

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΩΝ ΡΥΠΩΝ
ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ
ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥΣ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: 1) ΤΖΟΥΡΑΜΑΝΗΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ
2) ΚΑΠΟΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: 1) ΓΙΑΝΝΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
2) ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΜΑΥΡΙΔΗΣ**

ΠΑΤΡΑ, ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας και αναφέρεται στην ανάλυση των ρύπων που εκπέμπονται από διαφορετικούς τύπους αεριοστροβίλων που χρησιμοποιούνται σε σχετικές εφαρμογές είτε επίγειες είτε σε αεροσκάφη καθώς επίσης προτείνονται διάφοροι τρόποι για τον τρόπο ελέγχου τους.

Ευχαριστούμε θερμά τους Επιβλέποντες Καθηγητές μας κ. Κων/νο Μαυρίδη, Καθηγητή και τον κ. Ιωάννη Γιαννάκη, Συνεργάτη Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολογίας, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μας προσέφεραν για την πραγματοποίηση της πτυχιακής εργασίας μας.

ΤΖΟΥΡΑΜΑΝΗΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ- ΚΑΠΟΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία αναφέρεται στην ανάλυση των ρύπων που εκπέμπονται από διαφορετικούς τύπους αεριοστροβίλων που χρησιμοποιούνται σε σχετικές εφαρμογές είτε επίγειες είτε σε αεροσκάφη καθώς επίσης προτείνονται διάφοροι τρόποι για τον τρόπο ελέγχου τους.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε 2 Κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή για τις αρχικά σχέδια της ανάπτυξης των αεριοστροβίλων, τους τύπους των καυστήρων και τα βασικά χαρακτηριστικά στοιχεία τους (ζώνες, ψύξη τοιχωμάτων και εφαρμογές)..

Στο δεύτερο Κεφάλαιο που είναι και το βασικό κεφάλαιο της πτυχιακής εργασίας μας αναπτύσσονται οι μηχανισμοί δημιουργίας των ρύπων και οι τρόποι μείωσης των ρυπογόνων εκπομπών είτε μέσω μείωσης της θερμοκρασίας της φλόγας, είτε μέσω του επανασχεδιασμού καυστήρων, είτε μεταβολής της διαδικασίας καύσης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</u>	1
<u>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</u>	2
<u>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</u>	3
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ: ΒΑΣΙΚΕΣ ΘΕΩΡΗΣΕΙΣ</u>	4
1.1 Εισαγωγή	4
1.2 Πρώιμη ανάπτυξη καυστήρων	5
1.3 Βασικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού	9
1.4 Απαιτήσεις καυστήρα	10
1.5 Τύποι καυστήρων	11
1.6 Διαχύτης	14
1.7 Κύρια Ζώνη	16
1.8 Ενδιάμεση Ζώνη	16
1.9 Ζώνη αραίωσης	17
1.10 Προετοιμασία του καυσίμου	18
1.11 Ψύξη τοιχωμάτων	20
1.12 Καυστήρες για χαμηλές εκπομπές	21
1.13 Καυστήρες για μικρούς κινητήρες	23
1.14 Βιομηχανικοί θάλαμοι	24
1.15 Κινητήρες Αερίωθης	26
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ: ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ</u>	28
2.1 Εισαγωγή	28
2.2 Περιβαλλοντικά προβλήματα-Επίδραση ρύπων	29
2.3 Διεθνείς κανονισμοί	31
2.4 Μηχανισμοί σχηματισμού ρύπων	36
2.5 Μείωση ρύπων στους συμβατικούς κινητήρες	51
2.6 Μείωση ρύπων μέσω ελέγχου της θερμοκρασίας φλόγας	61
2.7 Dry Low NOx καυστήρες	67
2.8 Πτωχή Προ-αναμεμιγμένη Προ-εξατμισμένη καύση	81
2.9 Πλούσιας καύσης-Γρήγορης Σβέσης-Πτωχής καύσης καυστήρας	84
2.10 Καταλυτική καύση	86
2.11 Συσχέτιση και μοντελοποίηση εκπομπών NOx και CO	92
2-12 Συμπεράσματα	97
<u>ΑΝΑΦΟΡΕΣ</u>	99

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΒΑΣΙΚΕΣ ΘΕΩΡΗΣΕΙΣ

1-1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κύριος λόγος αυτού του εισαγωγικού κεφαλαίου είναι να συζητηθούν οι κύριες απαιτήσεις των καυστήρων αεριοστρόβιλων και να περιγραφούν σε γενικούς όρους οι διάφοροι τύποι και διαμορφώσεις καυστήρων σε αεροσκάφη και βιομηχανικούς κινητήρες. Τα κύρια γεωμετρικά και αεροδυναμικά χαρακτηριστικά που είναι κοινά στους περισσότερους τύπους αεριοστρόβιλων καλύπτονται σύντομα και ιδιαίτερη λεπτομέρεια δίνεται στη προετοιμασία καυσίμων και στην ψύξη ώστε να σημειωθεί ο σημαντικός ρόλος αυτών των δεδομένων που παίζουν στην ανάπτυξη των καυστήρων.

Έχοντας υπόψη μας τις πιέσεις και τις απαιτήσεις που προέκυψαν σε καιρό πολέμου στη Βρετανία και τη Γερμανία και την έλλειψη γνώσης και εμπειρίας διαθέσιμης στον σχεδιαστή, δεν προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι η πρώτη γενιά των στροβιλοκαυστήρων είχαν μεγάλες διαφορές σε μέγεθος και γεωμετρία και στο τρόπο έγχυσης του καυσίμου και με το πέρασμα του χρόνου και μετά τον πόλεμο (άρση της ανταλλαγής πληροφοριών) μερικές ομοιότητες σε σχέδιο και φιλοσοφία ξεκίνησαν να αναδύονται. Γύρω στο 1950, περισσότερα από τα κύρια χαρακτηριστικά ενός συμβατικού καυστήρα αεριοστρόβιλου καθιερώθηκαν.

Έκτοτε η τεχνολογία των καυστήρων εξελισσόταν σταδιακά αλλά όχι ριζικά, κυρίως γιατί οι περισσότεροι καυστήρες που υπάρχουν τώρα τείνουν να μοιάζουν σε μέγεθος, σχήμα και εξωτερική εμφάνιση. Αυτές οι ομοιότητες πηγάζουν από το γεγονός ότι η βασική γεωμετρία ενός καυστήρα καθορίζεται από την ανάγκη της μετωπικής επιφάνειας να μένει μέσα σε κάποια όρια που ορίζουν άλλα εξαρτήματα του κινητήρα, από την ανάγκη του διαχύτη να ελαχιστοποιεί την απώλεια πίεσης και την ανάγκη ενός σωλήνα φλόγας να προσδίδει σταθερή λειτουργία μέσα σε ένα μεγάλο εύρος αναλογιών αέρα/καυσίμου. Κατά τη διάρκεια του μισού περασμένου αιώνα, οι πιέσεις των καυστήρων αυξήθηκαν από 5 σε 50 ατμόσφαιρες, οι θερμοκρασίες εισαγωγής αέρα από 450 σε 900K και οι εξωτερικές θερμοκρασίες από 1100 σε 1850K. Παρά την συνεχώς αυξανόμενη δριμύτητα των συνθηκών λειτουργίας που επιδεινώνονται από τις ταυτόχρονες αυξήσεις της εξωτερικής ταχύτητας του συμπιεστή, οι σημερινοί καυστήρες πλησιάζουν το 100% της αποδοτικότητας καύσης της κανονικής λειτουργίας τους, συμπεριλαμβάνοντας ρελαντί και επιδεικνύουν σημαντικές μειώσεις σε εκπομπές ρύπων. Επιπλέον, η διάρκεια ζωής τους αυξήθηκε από τις 100 ώρες σε δεκάδες χιλιάδες ώρες.

Παρόλο που πολλά προβλήματα έχουν ξεπεραστεί, η πρόκληση της εφευρετικότητας στο σχεδιασμό υπάρχει, και νέες ιδέες και τεχνολογίες χρειάζονται για μεγαλύτερη μείωση ρύπων και για την ανάγκη πολλών βιομηχανικών κινητήρων για χρήση πολλαπλών καυσίμων.

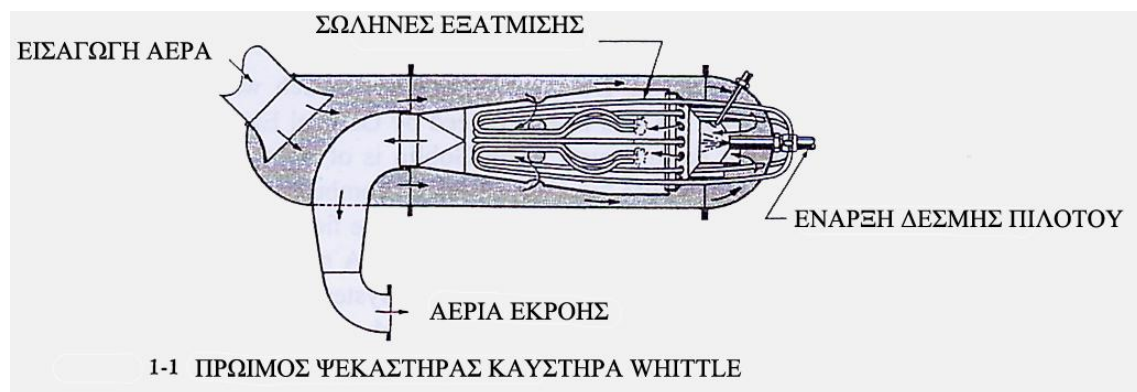
Είναι πολύ σημαντικό η ανάπτυξη των καυστήρων να κινείται το ίδιο γρήγορα με την ανάπτυξη άλλων σημαντικών εξαρτημάτων των κινητήρων, μείωση στο μέγεθος και στο βάρος των καυστήρων θα παραμένει μια σημαντική ανάγκη για τις αερομηχανές, ενώ η τάση προς υψηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες τουρμπίνας θα απαιτούν καλύτερη προσκόλληση στον καλύτερο σχεδιασμό προφίλ θερμοκρασιών στο εσωτερικό της τουρμπίνας. Ταυτόχρονα η ανάγκη για μεγαλύτερη αξιοπιστία, αυξημένη διάρκεια, και χαμηλότερα έξοδα ανάπτυξης και κατασκευής πιθανόν να είναι θέματα αναγκαία στο μέλλον. Για να ανταπεξέλθουμε σε αυτές τις προκλήσεις η έρευνα οδηγείται προς νέα υλικά και μεθόδους κατασκευής για να απλοποιήσουν τον σχεδιασμό του καυστήρα και να μειώσουν το κόστος. Η έρευνα έχει ήδη οδηγήσει στην ανάπτυξη εξελιγμένων τεχνικών ψύξης των τοιχωμάτων και στην ευρεία χρήση πυρίμαχων επιστρώσεων μέσα στο καυστήρα.

1-2: ΠΡΩΙΜΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΥΣΤΗΡΩΝ

Εδώ θα δοθεί ένα σύντομο χρονικό εξέλιξης της καύσης των αεροστροβίλων το τελευταίο μισό αιώνα. Για τους Βρετανούς και Γερμανούς μηχανικούς η ανάπτυξη ενός εφαρμόσιμου καυστήρα ήταν ένα εμπόδιο που έπρεπε να περάσουν στην προσπάθειά τους να φτιάξουν ένα πρακτικό στροβιλοκινητήρα. Ήταν ένα τεράστιο έργο και για τους δυο και στην περίπτωση της Whittle τα προβλήματα καύσης κυριαρχούσαν στα πρώτα 3 χρόνια της ανάπτυξης. Τα παρακάτω έχουν σκοπό να καλύψουν εν συντομία την πρώιμη ιστορία καύσης των αεροστροβίλων στην Μεγάλη Βρετανία, στη Γερμανία και στην Αμερική την περίοδο της αρχής του Β' παγκοσμίου πολέμου γύρω στο 1950, μια εποχή που ήταν κοινώς αποδεκτό ότι η εμβολομηχανή είχε φτάσει τα όρια της σαν ένα προωθητικό σύστημα για ταχείες πτήσεις και ο αεροστρόβιλος είχε καθιερωθεί ως η κύρια επιλογή για εφαρμογές σε αεροπλάνα.

ΜΕΓΑΛΗ ΒΡΕΤΑΝΙΑ

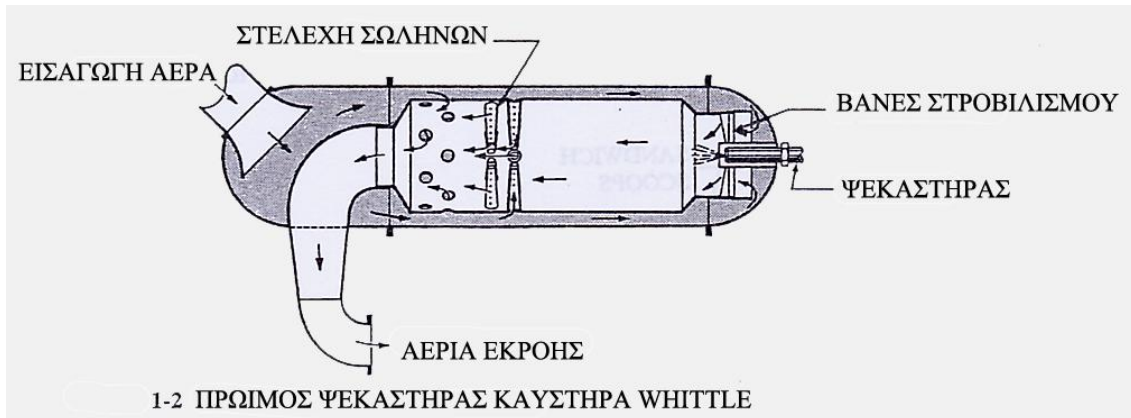
Μια μέθοδος ετοιμασίας του υγρού καυσίμου για καύση είναι να το θερμάνεις πάνω από το όριο βρασμού του βαρύτερου συστατικού του υδρογονάνθρακα, ώστε να έχει μετατραπεί σε ατμό πριν τη καύση. Αυτή ήταν η μέθοδος που υιοθετήθηκε από τον Whittle για τον πρώτο του στροβιλοκινητήρα. Αυτός ο κινητήρας είχε δέκα διαφορετικούς σωληνοειδείς καυστήρες σε διευθέτηση ανεστραμμένης ροής να επιτρέπει μια μικρή άτρακτο της μηχανής. Ο Whittle δοκίμασε πάνω από 30 εκδοχές διαμόρφωσης του σωλήνα εξάτμισης, εκ των οποίων μια φαίνεται στη φωτογραφία 1-1.



