validera den i fallet utan $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$. Bland annat nämns en modell av Konnov (2008) som en av de modeller man validerat mot. Man använder CHEMKIN för kinetiska beräkningar. Han redogör för resultat som visar att det är mycket effektivare att excitera SO-tillstånden med urladdning än att använda samma energi för att värma gasen. Med 4 % SO-tillstånd (i förhållande till totala syremängden) ökar förbränningstemperaturen med närmare 5 %, CO kan, i vissa fall, halveras och även NO_x minskar med upp till en faktor fyra. Skälet till NO_x minskningen anges vara att man, om man använder exciterat syre, kan sänka inloppstemperaturen på gasen och ändå få samma effekt ut. I ett tidigare, mer översiktligt, föredrag har han nämnt att NO_x -produktionen kan gå ned en faktor två med runt 5 % SO-tillstånd i CH_4 -luft förbränning men då angavs som anledning att NO_x -produktionen går långsammare med SO-tillstånden i luften.

Hudsakliga orsaken till ökningen av förbränningshastigheten är enligt Starik att reaktionen $\text{CH}_4 + \text{O}_2(a^1\Delta_g) \rightarrow \text{CH}_3 + \text{HO}_2$ och de två delkedjorna $\text{CH}_3 + \text{O}_2(a^1\Delta_g) \rightarrow \text{CH}_3\text{O} + \text{O}$ och $\text{CH}_3 + \text{O}_2(a^1\Delta_g) \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{O}$ accelereras markant i jämförelse med om de sker med icke exciterat syre.

Starik konkluderar att man visat på en 30 % energiökning, 1.5 % av denna energi har använts för att excitera syret med hjälp av en elektrisk urladdning. Detta låter fantastiskt men det är inte helt klart för oss hur han kommer fram till exakt dessa siffror.

Kommentar

Då detta är ett helt teoretiskt arbete kan det mycket väl vara så att man bara tar hänsyn till den energi som teoretiskt går åt för att excitera syret så att det innehåller 4 % SO-tillstånd. Det går naturligtvis att även ta hänsyn till verkningsgraden i urladdningen för att komma närmare den verkliga energikostnaden för SO-produktionen även i ett teoretiskt arbete men det är oklart om det är vad man gjort i ovanstående arbete. Starik har en enorm mängd data på varje bild och det är mycket svårt att hänga med i svängarna och även om man kan

ställa frågor efteråt är det inte alltid lätt att få korta svar. Det blir ofta en ytterligare föreläsning. En del av arbetena som presenteras av Stariks grupp är inte publicerat ännu så de vill inte lämna ut materialet men vi har fått löfte om att få dem skickade till oss när publiceringen är klar.

2.5.4 Effect of the exposure of air flow to resonance laser radiation on the combustion performance in scramjet model combustor

Bezgin L.V., Kopchenov V.I., Titova N.S. and Starik A.M.

(Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russia)

Genom att använda laser vid 193.3 nm för att fotodissociera O₂ och 762.3 nm för att excitera O₂ till SO-tillstånd visar man att man kan korta ned fördröjningstiden, och därmed induktionslängd, i en scramjetmotor. Svårt att följa detta bidrag men slutsatsen var i alla fall att man minskade fördröjningstiden mest med UV-lasern (193.3 nm) som kan dissociera syremolekylerna.

2.5.5 Excited oxygen generation by atmospheric RF plasma discharge for combustion intensification

K. Pliavaka¹, K. Zähringer¹, F. Pliavaka², S. Gorbatov², U. Riedel³, N. Slavinskaya³, N. Kuntner³, D. Thévenin¹

(1 Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungstechnik (LSS), Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OVGU), Germany; 2 A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute (HMTI) of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus; 3 Institut für Verbrennungstechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart, Germany)

Plivaka redogör för experiment under atmosfärstryck med elektriskt excitation av flamma. Han börjar med att lista tre tänkbara metoder för elektrisk flamstimulering:

1. Temperatur och tryckökning med hjälp av gnisturladdning (genomslag som ger direkt termisk uppvärmning).
2. Molekylär dissociation genom elektron-molekyl kollisioner för att skapa radikaler som kan starta reaktionskedjan. Detta kan göras med t.ex. en DBD-urladdning och kräver elektriska fält med $E/N > 15$ Td.
3. Excitation av vibrationstillstånd och elektronisk excitation. Detta kan göras med flera olika typer av urladdningar och med elektriska fält där $E/N < 15$ Td. Han menar att dessa tillstånd kan öka reaktionshastigheter för vissa delar av reaktionskedjan med upp till 1000 gånger.

Den sist listade metoden är naturligtvis den mest intressanta då den kräver relativt låga fält och därigenom låg energi. För att excitera molekylärt syre utan att göra av med för mycket energi bör man ha en elektrontemperatur mellan 1 och 1.5 eV.

För de experiment som redovisas har man konstruerat en ny brännare som var dåligt beskriven för att återges här. Man drev en urladdning vid 1 MHz och tändspänning 25 kV, när man tänt urladdningen går spänningen ned till 200-2000 V, uteffekten är begränsad till 450 W. Det är svårt att avgöra vilken effekten var i brännaren (tänkte inte på att fråga detta efter föredraget) men att döma av storleken på brännaren kan det inte ha varit mer än några få kilowatt. Tillsätter man upp till 450 W elektriskt energi är det inte konstigt att det brinner fortare. Plivaka visar även uppmätta spektrum där det finns ett tydligt lokalt

maximum vid 762 nm där man förväntar sig att $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ skall finnas och ett vid 777 nm som indikerar förekomst av atomärt syre. Det var tyvärr inte helt klart från vilken del av flamman eller gasblandningen dessa spektrum var tagna. Skalan på spektrumet var också sådan att det inte gick att dra några slutsatser om andelen av dessa tillstånd i jämförelse med andelen molekylärt syre.

3 Slutsatser och intryck

Alldeles uppenbart är att den hetaste frågan just nu är det så kallade SO-tillstånden, deras inverkan på ett förbränningsförlopp, hur de skall beskrivas teoretiskt och hur man skapar dem med minsta möjliga energi. De flesta bidragen som adresserade dessa problem var teoretiska och de få experimentella bidragen innehåller mycket stora osäkerheter. Både teoretiska och experimentella bidrag genererar dessa tillstånd med någon form av elektrodurladdning och ofta under lågt tryck vilket knappast är rimligt i en verklig applikation där elektroderosion kommer att vara en starkt begränsande faktor. Dessutom har dessa tillstånd, även om det råder viss oenighet kring exakta siffror, korta livslängder vilket innebär att man i en applikation där bränsle och luft tillförs i underljudshastighet måste generera dem mer eller mindre direkt i flammen. I en scramjet kan situationen, på grund av det hastiga flödet, möjligtvis vara annorlunda men i det fallet är knappast energifrågan den viktigaste och man kan kosta på sig att tillföra en hel del energi för att få stabil förbränning.

4 Referenser

1. A M Starik, N S Titova and I V Arsentiev, *Comprehensive analysis of the effect of atomic and molecular metastable state excitation on air plasma composition behind strong shock waves*, Plasma Sources Sci. Technol. 19 (2010) 015007
2. Piotr Wolanski, Jan Kindracki, Toshi Fujiwara, Yasuyuki Oka, Katsuyuki Shimachi, *An Experimental Study of Rotating Detonation Engine*, Oklart vart denna publicerats.
3. F. Falempin, *Continuous Detonation Wave Engine*, In Advances on Propulsion Technology for High-Speed Aircraft (pp. 8-1 – 8-16). Educational Notes RTO-EN-AVT-150, Paper 8. Neuilly-sur-Seine, France: RTO. Available from: <http://www.rto.nato.int>.