Αυτή η φωτογραφία δείχνει ότι το καύσιμο θερμαινόταν σε σωλήνες τοποθετημένους στη ζώνη φλόγας. Το καύσιμο διατηρούταν σε υψηλή πίεση έτσι ώστε η εξάτμιση να αποτρέπεται μέχρι να γίνει έγχυση μέσω ενός στομίου και η πίεση του να μειωθεί στη ζώνη καύσεως. Ο Whittle αντιμετώπισε δυσκολίες με αυτό το σύστημα, κυρίως λόγω προβλημάτων ραγίσματος από τη θερμότητα καθώς και ανθρακοποίησης των σωλήνων εξάτμισης καθώς και δυσκολίες στον έλεγχο της παροχής καυσίμου.

Μετά από πολλές δοκιμές, ο Whittle υιοθέτησε ένα καυστήρα που το κύριο χαρακτηριστικό του ήταν η αντικατάσταση των σωλήνων εξάτμισης από ένα ψεκαστήρα στροβιλισμού πίεσης που είχε μεγάλη γωνία ψεκασμού κώνου. Άλλο ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό του νέου καυστήρα ήταν ότι η πρωταρχική ζώνη της ροής του αέρα εισερχόταν στη ζώνη καύσεως μέσα από ένα μεγάλο στροβιλιστή αέρα τοποθετημένο στην απέναντι άκρη του, γύρω από το στόμιο του καυσίμου όπως φαίνεται και στο σχέδιο 1-2. Αυτός ο στροβιλιστής δημιουργεί μια σπειροειδής ανεστραμμένη ροή που ανακύκλωνε μέρος από τα θερμά προϊόντα καύσης που τα αναμιγνύει με τον εισερχόμενο αέρα και καύσιμο.

Αυτή η διάταξη όχι μόνο καθήλωνε τη φλόγα αλλά παρείχε γρήγορη ανάμιξη καυσίμου, αέρα και προϊόντων καύσης που χρειαζόταν για να επιτευχθούν μεγάλες απελευθερώσεις ποσών θερμότητας. Ο επιπλέον αέρας που χρειαζόταν για να ολοκληρωθεί η καύση και να μειωθεί η θερμοκρασία του αερίου σε μια τιμή επιτρεπτή για την τουρμπίνα, παροχετευόταν από στελέχη σωλήνων τοποθετημένους ακτινικά προς τα μέσα καθώς και στην επένδυση των τοιχωμάτων.



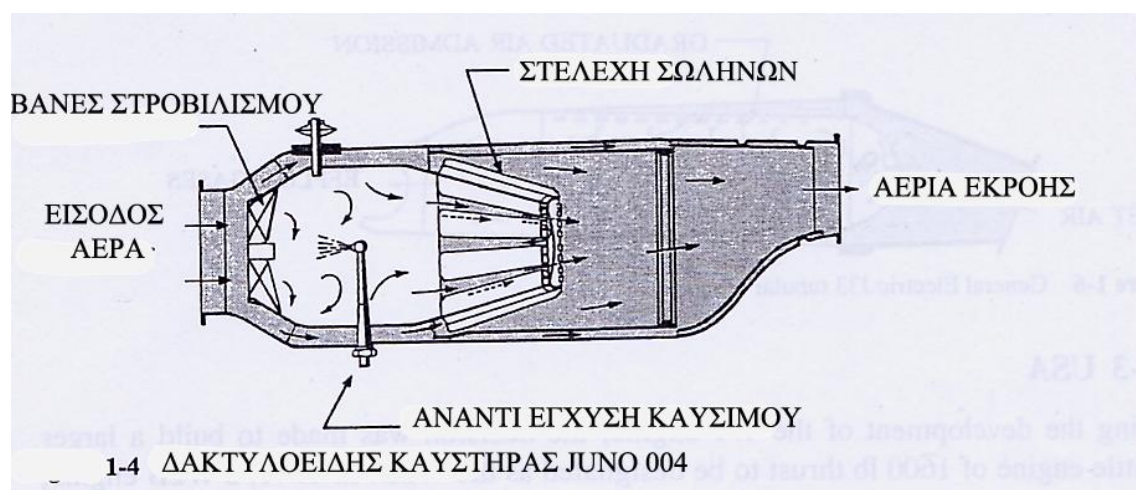
Μετά από κατάλληλη ανάπτυξη, αυτός ο καυστήρας υιοθετήθηκε για τον Power Jet W1 κινητήρα με τον οποίο έγινε η πρώτη Βρετανική αεριωθούμενη πτήση στις 15 Μαΐου 1941. Άλλος ένας πρώιμος Βρετανικός κινητήρας ήταν ο De Havilland Goblin που ήταν ο πρώτος κινητήρας του Lockheed P-40. Ο Goblin έχει ιστορικό ενδιαφέρον διότι ήταν ο πρώτος Βρετανικός κινητήρας που χρησιμοποιούσε απευθείας καύση σε αντίθεση με την ανεστραμμένου τύπου καύση που χρησιμοποιούνταν στους προηγούμενους κινητήρες. Ο πρώτος Βρετανικός δακτυλιοειδής καυστήρας εμφανίστηκε στον κινητήρα Metropolitan Vickers Beryl. Ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό αυτού του καυστήρα ήταν η χρήση της αντίθετης εισχώρησης καυσίμου. Αυτό το σύστημα είχε χρησιμοποιήσει και σε άλλους κινητήρες με το ένα παράδειγμα να είναι ο Γερμανικός Jumo 004. Το κύριο πλεονέκτημα της αντίθετης εισχώρησης καυσίμου ήταν ο μεγαλύτερος χρόνος παραμονής σταγονιδίων καυσίμου μέσα στη ζώνη καύσεως που παρείχε περισσότερο χρόνο για εξάτμιση καυσίμου. Ρυθμίσεις ψύξης για τον ψεκαστήρα του βραχίονα τροφοδοσίας αλλά ήταν δύσκολο να εξαλείφει εντελώς το πρόβλημα της εναπόθεσης άνθρακα στον ψεκαστήρα. Για το λόγο αυτό η αντίθετη εισχώρηση καυσίμου δεν θεωρείται ως μια πρακτική λύση.

Άλλο ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό του καυστήρα Metrovick είναι ο τρόπος με τον οποίο ο αραιωμένος αέρας εισάγεται στα αέρια καύσης κάτω από την πρωταρχική ζώνη καύσης. Αυτό θυμίζει την μέθοδο του Jumo 004. Η εικόνα 1-3 δείχνει δυο σειρές από στενούς απαγωγείς που παρεμβάλουν ψυχρά ρεύματα αέρα με θερμά προϊόντα καύσεως. Η πρώτη σειρά από απαγωγείς παρέχουν αέρα για την ολοκλήρωση της καύσης, με οποιαδήποτε υπέρβαση να λειτουργεί ως αραιωμένος αέρας. Ο αέρας που ρέει μέσα από τη δεύτερη σειρά απαγωγών ήταν μόνο για λόγους αραιώσεως του αέρα. Αυτός ο μείκτης τύπου "σάντουιτς" έχει χρήσιμα πλεονεκτήματα όπως χαμηλή απώλεια πίεσης και χαμηλό δείκτη αντιγραφής του σχεδίου του. Όμως, έχει επιπλέον βάρος που είναι σημαντικό πρόβλημα για κινητήρες αεροσκαφών και οι απαγωγείς είναι επιρρεπείς σε σβήσιμο λόγω των υψηλής ταχύτητας αερίων καύσης. Οι αναμείκτες τύπου "σάντουιτς" δεν χρησιμοποιούνται πλέον παρά μόνο σε συντεταγμένη μορφή όπου η κύρια λειτουργία τους είναι να δυναμώνουν τη ροή και να αυξάνουν το συντελεστή εκφόρτισης ροής (συνήθως σε 0,8 σε αντίθεση με 0,6 για μια κανονική οπή).



ΓΕΡΜΑΝΙΑ

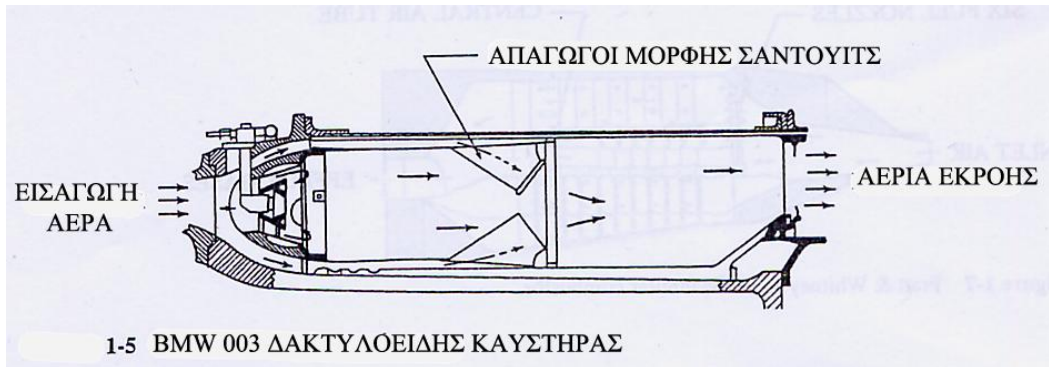
A) **Jumo 004:** Αυτή η μηχανή έχει εξαιρετικό ιστορικό ενδιαφέρον γιατί ήταν ο πρώτος στροβιλοκινητήρας μαζικής παραγωγής και είχε μεγάλη χρήση στο δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο. Ήταν ανάμεσα στους πρώτους κινητήρες που χρησιμοποιούσε αξονικής ροής στροβιλομηχανή και καυστήρες απευθείας λειτουργίας. Καθένας από τους 6 σωληνοειδείς καυστήρες τροφοδοτούταν με καύσιμο πίεσης έως 5,2 MPa (750 psi) από ένα ψεκαστήρα στροβιλισμού πίεσης που ψέκαζε το καύσιμο μέσα στη κύρια ζώνη καύσης. Η εικόνα 1-4 δείχνει σχηματικά το βασικό σχεδιασμό του καυστήρα.



Ο κύριος αέρας κινούταν μέσα στο οδηγό μέσα από 6 πτερύγια στροβιλισμού, με τη ποσότητα του αέρα να είναι αρκετή να πετύχει στοιχειομετρική καύση στο προκαθορισμένο σημείο σχεδιασμού της μηχανής. Η μίξη μεταξύ των προϊόντων καύσης και του αραιωμένου αέρα γινόταν με τη χρήση μιας συνδεσμολογίας σωλήνων που ήταν συγκολλημένοι σε ένα δαχτυλίδι στην μια άκρη και σε ένα διάφραγμα 10 εκατοστών στην άλλη. Τα θερμά προϊόντα καύσης κινούνταν ακτινικά προς τα έξω μέσα από τα κενά ανάμεσα στους σωλήνες και συναντιόντουσαν με ένα μέρος του δευτερεύοντος ψυχρού αέρα. Ο υπόλοιπος δευτερεύων αέρας κινούταν μέσα στους σωλήνες και εξυπηρετούσε να τους προστατεύει από σβήσιμο λόγω της απορρόφησης τους από τα ζεστά αέρια καύσης, και να προσδίδει επιπλέον ανάμιξη θερμών και ψυχρών αερίων στη ζώνη ανακυκλοφορίας που δημιουργούταν από την παρουσία του διαφράγματος.

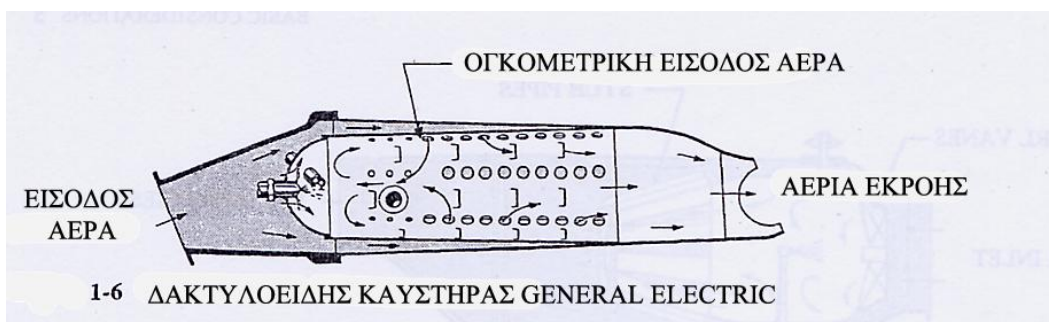
B) **BMW 003:** Ο μόνος Γερμανικός κινητήρας που αναπτύχθηκε σε γραμμή παραγωγής κατά τη διάρκεια του 2ου παγκοσμίου πολέμου ήταν ο BMW 003. Αυτός ο κινητήρας είχε έναν δακτυλοειδή καυστήρα εφοδιασμένο με 16 ισαπέχοντες κατάντη τοποθετημένους

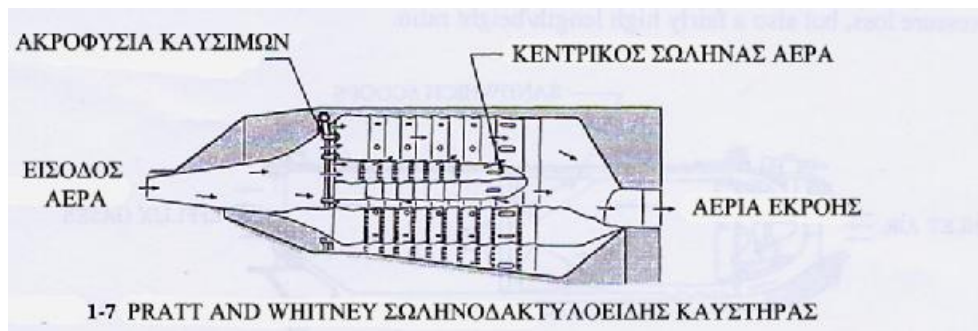
ψεκαστήρες πίεσης. Κάθε στόμιο καύσιμου περιβαλλόταν από ένα διάφραγμα και ο κύριος αέρας καύσης κινούνταν και μέσα και γύρω του. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για να εισάγεται ο αραιωμένος αέρας ήταν η μίξη "σάντουιτς" που αναμίγνυε ρεύματα ψυχρού δευτερεύοντος αέρα ανάμεσα σε παράλληλα ρεύματα θερμών προϊόντων καύσης. Ο αραιωμένος αέρας ρέει μέσα από 40 απαγωγούς προσκολλημένους στο εξωτερικό μέρος εναλλάσσοντας σε περιμετρικές περιοχές με 40 πανομοιότυπους απαγωγούς προσκολλημένους στο εσωτερικό μέρος. Το τελικό αποτέλεσμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 1-5, ήταν ένας καυστήρας με χαμηλή απώλεια πίεσης και μια σχετικά υψηλή αναλογία μήκους/ύψους.



ΑΜΕΡΙΚΗ

Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του κινητήρα W1, λήφθηκε η απόφαση να φτιαχτεί ένας μεγαλύτερος Whittle κινητήρας ώθησης των 1600 lb οριζόμενος ως W2B. Το 1941, ένας W2B κινητήρας, ολοκληρωμένος με σχέδια, παραδόθηκε στην εταιρία General Electric (GE) και μέσα σε έξι μήνες αυτή η εταιρία είχε κατασκευάσει δυο ακόμα κινητήρες με τον ίδιο σχεδιασμό. Το 1947 η Pratt και Whitney (P&W) όντας πλήρως απασχολημένη με την παραγωγή εμβολοκινητήρων κατά τη διάρκεια του πολέμου, έκανε την πρώτη της είσοδο στο τομέα των στροβιλοκινητήρων παίρνοντας δικαιώματα για τον Nene κινητήρα από την Rolls Royce. Έχοντας φτιάξει μια βάση στη βιομηχανία των στροβιλοκίνητων η GE και η P&W δεν έχασαν χρόνο και παρήγαγαν τα δικά τους σχέδια καυστήρων. Για παράδειγμα, ο J31 της GE Whittle είχε έναν αντίθετης ροής καυστήρα, αλλά μια εκδοχή ευθείας ροής (εικόνα 1-6) υιοθετήθηκε για τον J33 και για μεταγενέστερους κινητήρες όπως ο J35 και ο J47. Για τον J57 (εικόνα 1-7) η P&W έκανε χρήση 8 σωληνοειδών τοποθετημένους μέσα σε δακτυλοειδή θήκη. Κάθε σωληνοειδής είχε ένα διάτρητο σωλήνα κατά μήκος του κεντρικού άξονα που προεκτεινόταν κατά το μισό του σωληνοειδούς. Στη πράξη ο κεντρικός σωλήνας μετέτρεπε το σωληνοειδές σε ένα μικρό δακτυλοειδή καυστήρα, τροφοδοτούμενο με καύσιμο από 6 ισαπέχοντες βάνες στροβιλισμού πίεσης.





Μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 1940, η ανάπτυξη που έγινε σε Βρετανία, Γερμανία και Αμερική, καθιέρωσε τα βασικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά των καυστήρων αεροκινητήρων που έχουν έμειναν κατά μεγάλο μέρος ίδια. Τα κύρια εξαρτήματα είναι ένας διαχύτης για τη μείωση της ταχύτητας του εξωτερικού αέρα στο συμπιεστή για να αποφεύγονται μεγάλες απώλειες πίεσης στη καύση, ένας φλογοσωλήνας που είναι διατεταγμένος ομόκεντρα μέσα στην εξωτερική θήκη του καυστήρα, μέσα ώστε να τροφοδοτείται η ζώνη καύσης με κονιορτοποιημένο ή εξατμισμένο καύσιμο, και σωληνοειδείς φλογοσωλήνες, διασυνδέσεις μέσα από τους οποίους μπορεί να ρέουν θερμά αέρια από ένα αναμμένο φλογοσωλήνα σε ένα γειτονικό σβηστό φλογοσωλήνα.

Μέσα στο φλογοσωλήνα, η παροχή αέρα είναι έτσι σχεδιασμένη ώστε η κύρια ζώνη καύσης να λειτουργεί σε πολύ μεγαλύτερη αναλογία καυσίμου/αέρα από ότι η συνολική αναλογία καύσης καυσίμου/αέρα. Περισσότερος αέρας προσφέρεται κατάντη από τη κύρια ζώνη ώστε να ολοκληρώνεται η διαδικασία καύσης και να αραιώνει τα προϊόντα καύσης σε μια θερμοκρασία αποδεκτή από την τουρμπίνα.

1-3 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

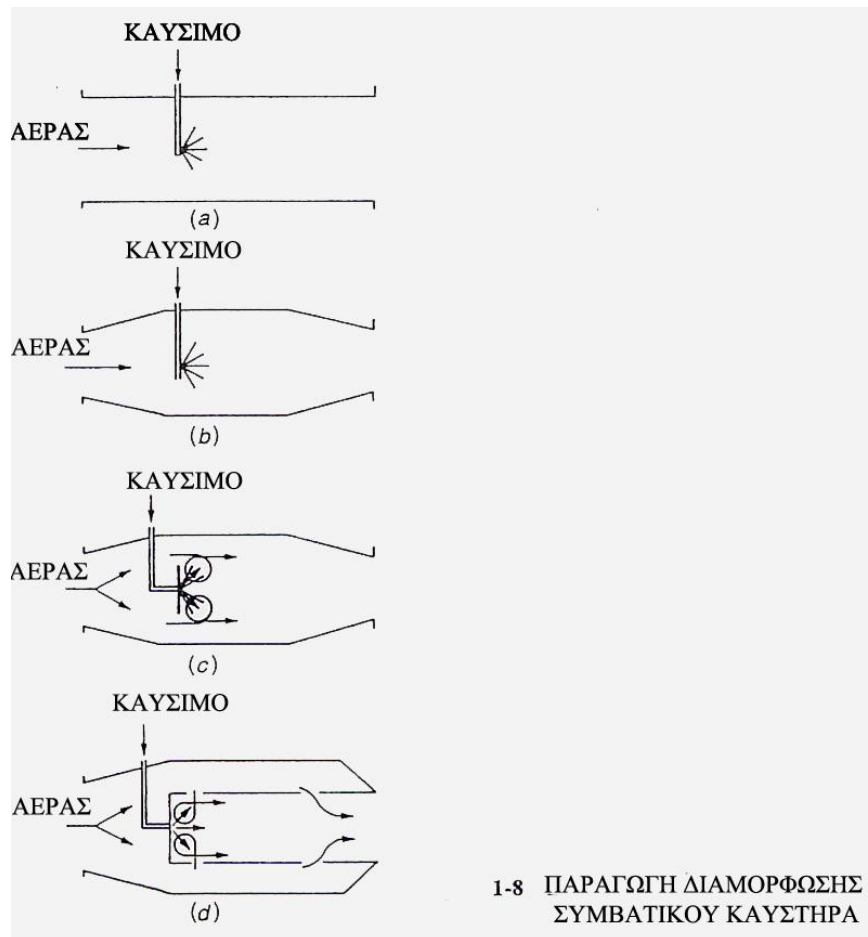
Είναι ενδιαφέρον να εξετάσουμε σύντομα τις εκτιμήσεις που υποδεικνύουν τη βασική γεωμετρία ενός «συμβατικού» καυστήρα αεροστροβίλου.

Η εικόνα 1-8 δείχνει την πιο απλή μορφή ενός καυστήρα-ένα ευθύ αγωγό που συνδέει τον συμπιεστή με την τουρμπίνα. Δυστυχώς ο απλός σχεδιασμός δεν είναι πρακτικός γιατί η απώλεια πίεσης θα ήταν μεγάλη. Η απώλεια πίεσης εξαιτίας της καύσης είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας του αέρα και για εξωτερικές ταχύτητες του συμπιεστή της τάξεως των 170 m/s, αυτή η απώλεια αναλογεί σχεδόν στο ένα τρίτο της αύξησης της πίεσης που επιτυγχάνεται στο συμπιεστή. Για να μειωθεί η απώλεια αυτή σε ένα επιτρεπτό επίπεδο ένας διαχύτης χρησιμοποιείται για να μειώσει την ταχύτητα του αέρα με συντελεστή περίπου 5 όπως φαίνεται και στην εικόνα 1-8. Εχοντας τοποθετηθεί ένας διαχύτης, μια ανάστροφη ροή πρέπει να δημιουργηθεί ώστε να υπάρξει μια χαμηλής ταχύτητας περιοχή που θα σταθεροποιηθεί η φλόγα. Η εικόνα 1-8 δείχνει πως μπορεί να επιτευχθεί αυτό με ένα απλό διάφραγμα. Το μόνο ελάττωμα σε αυτό το σχέδιο είναι ότι για να παραχθεί η επιθυμητή αύξηση θερμοκρασίας η μέση αναλογία αέρα/καυσίμου πρέπει να είναι γύρω στο 30 με 40, που είναι εκτός ορίων ευφλεκτότητας για μίγματα υδρογονανθράκων. Ιδανικά, η αναλογία αέρα/καυσίμου στη κυρίως ζώνη καύσης πρέπει να είναι γύρω στο 18 παρόλο που υψηλότερες τιμές (24) μερικές φορές προτιμούνται αν οι χαμηλές εκπομπές μονοξειδίου του αζώτου είναι η πρωταρχική ανάγκη. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα η καύση διατηρείται από επανακυκλοφορία καμένων προϊόντων που παρέχουν μια συνεχόμενη πηγή ανάφλεξης για την εισαγόμενη μίξη αέρα- καυσίμου. Ο αέρας που δεν χρειάζεται για καύση διοχετεύεται κατάντη της ζώνης καύσης για να αναμιχτεί με τα θερμά καμένα προϊόντα και ως εκ τούτου

να μειώσει την θερμοκρασία σε μια τιμή που να είναι αποδεκτή από την τουρμπίνα.

Η εικόνα 1-8 δείχνει την λογική εξέλιξη του συμβατικού θαλάμου καύσης της τουρμπίνας αερίων στη πιο συχνή μορφή της. Όπως είναι φυσικό υπάρχουν πολλές εκδοχές της βασικής ιδέας, όπως δείχνει η εικόνα 1-8, αλλά σε γενικές γραμμές όλοι οι θάλαμοι έχουν μια θήκη αέρα, ένα διάχυτη, φλογοσωλήνα, και ένα εγχυτήρα καύσιμου σαν βασικά εξαρτήματα.

Η επιλογή του τύπου του καυστήρα καθορίζεται κυρίως από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, αλλά επίσης επηρεάζεται από την επιθυμία να χρησιμοποιηθεί ο διαθέσιμος χώρος όσο πιο αποτελεσματικά γίνεται. Σε μεγάλους κινητήρες αεροσκαφών ο θάλαμος είναι κατά κανόνα του ευθύ τύπου (straight-through), όπου ο αέρας ρέει σε μια κατεύθυνση παράλληλη στον άξονα του θαλάμου. Για μικρότερους κινητήρες, η αντίθετης ροής δακτυλιοειδής καυστήρας παρέχει μια πιο συμπαγή μονάδα και επιτρέπει κοντινή ζεύξη ανάμεσα στον συμπιεστή και στην τουρμπίνα. Στους περισσότερους καυστήρες το καύσιμο εισέρχεται στην περιοχή καύσης στη μορφή ενός κονιορτοποιημένου σπρέι που λαμβάνεται είτε βάζοντας το μέσα από ένα στόμιο υπό πίεση, είτε αξιοποιώντας την διαφορά πίεσης κατά μήκος του φλογοσωλήνα για να δημιουργηθεί ένα ρεύμα αέρα υψηλής ταχύτητας που θρυμματίζει το καύσιμο σε λεπτά σταγονίδια πριν το μεταφέρει στη κύρια ζώνη καύσης.



1-4 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΚΑΥΣΤΗΡΑ

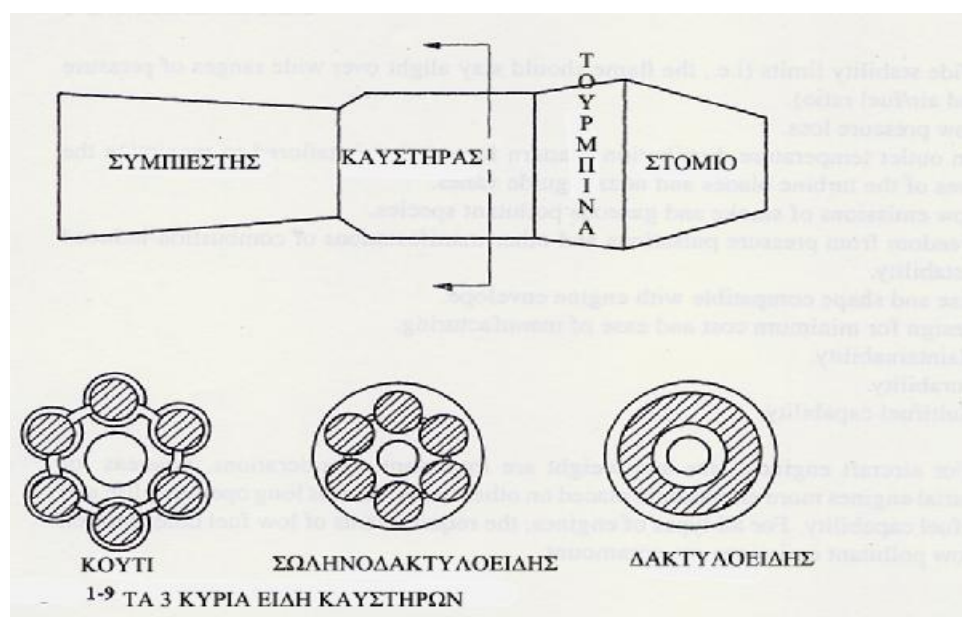
Ένας καυστήρας αεριοστροβίλου πρέπει να ικανοποιεί μια μεγάλη γκάμα απαιτήσεων που η σημασία τους διαφέρει ανάμεσα σε τύπους κινητήρων. Παρ' αυτά οι βασικές απαιτήσεις όλων των καυστήρων κυρίως είναι οι εξής :

1. Υψηλή αποδοτικότητα καύσης (το καύσιμο πρέπει να καεί εντελώς ώστε όλη του η χημική δύναμη να απελευθερωθεί ως θερμότητα).
2. Αξιόπιστη και ομαλή ανάφλεξη, και στο έδαφος (ειδικά σε χαμηλές θερμοκρασίες) και στη περίπτωση των κινητήρων αεροσκαφών μετά από σβέση σε μεγάλο υψόμετρο.
3. Ευρεία όρια σταθερότητας (η φλόγα πρέπει να μένει αναμμένη σε μεγάλο εύρος πίεσης και αναλογίας αέρα/καυσίμου).
4. Χαμηλή απώλεια πίεσης.
5. Μια κατανομή εξωτερικής θερμοκρασίας (pattern factor) προσαρμοσμένη να μεγιστοποιεί την ζωή των λεπίδων της τουρμπίνας και των οδηγών βανών του ακροφυσίου.
6. Χαμηλές εκπομπές καπνού και μολυσματικών αερίων.
7. Ελευθερία από παλμούς πίεσης και άλλων εκδηλώσεων αστάθειας καύσεως.
8. Μεγεθος και σχήμα συμβατό με τα υπόλοιπα στοιχεία της μηχανής.
9. Σχεδιασμό για ελάχιστο κόστος και ευκολία κατασκευής.
10. Συντηρησιμότητα.
11. Διάρκεια στο χρόνο.
12. Δυνατότητα καύσης πολλαπλών καυσίμων.

Για κινητήρες αεροσκαφών, το μέγεθος και το βάρος είναι σημαντικό ενώ σε βιομηχανικούς κινητήρες η έμφαση δίνεται σε άλλους τομείς όπως υψηλή διάρκεια ζωής και ικανότητα πολλαπλών καυσίμων. Για όλους τους τύπους κινητήρων η ανάγκη για χαμηλή κατανάλωση καυσίμου και χαμηλών ρύπων είναι κυρίαρχη.

1-5 ΤΥΠΟΙ ΚΑΥΣΤΗΡΩΝ

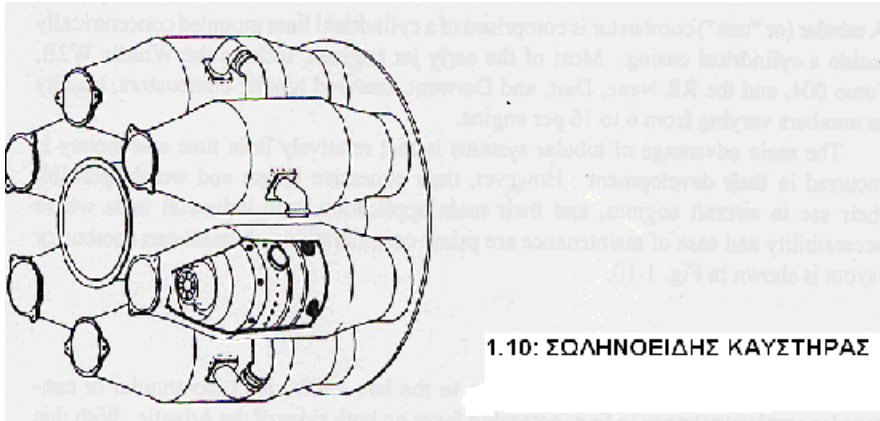
Η επιλογή ενός τύπου καυστήρα εξαρτάται από το γενικό σχεδιασμό του κινητήρα και από την ανάγκη του να γίνει χρήση του διαθέσιμου χώρου όσο καλύτερα γίνεται. Υπάρχουν δυο βασικοί τύποι καυστήρων, οι σωληνοειδείς (tubular) και οι δακτυλιοειδείς (annular). Ένας συμβιβασμός ανάμεσα σε αυτούς τους τύπους είναι ο can-annular που ένας αριθμός από ισαπέχοντες σωληνοειδείς φλοφοσωλήνες τοποθετούνται ανάμεσα σε μια δακτυλιοειδή θήκη αέρα. Οι τρεις διαφορετικοί τύποι καυστήρα φαίνονται στην εικόνα 1-9.



ΣΩΛΗΝΟΕΙΔΗΣ

Ένας σωληνοειδής καυστήρας αποτελείται από ένα κυλινδρικό φλογοσωλήνα τοποθετημένο ομόκεντρα μέσα σε μια κυλινδρική θήκη. Οι περισσότεροι από τους πρώιμους κινητήρες τζετ όπως ο Whittle W2B, Jumo 004, RR Nene, Dart, και Derwent είχαν σωληνοειδείς καυστήρες συνήθως από 6 έως 16 ανά κινητήρα.

Το κύριο πλεονέκτημα των σωληνοειδών συστημάτων είναι ο σχετικά λίγος χρόνος και κόστος που χρειαζόταν η ανάπτυξη τους. Πάραυτα, το μεγάλο μήκος τους και βάρος απαγόρευαν τη χρήση τους σε κινητήρες αεροσκαφών και η κύρια εφαρμογή τους είναι σε βιομηχανικές μονάδες όπου η προσβασιμότητα και η ευκολία συντήρησης είναι κυρίες ανάγκες. Ένας σωληνοειδής καυστήρας φαίνεται στην εικόνα 1-10.

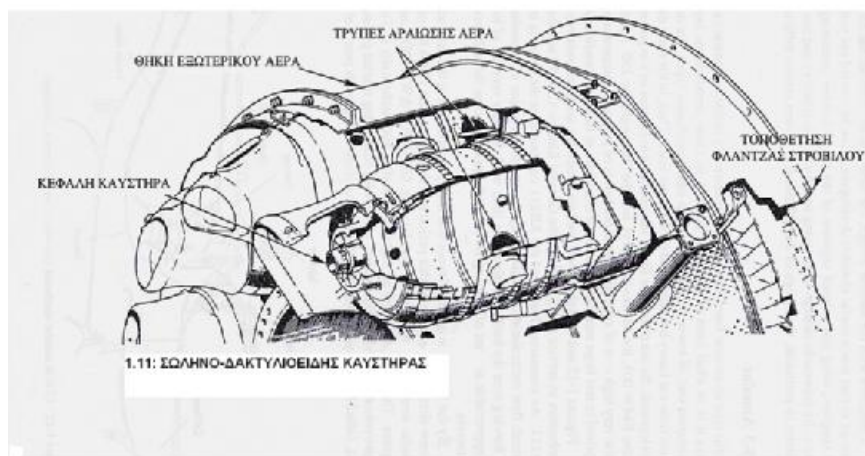


1.10: ΣΩΛΗΝΟΕΙΔΗΣ ΚΑΥΣΤΗΡΑΣ

ΣΩΛΗΝΟ-ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΗΣ

Όταν οι αναλογίες πίεσης άρχιζαν να ανεβαίνουν στα τέλη του '40, αυτός ο καυστήρας άρχιζε να προτιμάται και στις 2 πλευρές του Ατλαντικού. Με αυτό το σχεδιασμό, ένα γκρουπ από σωληνοειδών φλογοσωλήνες συνήθως από 6 έως 10, τοποθετούνται μέσα σε μια μονή δακτυλιοειδή θήκη όπως φαίνεται και στην εικόνα 1-11. Αυτή η γενική ιδέα προσπαθεί να συνδυάσει τη στιβαρότητα του δακτυλιοειδή θαλάμου με την μηχανική δύναμη ενός σωληνοειδούς θαλάμου. Ένα μειονέκτημα αυτού του καυστήρα είναι η ανάγκη για διασυνδέσεις (διασταυρούμενους σωλήνες). Οι κινητήρες που ταίριαζαν με αυτό το είδος των καυστήρων περιλαμβάνουν τους Allison 501-K, GEJ73 και J79, P&W J57 και J75, RR Avon, Conway, Olympus, Tyne και Spey.

Σε σύγκριση με το δακτυλιοειδή σχεδιασμό, ο σωληνο-δακτυλιοειδής θάλαμος έχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα, ότι η ανάπτυξη του θαλάμου μπορεί να γίνει με μικρές παροχές αέρα, χρησιμοποιώντας μονό ένα μικρό τμήμα του θαλάμου που περιέχει ένα ή περισσότερους φλογοσωλήνες. Τα μειονεκτήματα του εμφανίζονται όταν γίνεται προσπάθεια να επιτευχθεί μια ικανοποιητική και σταθερή ροή αέρα καθώς επίσης και ο σχεδιασμός του διαχύτη μπορεί να παρουσιάσει σημαντικές δυσκολίες λόγω του σχήματος του.



ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΗΣ

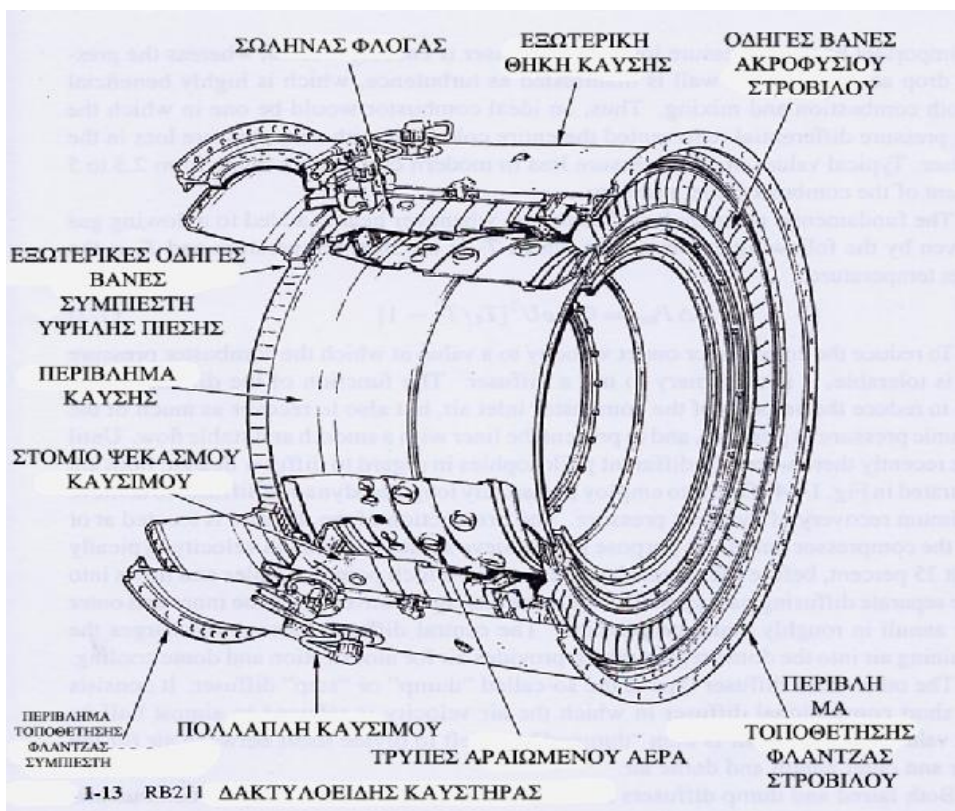
Σε αυτό τον τύπο ένας δακτυλοειδής φλογοσωλήνας τοποθετείται ομοκεντρικώς μέσα σε μια δακτυλοειδή θήκη. Για πολλούς λόγους είναι μια ιδανική μορφή θαλάμου, επειδή το καθαρό αεροδυναμικό του σχέδιο έχει ως αποτέλεσμα μια συμπαγή μονάδα χαμηλότερης απώλειας πίεσης σε σχέση με άλλες μονάδες. Το κύριο μειονέκτημα του πηγάζει από το βαρύ φορτίο των εξωτερικών φλογοθαλάμων. Έτσι στις πρώιμες μέρες ανάπτυξης των στροβιλοκινητήρων, η χρήση των δακτυλοειδών φλογοθαλάμων περιοριζόταν σε κινητήρες χαμηλής αναλογίας πίεσης, όπως ο BMW 003, Metrovick Beryl, και τον Westinghouse J30. Άλλο ένα μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος παροχής αέρα στα επίπεδα της πίεσης, της θερμοκρασίας και παροχής ροής που χρειάζεται για τη δοκιμή μεγάλων δακτυλοειδών θαλαμών σε καταστάσεις πλήρους φορτίου.

Οι εικόνες 1-12 και 1-13 δείχνουν 2 διαμορφώσεις που είναι αντιπροσωπευτικές των δακτυλοειδών καυστήρων σε λειτουργία σήμερα, όπως ο General Electric και ο Rolls Royce RB211. Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό του RB211 καυστήρα είναι η απουσία αεροστροβιλιστών. Αντί αυτού, η επανακυκλοφορία ροής επιτυγχάνεται με τον συνδυασμό των δευτερευόντων δεσμών αέρα και του αέρα που ρέει πάνω από το πέλμα στερέωσης κατά μήκος του τοιχώματος του φλογοσωλήνα. Σε μεταγενέστερες εκδοχές αυτού του καυστήρα μια αποδεκτή ποσότητα στροβιλισμένου αέρα εισέρχεται στη κύρια ζώνη μέσα από ένα τροποποιημένο εκτονωτή ψεκάσμου αέρα.

Τη δεκαετία του 1960, η δακτυλοειδής διάταξη είχε καθιερωθεί ως η αυτόματη επιλογή για όλους τους νέους κινητήρες αεροσκαφών. Από εκείνη τη περίοδο και κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980 και μετά οι πιο σημαντικοί δακτυλοειδής καυστήρες ήταν αυτοί που ταίριαζαν στους κινητήρες GE CF6, P&W JT9D, RR RB211. Αυτοί οι κινητήρες ήταν επιτυχημένοι τεχνικά καθώς και εμπορικά. Βελτιώσεις σε ευρείας ατράκτου αεροσκάφος, μαζί με συνεχόμενες πιέσεις μάρκετινγκ να μειωθεί το κόστος ζητούσαν κινητήρες της τάξεως των 80.000 lb ώθησης με προοπτικές μέχρι και 100.000 lb. Για να ανταποκριθεί σε αυτές τις ανάγκες η Rolls Royce ανέπτυξε τον κινητήρα Trent που ήταν ένας προγονός της σειράς RB211. Ο GE90 και ο P&W4084 πέτυχαν παρόμοια επίπεδα απόδοσης και επίπεδων ώθησης. Και στους 3 κινητήρες ενσωματώθηκαν δακτυλοειδείς καυστήρες που ενσαρκώνουν πλεονεκτήματα σε τεχνικές έγχυσης καύσιμου και ψύξης τοιχωμάτων.



1-12 CP6-50 ΔΑΚΤΥΛΟΕΙΔΗΣ ΚΑΥΣΤΗΡΑΣ



1-13 RB211 ΔΑΚΤΥΛΟΕΙΔΗΣ ΚΑΥΣΤΗΡΑΣ

1-6 ΔΙΑΧΥΤΗΣ

Ανάμεσα στις απαιτήσεις στο σχεδιασμό καυστήρα είναι και η ανάγκη να ελαχιστοποιηθεί η πτώση πίεσης στον καυστήρα, ΔP . Μέρος αυτής της πτώσης πίεσης συμβαίνει απλά με το να σπρωχθεί αέρας μέσα στο καυστήρα, ΔP_{cold} , και το υπόλοιπο είναι θεμελιώδης απώλεια που προέρχεται από την προσθήκη θερμότητας σε ένα υψηλής ταχύτητας ρεύμα, ΔP_{hot} . Έχουμε : $\Delta P = \Delta P_{\text{COLD}} - \Delta P_{\text{HOT}}$

Η ΔP_{cold} αντιπροσωπεύει το άθροισμα των απωλειών που προκύπτουν μέσα στο διάχυτη και το φλογοσωλήνα. Από την οπτική της γενικότερης απόδοσης του κινητήρα, η διαφορά ανάμεσα σε απώλεια πίεσης διαχύτη και φλογοσωλήνα είναι ασήμαντη. Παρ' αυτά από την οπτική της καύσης είναι σημαντικό επειδή η απώλεια πίεσης στο διάχυτη πάει εντελώς χαμένη, ενώ η απώλεια πίεσης στο φλογοσωλήνα εκδηλώνεται ως τύρβη, που είναι

εξαιρετικά ευεργετική και στη καύση και στη ανάμιξη. Έτσι, ένας ιδανικός καυστήρας θα ήταν ένας που η διαφορά πίεσης στο φλογοσωλήνα θα αντιπροσώπευε όλη την απώλεια ψυχρού με μηδενική απώλεια πίεσης στον διαχύτη. Τυπικές τιμές ψυχρής απώλειας πίεσης σε μοντέρνους καυστήρες εκτείνονται από 2.5 σε 5 % της εσωτερικής πίεσης του καυστήρα.

Η θεμελιώδης απώλεια πίεσης που συμβαίνει όποτε προστίθεται θερμότητα σε ένα ρέον αέριο δίνεται από την παρακάτω έκφραση στην οποία όπου T_1 είναι η εσωτερική θερμοκρασία και T_2 είναι η εξωτερική θερμοκρασία:

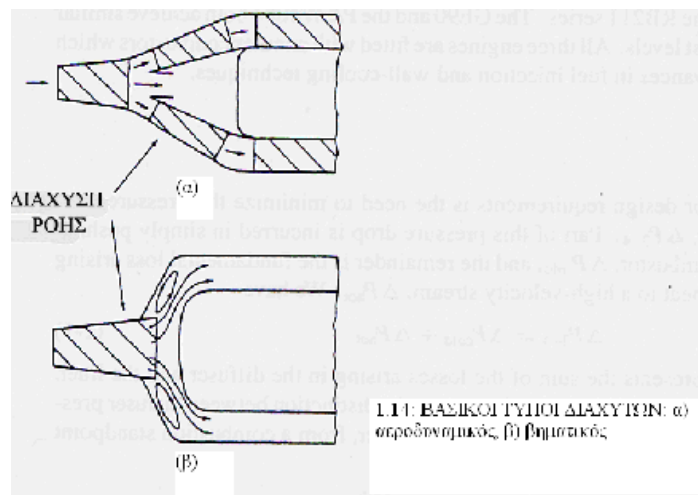
$$\Delta P_{hot} = 0.5 r U^2 \left[\frac{T_2}{T_1} - 1 \right]$$

Για να μειωθεί η εξωτερική ταχύτητα του συμπιεστή σε μια τιμή που η απώλεια πίεσης καυστήρα είναι αποδεκτή, γίνεται χρήση ενός διαχύτη. Η λειτουργία του διαχύτη είναι όχι μόνο να μειώνει την ταχύτητα του εσωτερικού αέρα του καυστήρα αλλά και να επαναφέρει όσο δυνατόν περισσότερο την δυναμική πίεσης καθώς και να δίνει στο φλογοσωλήνα μια ομαλή και σταθερή λειτουργία ροής.

Μέχρι πρόσφατα υπήρχαν δυο διαφορετικές φιλοσοφίες για το σχεδιασμό του διαχύτη. Και οι δυο φαίνονται στην εικόνα 1-14. Η μια είναι να χρησιμοποιεί ένα σχετικά μακρύ αεροδυναμικό διαχύτη για να επιτυγχάνεται μέγιστη επαναφορά δυναμικής πίεσης. Το πρώτο κομμάτι του διαχύτη βρίσκεται διπλά κοντά στην έξοδο του συμπιεστή. Ο σκοπός του είναι να επιτυγχάνει κάποια μείωση στη ταχύτητα, συνήθως τάξεως του 35% πριν ο αέρας φτάσει στο ρύγχος όπου χωρίζεται και ρέει σε τρία διαφορετικά περάσματα διάχυσης. Δύο από τα περάσματα μεταφέρουν αέρα στο εξωτερικό και εσωτερικό αύλακα του του φλογοθαλάμου σε σχεδόν όμοιες αναλογίες. Το κεντρικό πέρασμα του διαχύτη απορρίπτει τον εναπομείναντα αέρα μέσα στην περιοχή του θόλου και παρέχει αέρα για ψεκασμό και ψύξη του θόλου.

Ο άλλος τύπος διάχυτη είναι ο λεγόμενος βηματικός διαχύτης. Αποτελείται από ένα βραχύ συμβατικό διάχυτη μέσα στον οποίο η ταχύτητα μειώνεται σχεδόν στο μισό. Στην έξοδο ο αέρας αδειάζει και αφήνεται να χωριστεί σε αέρα για το εσωτερικό και εξωτερικό αύλακα και σε αέρα του θόλου.

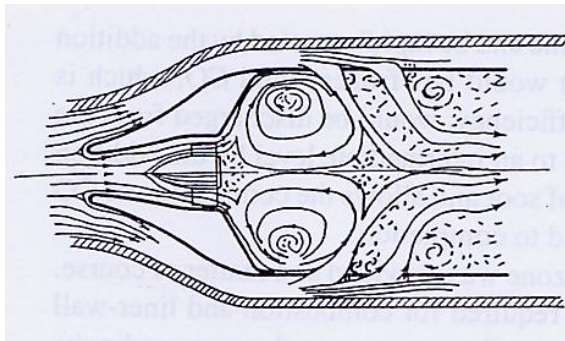
Και οι δυο διαχύτες χρησιμοποιήθηκαν πολύ σε καυστήρες αεριομηχανών. Οι βηματικοί διαχύτες προτιμώνται τώρα λόγω της μεγάλης ανεκτικότητας τους σε παραλλαγές προφίλ εσωτερικής ταχύτητας και διαστάσεων υλικών. Έτσι, ενώ οι περισσότεροι δακτυλοειδείς καυστήρες Rolls Royce έχουν εξομαλυμένους διαχύτες, ο πιο πρόσφατος δακτυλοειδής για τον κινητήρα Trent χρησιμοποιεί διαχύτη βηματικού τύπου.



1-7 ΚΥΡΙΑ ΖΩΝΗ

Η βασική λειτουργία της κύριας ζώνης είναι να καθηλώνει τη φλόγα και να παρέχει επαρκή χρόνο, θερμοκρασία, και τύρβη για να επιτύχει ολοκληρωμένη καύση του εισερχομένου μίγματος αέρα/καύσιμου. Η σημασία της ροής του αέρα στη κύρια ζώνη για την επίτευξη αυτών των στόχων δεν μπορεί να υπερεκτιμηθεί. Πολλά διαφορετικά μοτίβα ροής χρησιμοποιούνται αλλά ένα χαρακτηριστικό που είναι σύνηθες σε όλα είναι η δημιουργία σπειροειδούς ανάστροφης ροής που παρασύρει και επανακυκλοφορεί ένα κομμάτι από τα θερμά αέρια καύσης για να παρέχει συνεχόμενη ανάφλεξη στον εισερχόμενο αέρα και καύσιμο. Κάποιοι πρώιμοι καυστήρες χρησιμοποιούσαν στροβίλους αέρα για να δημιουργούν το σπειροειδές μοτίβο ροής, ενώ άλλοι δεν είχαν στροβίλους και εξαρτιόταν μόνο από τον αέρα που εισερχόταν από τρύπες μέσα στα τοιχώματα των φλογοσωλήνων στην άνω πλευρά τους. Και οι δυο μέθοδοι είναι ικανές να δημιουργούν επανακυκλοφορία ροής στη κύρια ζώνη.

Μια σημαντική συμβολή στην αεροδυναμική της κύριας ζώνης έγινε από το γκρουπ καύσης Lucas στα σχέδια των καυστήρων τους για τους κινητήρες Whittle W2B και Welland. Τα μοτίβα της βασικής ροής αέρα στην ιδέα τους φαίνονται στην εικόνα 1-15. Μαζί και οι δέσμες στροβιλιζόμενου αέρα και κύριου αέρα χρησιμοποιούνται για να δημιουργηθεί η επιθυμητή αναστροφή ροής. Κάθε τρόπος εισαγωγής αέρα είναι ικανός να κάνει επανακυκλοφορία ροής από μόνος του αλλά αν χρησιμοποιηθούν και οι δυο τότε οι δυο ξεχωριστές επανακυκλοφορήσεις θα συγχωνευτούν και θα αναμιχτούν με τέτοιο τρόπο που η μια θα ενδυναμώνει και θα συμπληρώνει την άλλη. Το αποτέλεσμα είναι ένα δυνατό και σταθερό μοτίβο ροής αέρα κύριας ζώνης που παρέχει ευρεία όρια σταθερότητας, καλή απόδοση ανάφλεξης και ελευθερία από τους τύπους αστάθειας ροής που συνήθως αυξάνουν τους παλμούς καύσης και το θόρυβο. Η εταιρία Lucas είχε μεγάλη επιρροή στο σχεδιασμό Βρετανικών καυστήρων, και τα βασικά αεροδυναμικά χαρακτηριστικά τους φαίνονται στην εικόνα 1-15 μπορούν να βρεθούν στους καυστήρες που σχεδιαστήκαν για πολλούς Βρετανικούς κινητήρες συμπεριλαμβανόμενων των Rolls Royce Nene, Derwent, Dart, Proteus, Avon, Conway και Tyne.



1-15 ΠΡΟΤΥΠΟ LUCAS ΡΟΗΣ ΑΕΡΑ
ΚΥΡΙΑΣ ΖΩΝΗΣ

1-8 ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΖΩΝΗ

Αν η θερμοκρασία της κύριας ζώνης είναι υψηλότερη από 2000K, αντιδράσεις διαχωρισμού θα έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγάλων συγκεντρώσεων CO και H₂ στα εκρεόμενα αέρια. Αν αυτά τα αέρια περάσουν στην ζώνη διάλυσης και ψυχθούν γρήγορα με την πρόσθεση μεγάλων ποσοτήτων αέρα, η αέρια σύνθεση θα “παγώσει” και CO, που είναι και ρύπος και μια πηγή ανεπαρκείας του καυστήρα θα αποφορτιστεί από τον καυστήρα άκαυστο. Ρίχνοντας την θερμοκρασία σε ένα μέσο επίπεδο με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων αέρα ενθαρρύνεται η καύση αιθάλης και επιτρέπει την καύση του CO και άλλων υδρογονανθράκων να ολοκληρωθούν.

Σε πρώιμα σχέδια καυστήρων μια ενδιάμεση ζώνη υπήρχε σαν κάτι αυτονόητο. Όσο

αυξάνονταν οι αναλογίες πίεσης και περισσότερος αέρας χρειαζόταν για καύση και για την ψύξη των τοιχωμάτων του φλογοθαλάμου, η ποσότητα του διαθέσιμου αέρα για την ενδιάμεση ζώνη κατά συνέπεια μειωνόταν. Γύρω στο 1970 η παραδοσιακή μορφή της ενδιάμεσης ζώνης είχε σε μεγάλο βαθμό εξαφανιστεί. Παρόλα αυτά η επιθυμία μιας ενδιάμεσης ζώνης παραμένει ακόμα, οπότε αν η ανάπτυξη στη ψύξη των τοιχωμάτων επιτρέψει να γίνει διαθέσιμος λίγος αέρας μπορεί να εξεταστεί η πιθανή επαναφορά της.

1-9 ΖΩΝΗ ΑΡΑΙΩΣΗΣ

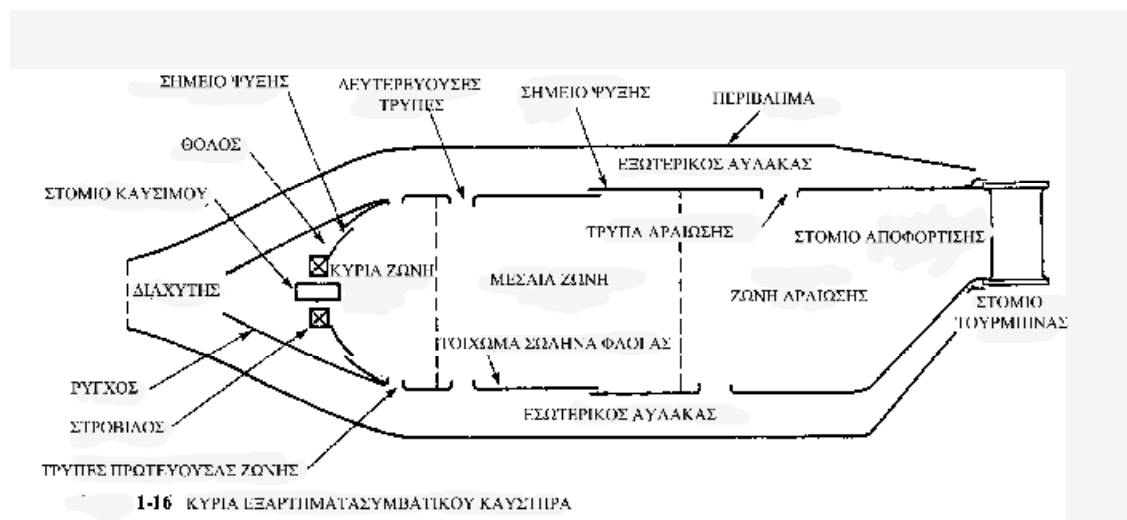
Ο ρόλος της ζώνης αραιώσης είναι να επιτρέπει την είσοδο στον αέρα που μένει μετά από τις ανάγκες της καύσης και ψύξης τοιχωμάτων και να παρέχει ένα εξωτερικό ρεύμα με μια κατανομή θερμοκρασίας που είναι επιτρεπτή στη τουρμπίνα. Αυτή η κατανομή θερμοκρασίας περιγράφεται συνήθως ως “pattern factor” (παράγοντας προτύπου) ή “temperature traverse quality” (ποιότητα εγκάρσιας θερμοκρασίας).

Η ποσότητα αέρα διαθέσιμου για αραιώση είναι συνήθως από 20 έως 40% της συνολικής ροής αέρα του καυστήρα. Εισάγεται στο θερμό ρεύμα αέρα μέσα από μια ή περισσότερες σειρές από τρύπες στα τοιχώματα του φλογοθαλάμου. Το μέγεθος και το σχήμα αυτών των τρυπών επιλέγονται για να βελτιστοποιήσουν την διείσδυση των δεσμών αέρα και την επακόλουθη μίξη τους με το κύριο ρεύμα.

Θεωρητικά η εγκάρσια ποιότητα μπορεί να επιτευχθεί είτε με την χρήση μια μακριάς ζώνης αραιώσης ή με την ανοχή μιας μεγάλης απώλειας πίεσης των φλογοσωλήνων. Στη πράξη, έχει βρεθεί ότι η αναμιξιμότητα αρχικά βελτιώνεται πολύ με την αύξηση του μήκους μίξης και μετά με έναν σταδιακά μικρότερο ρυθμό. Γι’ αυτό το λόγο η αναλογία μήκους/διαμέτρου των ζωνών αραιώσης κινείται σε μια μικρό πεδίο της τάξης από 1.5 έως 1.8.

Για την πολλή υψηλή θερμοκρασία εισαγωγής της τουρμπίνας που σχετίζεται με τους μοντέρνους υψηλών επιδόσεων κινητήρες, ένα ιδανικό πρότυπο θα ήταν ένα που δίνει ελάχιστη θερμοκρασία στη ρίζα του πτερυγίου της τουρμπίνας, όπου οι τάσεις είναι υψηλότερες και επίσης στην άκρη του πτερυγίου της τουρμπίνας για να προστατεύουν τα υλικά στεγανοποίησης. Η επίτευξη του προφίλ της επιθυμητής θερμοκρασίας είναι ύψιστης σημασίας λόγω της μεγάλης επίδρασης στη μεγίστη επιτρεπτή μέση θερμοκρασία εισόδου στροβίλου και της αντοχής του θερμού τμήματος του. Λόγω της σημασίας του προβλήματος μια μεγάλη αναλογία της ανάπτυξης του καυστήρα είναι αφιερωμένη στο να επιτευχθεί η επιθυμητή pattern factor.

Οι τοποθεσίες των τριών κυριών ζωνών που περιγράφονται παραπάνω σε σχέση με διάφορα εξαρτήματα του καυστήρα φαίνονται στην εικόνα 1-16.

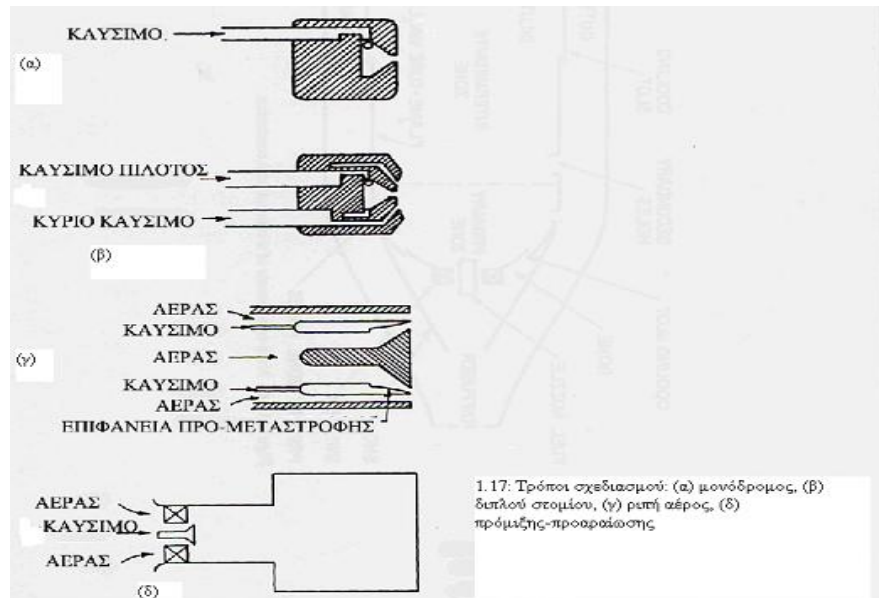


1-10 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Οι διαδικασίες του υγρού ψεκασμού και της εξάτμισης είναι πολύ σημαντικές για την απόδοση ενός συστήματος καύσης αεριοστρόβιλου. Κανονικά υγρά καύσιμα δεν είναι επαρκώς πτητικά για να παράγουν ατμό τόσο όσο χρειάζεται για ανάφλεξη και καύση εκτός και αν ψεκαστούν μέσα σε ένα μεγάλο αριθμό σταγονιδίων σε μια αντίστοιχα σημαντικά αυξημένη επιφάνεια. Όσο μικρότερο το μέγεθος του σταγονιδίου τόσο ταχύτερος ο ρυθμός της εξάτμισης. Η επιρροή του μεγέθους της σταγόνας στην επίδοση της ανάφλεξης είναι μεγάλης σημασίας επειδή μεγάλη αύξηση στην ενέργεια της ανάφλεξης χρειάζεται για να αντισταθμιστεί έστω και μια μικρή αύξηση του μεγέθους της σταγόνας. Η ποιότητα του ψεκασμού επίσης επηρεάζει τα όρια σταθερότητας, την αποδοτικότητα της καύσης και τα επίπεδα τις εκπομπής ρύπων.

Ψεκαστές πίεσης-στροβιλισμού:

Μια κοινή μέθοδος για να επιτευχθεί ο ψεκασμός είναι πιέζοντας το καύσιμο υπό πίεση μέσα από ένα ειδικά σχεδιασμένο στόμιο. Λόγω της ανάγκης να ελαχιστοποιηθεί το μήκος του καυστήρα, ένας κώνος γωνίας ψεκασμού των 90° είναι συνήθης. Με τον μονόδρομο (simplex) ψεκαστήρα της εικόνα 1-17, αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση ενός θαλάμου στροβιλισμού ανάντη του στομίου εκκένωσης.



Ένα μεγάλο πρόβλημα σχεδιασμού ήταν να επιτευχθεί καλός ψεκασμός σε ένα εύρος ροής καυσίμου γύρω στο 40:1. Αν το στόμιο απορροής του ψεκαστήρα φτιαχτεί αρκετά μικρό ώστε να εγγυηθεί καλό ψεκασμό σε χαμηλά ποσοστά ροής καυσίμου, τότε η πίεση που θα χρειάζεται σε υψηλές ροές γίνεται υπερβολική. Από την άλλη αν το στόμιο γίνει μεγάλο, το καύσιμο δε θα ψεκαστεί επαρκώς σε χαμηλές τιμές ροής και χαμηλές τιμές πίεσης που σχετίζονται με λειτουργία σε μεγάλο υψόμετρο. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα παρέχεται από τον “διπλού στομίου” ψεκαστήρα που περιέχει δυο στροβιλοειδείς θαλάμους, ο ένας εκ των οποίων (ο πιλότος- pilot) είναι τοποθετημένος ομοκεντρικά μέσα στον άλλον (ο κυρίως) όπως φαίνεται στην εικόνα 1-17. Τα στόμια που τροφοδοτούν καύσιμο στον θάλαμο “**pilot**” είναι μικρά σε μέγεθος ενώ αυτά που τροφοδοτούν τον κυρίως θάλαμο είναι μεγαλύτερα. Σε χαμηλές ροές καυσίμων, όλο το καύσιμο διοχετεύεται από τον **pilot** και η ποιότητα ψεκασμού είναι καλή επειδή η πίεση διανομής είναι επαρκής. Όσο αυξάνεται η ροή του καυσίμου αυξάνοντας την πίεση του καυσίμου, όταν φτάσει μια προκαθορισμένη πίεση, μια βαλβίδα ανοίγει και καύσιμο περνά στον κύριο ψεκαστήρα. Αυτή η διαμόρφωση επιτρέπει

για ικανοποιητικό ψεκασμό μέσα σε ένα μεγάλο εύρος ροής καυσίμου χωρίς την ανάγκη υπέρμετρων πιέσεων καυσίμου.

Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτών των ψεκαστών είναι καλή μηχανική αξιοπιστία και η ικανότητα να διατηρηθεί καύση σε πολύ αδύναμες μίξεις. Τα μειονεκτήματα τους περιλαμβάνουν πιθανή σύνδεση των μικρών περασμάτων και στομιών με προσμίξεις στο καύσιμο και μια τάση σχηματισμού αιθάλης σε υψηλές πιέσεις καύσης.

Ψεκαστήρας ριπής

Αυτός ο ψεκαστήρας κάνει χρήση μιας απλής ιδέας σύμφωνα με την οποία καύσιμο σε χαμηλή πίεση ρέει πάνω από ένα χείλος τοποθετημένο σε υψηλής ταχύτητας ρεύμα αέρα. Όπως ρέει το καύσιμο πάνω από το χείλος ψεκάζεται από τον αέρα που μετά εισέρχεται στη ζώνη καύσης έχοντας τα σταγονίδια καυσίμου μαζί του. Ειδικότερα είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί ότι το υγρό φύλλο που δημιουργείται στο χείλος ψεκασμού υπόκειται σε υψηλής ταχύτητας αέρα και στις δυο πλευρές όπως φαίνεται και στο σχήμα 1-17γ. Αυτό όχι μόνο δίνει ιδανικό ψεκασμό αλλά επίσης αποτρέπει το καύσιμο από το να επικάθεται σε στερέες επιφάνειες.

Αυτός ο ψεκαστήρας έχει μερικά σημαντικά πλεονεκτήματα στις εφαρμογές του σε καυστήρες αεριοστροβίλων. Για παράδειγμα, η κατανομή καυσίμου καθοδηγείται κυρίως από τη μορφή της αεροροής, και επομένως η εγκάρσια εξωτερική θερμοκρασία είναι δεν είναι ευαίσθητη σε αλλαγές στη ροή καυσίμου. Η καύση χαρακτηρίζεται από την έλλειψη σχηματισμού αιθάλης που έχει ως αποτέλεσμα ένα σχετικά ψυχρά τοιχώματα φλογοθαλάμων και σε ελαχιστοποίηση της απαγωγής καπνού. Άλλο ένα πλεονέκτημα είναι ότι τα εξαρτήματα προστατεύονται από υπερθέρμανση από τον αέρα που αιωρείται από πάνω τους. Τα μεγαλύτερα πρακτικά μειονεκτήματα είναι τα σχετικά περιορισμένα όρια σταθερότητας και η φτωχή ποιότητα ψεκασμού στην αρχή λόγω της χαμηλής ταχύτητας αέρα μέσα από τον ψεκαστήρα. Και τα δυο αυτά προβλήματα μπορούν να λυθούν με τον συνδυασμό του αυτού του ψεκαστήρα με έναν πιλότο ψεκαστήρα πίεσης-στροβιλισμού. Με αυτό το τρόπο, τα πλεονεκτήματα του ψεκαστήρα πίεσης-στροβιλισμού σε χαμηλές ροές καυσίμου, δηλαδή εύκολη έναυση και μεγάλα όρια σταθερότητας, συνδυάζονται με όλα τα πλεονεκτήματα του αυτού του ψεκαστήρα σε υψηλές ροές καυσίμου.

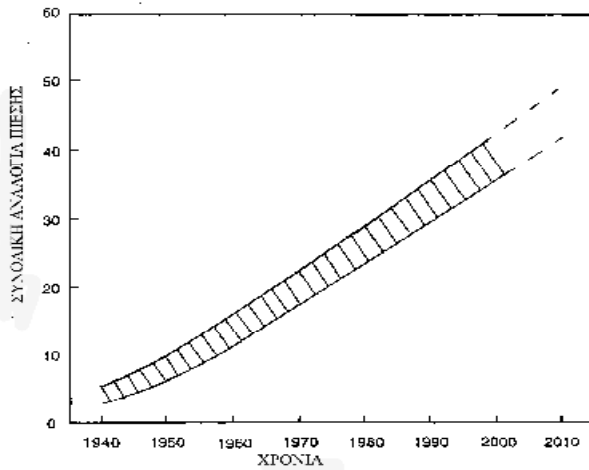
Έγχυση αερίου

Υγρά καύσιμα, ειδικά υψηλής θερμικής αξίας όπως φυσικό αέριο, παρουσιάζουν λίγα προβλήματα από την άποψη της καύσης. Με αέρια χαμηλού θερμικού περιεχομένου (χαμηλά BTU) όμως ο ρυθμός ροής καυσίμου μπορεί να περιέχει το ένα πέμπτο της ολικής μαζικής ροής του καυστήρα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μη ταίριασμα ανάμεσα στο συμπιεστή και στην τουρμπίνα, ειδικά αν ο κινητήρας προορίζεται για χρήση πολλαπλών καυσίμων. Άλλο ένα πρόβλημα με αέρια χαμηλού θερμικού περιεχομένου είναι ο χαμηλός ρυθμός καύσης που μπορεί να απαιτήσει μια μεγαλύτερου όγκου ζώνη καύσης μεγαλύτερη από αυτήν που χρειάζεται για να φιλοξενήσει την μεγάλη ογκομετρική ροή αερίων καυσίμων. Το να πετύχουμε την απαιτούμενη τιμή ρυθμού ανάμιξης στη ζώνη καύσης μπορεί να αποδειχτεί επίσης δύσκολο. Μια αναλογία μίξης που είναι υψηλή έχει ως αποτέλεσμα φτωχά χαρακτηριστικά σβέσης, ενώ εκεί που η αναλογία μίξης είναι πολύ χαμηλή μπορεί να επιφέρει τραχεία και απότομη καύση. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να εγχυθούν αέρια καύσιμα περιλαμβάνουν κανονικά στόμια και σχισμές, στροβιλιστές και ακροφύσια venture.

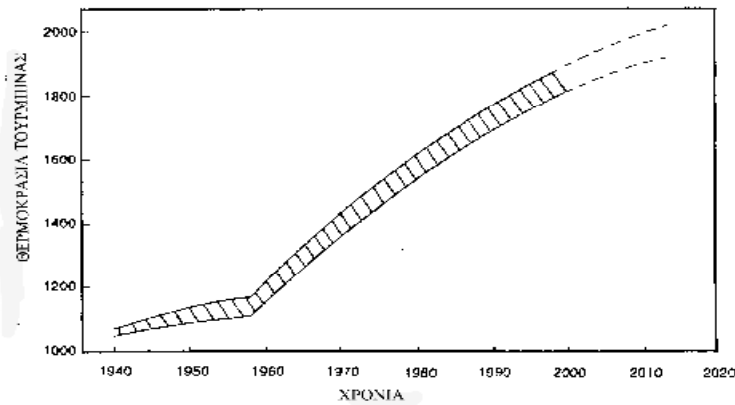
1-11 ΨΥΞΗ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ

Οι λειτουργίες του φλογοσωλήνα είναι να περικλείει την διαδικασία της καύσης και να διευκολύνει την παροχή αέρα σε όλες τις ζώνες καύσης στα καθορισμένα ποσοστά. Ο φλογοσωλήνας πρέπει να είναι δομικά ισχυρός ώστε να αντέχει το φορτίο που δημιουργείτε από τη διάφορα πίεσης κατά μήκος των τοιχωμάτων του. Επίσης πρέπει να έχει επαρκή θερμική αντοχή για να αντέχει σε λειτουργία υψηλής θερμοκρασίας. Αυτό επιτυγχάνεται από ανθεκτικά αντιοξειδωτικά υλικά σε συνδυασμό με την αποτελεσματική χρήση του ψυχρού αέρα. Σε πολλούς καυστήρες που είναι τώρα σε λειτουργία, το 40 % του συνολικού αέρα καύσης χρησιμοποιείται για την ψύξη του φλογοθαλάμου. Στη πράξη η θερμοκρασία του τοιχώματος του φλογοθαλάμου καθορίζεται από την ισορροπία μεταξύ (1) της θερμότητας που λαμβάνει μέσω ακτινοβολίας από το θερμό αέριο και (2) τη θερμότητα που μεταφέρεται από αυτό με τη μεταγωγή στον αέρα του αυλακιού και από την ακτινοβολία στο περιβάλλον του αέρα.

Το πρόβλημα της ψύξης των τοιχωμάτων του φλογοθαλάμου έγινε σοβαρό όσο αυξάνονταν οι αναλογίες των πιέσεων στους κινητήρες (εικόνα 1-18), αλλά αυτό δεν είναι αρχικά κυρίως λόγω της μεγάλης πίεσης. Για την ακρίβεια η αύξηση στην αναλογία της πίεσης είναι ευεργετική στο να ψύχει τη συγκεκριμένη περιοχή. Οι δυσκολίες είναι από την αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας που συνοδεύει την υψηλότερη αναλογία πίεσης. Υψηλότερη εσωτερική θερμοκρασία έχει ένα διπλό δυσμενές αποτέλεσμα: (1) αυξάνει την θερμοκρασία της φλόγας, που με τη σειρά της αυξάνει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας στο φλογοθάλαμο και μειώνει την αποτελεσματικότητα του αέρα σαν ψυκτικού μέσου. Ενώ αυξάνονταν οι αναλογίες της πίεσης με τη πάροδο των χρόνων, οι εσωτερικές θερμοκρασίες των τουρμπίνων έπρεπε να αυξηθούν αναλόγως (εικόνα 1-19) για να μεγιστοποιηθεί η οικονομία στα καύσιμα. Αυτό είχε επίσης ένα δυσμενές αποτέλεσμα στις θερμοκρασίες των μεταλλικών φλογοθαλάμων, ειδικά στο πίσω μέρος του καυστήρα. Περισσότερες αυξήσεις στην ποσότητα αέρα που χρησιμοποιείται στην ψύξη τοιχωμάτων (πάνω από τις ήδη υψηλές τιμές) δεν είναι τεχνικά αποδεκτές γιατί με την εισροή περισσότερου αέρα κατά μήκος των τοιχωμάτων του φλογοθαλάμου, σημαίνει ότι λιγότερος θα είναι διαθέσιμος για καύση και αραίωση. Επίσης θα χειροτέρευε την ακτινική κατανομή θερμοκρασίας στο εξωτερικό του καυστήρα οπότε θα μείωνε την διάρκεια ζωής των λεπίδων της τουρμπίνας. Έτσι, η μόνη πρακτική εναλλακτική λύση είναι να γίνει πιο αποδοτική χρήση του διαθέσιμου αέρα για ψύξη ή ακόμα καλύτερα να μειωθεί η ποσότητα του αέρα που χρησιμοποιείται για τη ψύξη τοιχωμάτων.



1-18 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΤΑΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΘΙΤΑΣ ΠΙΕΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ



1-19 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΤΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥΤΜΠΙΝΑΣ

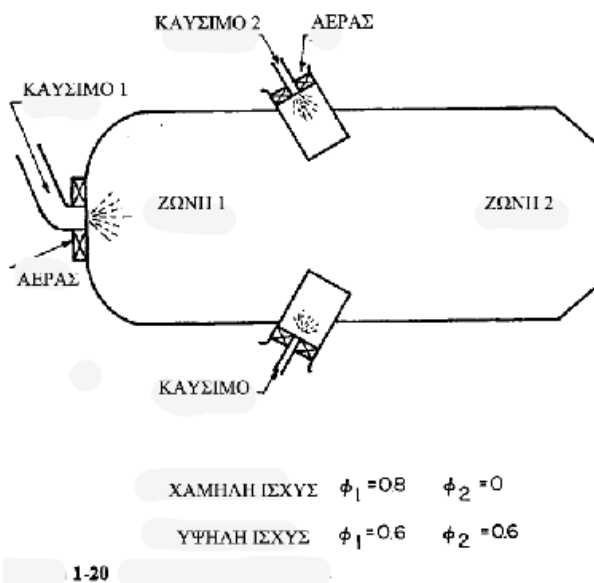
1-12 ΚΑΥΣΤΗΡΕΣ ΓΙΑ ΧΑΜΗΛΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ

Ένα βασικό πρόβλημα στο σχεδιασμό καυστήρα είναι το να επιτύχουμε εύκολη ανάφλεξη, ευρεία περιοχή καύσης, υψηλή αποδοτικότητα καύσης και ελάχιστους ρύπους με καύσιμο που προέρχεται από ένα μονό σημείο εισαγωγής. Καθώς κάποιες από αυτές τις απαιτήσεις συγκρούονται, το τελικό αποτέλεσμα είναι ο συμβιβασμός. Ένα καλό παράδειγμα σύγκρουσης στο σχεδιασμό προέρχεται από την συνεχή ανάγκη να μειωθούν οι ρύποι. Με τους συμβατικούς καυστήρες, κάθε τροποποίηση που ελαφρύνει τις εκπομπές νιτρικών οξειδίων και καπνού θα αυξήσει τους ρύπους του μονοξειδίου του άνθρακα και των άκαυστων υδρογονανθράκων και αντίστροφα.

Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι να γίνει χρήση μιας μεταβλητής γεωμετρίας που να ρυθμίζει την ποσότητα του αέρα που εισέρχεται στην κύρια ζώνη καύσης. Σε υψηλές πιέσεις, μεγάλες ποσότητες αέρα χρησιμοποιούνται για να ελαχιστοποιήσουν τον σχηματισμό αιθάλης και νιτρικού οξέος. Σε χαμηλές πιέσεις η κύρια ροή αέρα εν μέρη σβήνει, όποτε αυξάνει την αναλογία καυσίμου/αέρα και μειώνει την ταχύτητα για να δώσει μεγάλη αποδοτικότητα καύσης καθώς και καλά χαρακτηριστικά έναυσης. Η μεταβλητή γεωμετρία χρησιμοποιείται σε λίγους μεγάλους βιομηχανικούς καυστήρες αλλά η ανάγκη για πολύπλοκο έλεγχο και μηχανισμούς ανατροφοδότησης, που τείνουν να αυξάνουν το κόστος και να μειώνουν την αξιοπιστία, την έχει αποκλείσει από μικρούς κινητήρες και φυσικά από αεροναυπηγικές εφαρμογές.

Μια άλλη εναλλακτική για να πετύχουμε όλους τους στόχους αποδοτικότητας σε μια

μόνο ζώνη είναι να εφαρμόσουμε την “σταδιακή καύση”. Αυτή μπορεί να πάρει την μορφή της αξονικής ή της ακτινικής “σταδιακής καύσης”, αλλά και στις 2 χρησιμοποιεί δυο διαφορετικές ζώνες με τη κάθε μια σχεδιασμένη να βελτιστοποιήσει ορισμένους τομείς της αποδοτικότητας καύσης. Η αρχή της αξονικής φαίνονται στην εικόνα 1-20. Περιέχει μια ελαφρώς γεμάτη κύρια ζώνη (ζώνη 1) που λειτουργεί σε σχετικά μεγάλη ισορροπία αναλογίας Φ της τάξεως του 0.8 (Φ είναι η αναλογία καύσιμου/αέρα διαιρούμενη από την στοιχειομετρική αναλογία καυσίμου/αέρα) για να πετυχει υψηλή αποδοτικότητα καύσης και να περιορίσει την παράγωγη CO και UHC. Η ζώνη 1 παρέχει όλη την αύξηση θερμοκρασίας που χρειάζεται σε συνθήκες χαμηλής ισχύς σε ρελαντί ταχύτητες. Σε υψηλότερα επίπεδα ισχύος φέρεται σαν πηγή πλότος της θερμότητας για την κύρια ζώνη καύσης κατάντη (ζώνη 2) που τροφοδοτείται με προαναμεμιγμένο μίγμα αέρα-καύσιμου. Σε λειτουργία πλήρους φορτίου, ο λόγος ισοδυναμίας και στις δύο ζώνες είναι χαμηλά, γύρω στο 0,6, για να ελαχιστοποιηθούν εκπομπές NO_x και καπνού.



Η σταδιακή καύση τώρα χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικούς κινητήρες που καίνε αέρια καύσιμα σε ακτινική και αξονική μορφή για να πετύχουν χαμηλές εκπομπές ρύπων χωρίς την ανάγκη να καταφύγουμε σε νερό ή έγχυση ατμού.

Για υγρά καύσιμα, ο LPP (lean premix pre vaporize, πτωχής πρόμιξης προ-εξάτμισης) καυστήρας είναι ο πιο υποσχόμενος για χαμηλή NO_x καύση. Η ιδέα δείχνεται σχηματικά στην εικόνα 1-17. Ο σχεδιαστικός στόχος είναι η επίτευξη ολοκληρωτικής εξάτμισης του καυσίμου και η πλήρη μίξη καυσίμου και αέρα πριν τη καύση. Με την αποφυγή της καύσεως σταγονιδίων και με λειτουργία της ζώνης αντίδρασης σε ισχνή αναλογία καύσιμου/αέρα, οι εκπομπές νιτρικού οξέος μειώνονται δραστικά λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας της φλόγας και της εξάλειψης των “θερμών σημείων” από την ζώνη καύσης. Το κύριο μειονέκτημα του LPP συστήματος είναι ο μεγάλος χρόνος που χρειάζεται για να εξατμιστεί πλήρως και να αναμιχθεί το καύσιμο σε χαμηλή ισχύ μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την αυτό-ανάφλεξη στον αγωγό προετοιμασίας του καυσίμου στις υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες που σχετίζονται με τη λειτουργία σε μεγίστη ισχύ. Αυτά τα προβλήματα μπορούν να ξεπεραστούν με το μειονέκτημα του έξτρα κόστους και πολυπλοκότητας, μέσα από τη χρήση της σταδιακής καύσης και της μεταβλητής γεωμετρίας. Άλλοι προβληματισμοί με τα συστήματα LPP είναι αυτή της διάρκειας, της συντήρησης και της ασφάλειας.

Άλλος ένας σημαντικός αντίπαλος στη κατηγορία των υπερ-χαμηλών εκπομπών NO_x είναι ο Rich Burn/Quick-quench/Lean-Burn (πλούσια καύση/γρήγορη σβέσης/πτωχή καύση) (RQL) καυστήρας. Αυτή η ιδέα χρησιμοποιεί μια πλούσια σε καύσιμο κύρια ζώνη όπου ο σχηματισμός NO_x είναι πολύ λίγος λόγω των συνδυασμένων αποτελεσμάτων της χαμηλής θερμοκρασίας και της εξάντλησης του οξυγόνου. Κατάντη της κύριας ζώνης ο επιπλέον αέρας που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί η διαδικασία της καύσης και για να μειωθεί η θερμοκρασία αερίων σε μια επιθυμητή τιμή, εισέρχεται με ένα τρόπο τέτοιο που εξασφαλίζει ομοιόμορφη και γρήγορη μίξη με την εκροή της κύριας ζώνης. Αυτή η διαδικασία μίξης πρέπει να γίνει γρήγορα αλλιώς θερμά αέρια θα διατηρηθούν αρκετά ώστε να παράγουν αρκετό NO_x. Οπότε ο σχεδιασμός ενός γρήγορου και αποδοτικού τομέα μίξης είναι μεγάλης σημασίας για την επιτυχία της ιδέας του καυστήρα RQL.

Η συσκευή που φαίνεται να έχει τις περισσότερες προοπτικές για χαμηλό NO_x είναι ο καταλυτικός καυστήρας. Σε αυτό το σύστημα το καύσιμο πρώτα αναμιγνύεται με αέρα και εξατμίζεται σε πολύ μικρή ισοδύναμη αναλογία και το προκυφθέν ομογενές μίγμα που προκύπτει οδηγείται σε μια καταλυτική κλίνη αντίδρασης. Η παρουσία του καταλύτη επιτρέπει στην καύση να συμβεί σε πολύ χαμηλές αναλογίες καυσίμου/αέρα που κανονικά βρίσκονται εκτός ορίου ευφλεκτότητας. Συνεπώς η θερμοκρασία του αντιδραστήρα είναι πολύ χαμηλή και ο σχηματισμός του NO_x είναι μηδαμινός.

Στα περισσότερα σημερινά σχέδια η θερμική ζώνη αντίδρασης βρίσκεται κατάντη της καταλυτικής κλίνης. Η λειτουργία της είναι να αυξήσει την θερμοκρασία των αερίων στην επιθυμητή τιμή εισόδου της τουρμπίνας και να μειώσει τις συγκεντρώσεις του CO και του UHC σε αποδεκτά επίπεδα.

Οι προοπτικές των καταλυτικών αντιδραστήρων για πολύ χαμηλές εκπομπές ρύπων έχουν αναγνωριστεί τα τελευταία 25 χρόνια αλλά το σκληρό περιβάλλον σε έναν καυστήρα αεριοστροβίλου και το μεγάλο εύρος των συνθηκών λειτουργίας του αποτελούν ένα φράγμα στην ανάπτυξη καταλυτικών καυστήρων για αεριοστροβίλους. Η μακροπρόθεσμη αντοχή των καταλυτικών υλικών είναι ένα μεγάλο πρόβλημα. Σημαντική πρόοδος στην ανάπτυξη καταλυτών εξακολουθεί να γίνεται αλλά η χρήση τους σε αεριο-κινητήρες είναι δύσκολο να γίνει μέχρι να αποκτηθεί μεγάλη εμπειρία σε σταθερούς κινητήρες. Όταν υλοποιηθεί θα είναι στην μορφή του “ακτινικής σταδιακής” διπλού δακτυλιοειδή καυστήρα. Ο εξωτερικός καυστήρας είναι σχεδιασμένος ειδικά για εύκολη έναυση και χαμηλές εκπομπές σε ρελαντί συνθήκες κινητήρα. Σε ρυθμίσεις υψηλής ισχύς το καύσιμο παρέχεται προ-αναμεμιγμένο με αέρα στον εσωτερικό καυστήρα που περιέχει τον καταλυτικό αντιδραστήρα. Σε μεγίστης ισχύος συνθήκες αυτός ο αντιδραστήρας παρέχει την αύξηση της θερμοκρασίας που χρειάζεται να διατηρηθεί ο κινητήρας.

1-13 ΚΑΥΣΤΗΡΕΣ ΓΙΑ ΜΙΚΡΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Σε μικρούς κινητήρες, υψηλές ταχύτητες άξονα κρίνουν αναγκαία την στενή ζεύξη του συμπιεστή και της τουρμπίνας για να μειώσουν τα προβλήματα του στροβιλιζόμενου άξονα. Αυτή η ανάγκη ειδικά όταν συνδυάζεται με την ανάγκη για χαμηλή μετωπική περιοχή, έχει οδηγήσει στην σχεδόν καθολική χρήση των δακτυλιοειδών ανάστροφης ροής ή δακτυλιοειδών αξονικών-ακτινικών καυστήρων. Μια σημαντική εξαίρεση είναι ο Allison T63 κινητήρας που έχει ένα μονό σωληνοειδή καυστήρα τοποθετημένο στο τέλος του κινητήρα για να διευκολύνει την επιθεώρηση και την επιδιόρθωση.

Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτού του σχεδιασμού είναι: πολύ μικρό μήκος άξονα, επαρκή χρήση του διαθέσιμου όγκου καύσης και εύκολη πρόσβαση σε εγχυτήρες καυσίμου. Το κύριο αρνητικό του είναι η υψηλή αναλογία επιφάνειας-όγκου του φλογοσωλήνα, έμφυτη στην ιδέα της ανάστροφης ροής, που προσθέτει το πρόβλημα της ψύξης του φλογοθαλάμου.

Σε ανάστροφης ροής δακτυλιοειδείς, ο αέρας που ρέει μέσα από τις τρύπες στο εξωτερικό φλογοθάλαμο, προσεγγίζει αυτές τις τρύπες από μια κατεύθυνση που είναι

αντίθετη από αυτή που ακόλουθη ο αέρας και εισέρχεται στη ζώνη καύσης μέσα από τρύπες στο εσωτερικό φλογοθάλαμο. Ακόμα, ο αέρας στον εσωτερικό δακτυλιοειδή υποφέρει από μια μεγάλη απώλεια πίεσης από τον αέρα στον εξωτερικό δακτυλιοειδή. Γι' αυτούς τους λόγους είναι αδύνατο να ισορροπηθεί ο εκτοξευόμενος αέρας που προέρχεται από τα εσωτερικά και εξωτερικά τοιχώματα από την άποψη της αρχικής γωνίας, βάθους διείσδυσης και ορμής. Κατά συνέπεια, ο διπλός στρόβιλος και η ροή κύριας ζώνης αποκλείεται και συνήθως χρησιμοποιείται η μονόπλευρη είσοδος αέρα που παράγει μονού στρόβιλου επανακυκλοφόρηση ροής. Η επανακυκλοφόρηση ροής δημιουργείται εν μέρη από εκτόξευση αέρα και εν μέρη από αέρα που εισάγεται ως δέσμη τοίχου. Αυτός ο αέρας εξυπηρετεί να κρυσώσει το θόλο του φλογοθαλάμου πριν συμμετάσχει στην κύρια καύση.

Οι κυρίες προβληματικές περιοχές με μικρούς καυστήρες είναι η ανάφλεξη, η ψύξη τοιχωμάτων και η εισαγωγή καύσιμου. Το μέγεθος και το βάρος των εξαρτημάτων ανάφλεξης είναι ιδιόζυγες σημασίας επειδή σε μικρούς κινητήρες αντιπροσωπεύουν ένα μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού βάρους και του μεγέθους του κινητήρα από ότι σε μεγάλους κινητήρες. Δυστυχώς, οι περισσότερες εφαρμογές μικρών κινητήρων απαιτούν περισσότερες ενάρξεις από εφαρμογές σε μεγάλο κινητήρα εφαρμογές όποτε η προσπάθεια να μειωθεί το μέγεθος και το βάρος των εξαρτημάτων ανάφλεξης μπορεί να οδηγήσει σε έλλειψη αξιοπιστίας και απώλεια απόδοσης.

Η ψύξη του τοιχώματος του φλογοθαλάμου είναι ιδιαίτερα δύσκολη σε μικρά δακτυλιοειδή συστήματα λόγω της μεγάλης επιφάνειας που χρειάζεται να ψυχθεί. Η κατάσταση επιδεινώνεται από τις μικρές δακτυλιοειδείς ταχύτητες που σχετίζονται με φυγόκεντρους συμπίεστρες που έχουν ως αποτέλεσμα τη χαμηλή εξωτερική ψύξη του φλογοθαλάμου. Νέες μέθοδοι ψύξης που χρειάζονται μόνο μικρές ποσότητες αέρα ανά μονάδα επιφάνειας του φλογοθαλάμου είναι ξεκάθαρο ότι χρειάζονται.

Εντελώς ικανοποιητική μέθοδος έγχυσης καύσιμου για μικρούς ευθύ τύπου δακτυλιοειδείς θαλάμους δεν έχει επινοηθεί ακόμα. Η ουσία του προβλήματος είναι ότι οι απαιτήσεις για υψηλές αποδόσεις καύσης, χαμηλών εκπομπών και καλού pattern factor προστάζουν την ανάγκη μεγάλου αριθμού εγχυτήρων καύσιμου. Όμως όσο μεγαλύτερος ο αριθμός τόσο μικρότερο το μέγεθος και η εμπειρία έχει δείξει ότι μικρά περάσματα και στόμια (κάτω από 0.5mm) είναι επιρρεπή σε έμφραξη και διάβρωση. Έτσι υπάρχει ένα όριο στο πόσο ένα επιτυχημένος μεγάλος ψεκαστήρας μπορεί να μικρύνει σε μέγεθος.

Η ανάπτυξη σε συμπίεστρες και αερο-ψυχόμενες τουρμπίνες είναι σίγουρο ότι θα οδηγήσουν σε υψηλότερες αναλογίες συμπίεσης και σε υψηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες τουρμπίνας. Περισσότερη έρευνα χρειάζεται στον τομέα της ψύξης τοιχωμάτων, προετοιμασίας καύσιμου και κατανομής, μικρές συσκευές ανάφλεξης και υψηλής θερμοκρασίας υλικά που περιλαμβάνουν κεραμικά, που θα ανταποκριθούν στις ειδικές ανάγκες των μικρών δακτυλιοειδών καυστήρων.

1-14 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΘΑΛΑΜΟΙ

Οι βιομηχανικοί θάλαμοι χρειάζεται να λειτουργούν οικονομικά και αξιόπιστα για μεγάλες περιόδους χωρίς ανάφλεξη. Το να είναι συμπαγής δεν είναι πλέον σημαντικό και λαμβάνεται υπόψη μόνο όταν ο κινητήρας πρέπει να περιοριστεί και να ταιριάζει σε μια υπάρχουσα κατασκευή και αν η παράδοση είναι δύσκολη. Η οικονομία καύσιμου και οι χαμηλές εκπομπές ρύπων λοιπόν γίνονται τα πιο σημαντικά θέματα μαζί με το κόστος ανά μονάδα. Επίσης προσβασιμότητα για συντήρηση και ελάχιστος χρόνος τερματισμού θα επηρεάσει τις πωλήσεις σε μια ανταγωνιστική αγορά.

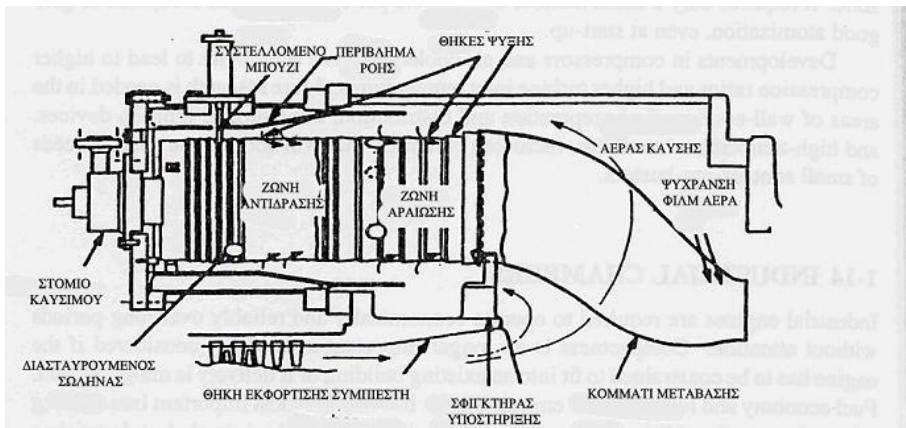
Για να πληρούνται αυτές οι προϋποθέσεις, οι καυστήρες σε βιομηχανικούς κινητήρες τείνουν να είναι μεγαλύτεροι από τους αεροναυπηγικούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερους χρόνους παραμονής που είναι πλεονέκτημα όταν καίγονται κακής ποιότητας

καύσιμα. Επίσης, οι ταχύτητες ροής είναι χαμηλότερες και έτσι οι απώλειες πίεσης είναι μικρότερες.

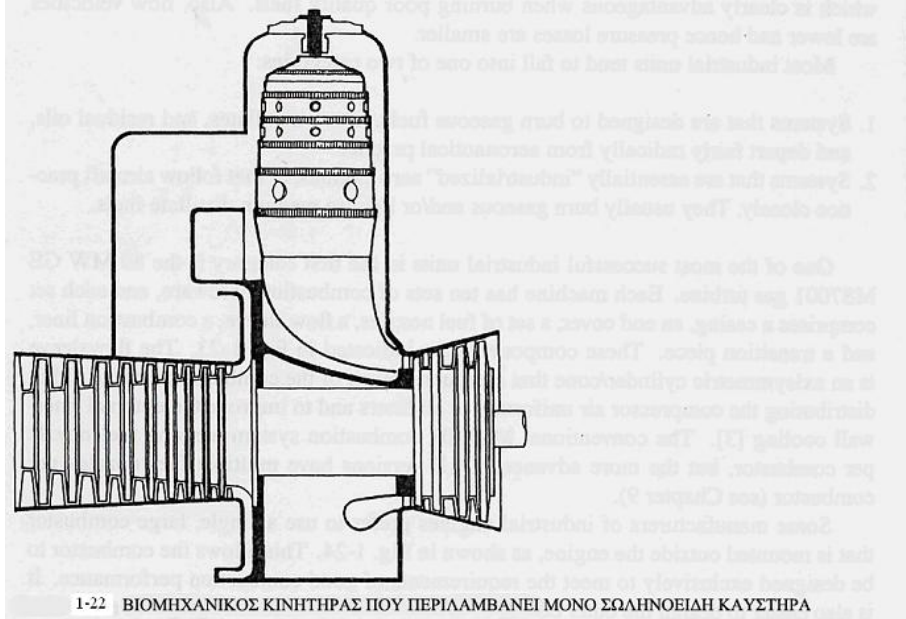
Οι περισσότερες βιομηχανικές μονάδες τείνουν να ανήκουν σε μια από τις δυο παρακάτω κατηγορίες:

1. Συστήματα που είναι σχεδιασμένα να καίνε αέρια καύσιμα, βαρέα αποστάγματα και υπολειμματικά λάδια, και απέχουν αρκετά από αεροναυπηγικές εφαρμογές.
2. Συστήματα που είναι βιομηχανοποιημένοι αερο-κινητήρες, ή που βρίσκουν εφαρμογή σε αεροσκάφη. Συνήθως καίνε αέρια καύσιμα και/η ελαφριά έως μέτρια αποστάγματα.

Μερικοί κατασκευαστές βιομηχανικών κινητήρων προτιμούν να χρησιμοποιούν ένα μονό μεγάλο καυστήρα προσκολλημένο έξω από τον κινητήρα όπως στην εικόνα 1-21. Αυτό επιτρέπει στον καυστήρα να σχεδιάζεται αποκλειστικά ώστε να πληροί τις απαιτήσεις μιας καλής απόδοσης καύσης. Είναι επίσης ευκολότερο να σχεδιαστεί το εξωτερικό πλαίσιο της μονάδας ώστε να αντέχει σε υψηλές πιέσεις αερίου. Ένα ακόμα πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ευκολία επιθεώρησης, συντήρησης και επισκευής, πράγματα τα οποία μπορούν να γίνουν όλα χωρίς την αφαίρεση μεγάλων εξαρτημάτων που το περικλείουν.



1-21 General Electric ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΣ ΚΑΥΣΤΗΡΑΣ



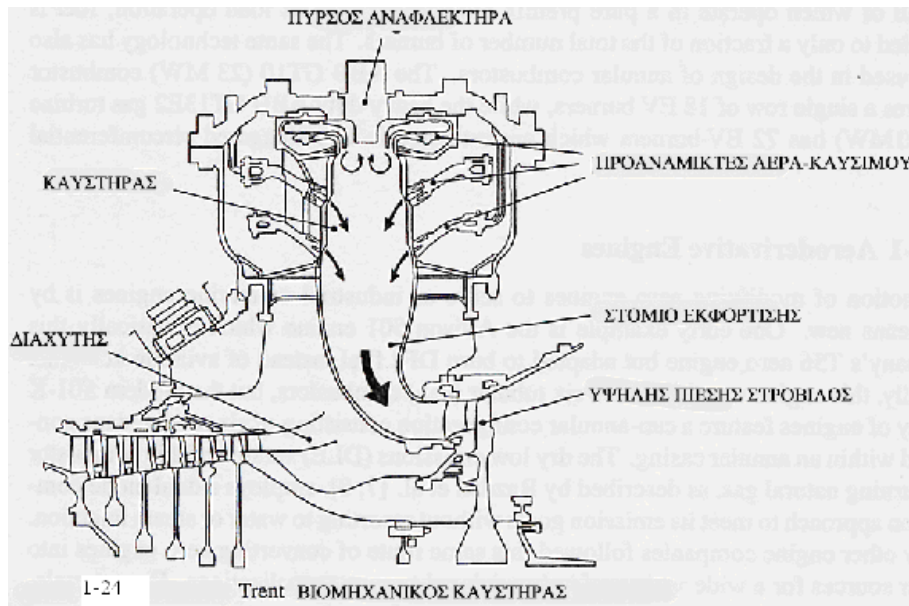
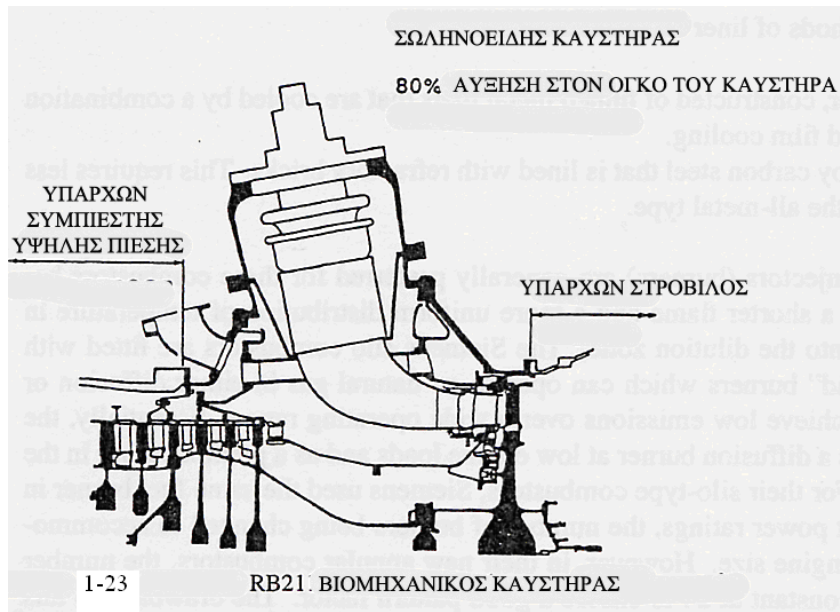
1-22 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΠΟΥ ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΕΙ ΜΟΝΟ ΣΩΛΗΝΟΕΙΔΗ ΚΑΥΣΤΗΡΑ

Δυο βασικές μέθοδοι κατασκευής φλογοσωλήνων χρησιμοποιούνται :

1. Ένας μεταλλικός φλογοσωλήνας, που κατασκευάζεται από κομμάτια μεταλλικών πτερυγίων που ψύχονται με συνδυασμό ψύξης συμβατικής και φίλμ (μεμβράνης).
2. Ένας σωλήνας από ανθρακούχο χάλυβα μη κράμα που ευθυγραμμίζεται με πυρίμαχα τούβλα. Αυτό απαιτεί λιγότερο αέρα ψύξεως από τον μεταλλικό τύπο.

1-15 ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΑΕΡΙΩΘΗΣΗΣ

Η αντίληψη της τροποποίησης των αεροκινητήρων για να εξυπηρετούν βιομηχανικούς ή ναυτικούς κινητήρες δεν είναι καινούρια. Ένα πρώιμο παράδειγμα είναι ο Allison 501 κινητήρας που είναι ουσιαστικά ο T56 αεροκινητήρας αυτής της εταιρίας αλλά προσαρμόστηκε να χρησιμοποιεί DF2 (diesel fuel 2-όχι τόσο καλό αλλά πιο φθηνό) καύσιμο αντί για αεροπορική κηροζίνη. Αρχικά, αυτός ο κινητήρας είχε έξι σωληνοειδείς καυστήρες αλλά οι μοντέρνοι 501-K κινητήρες έχουν μια δακτυλιοειδή διαμόρφωση που περιέχει έξι σωληνοειδή δοχεία που τα περικλείει ένα δακτυλιοειδές περίβλημα. Η ξηρή χαμηλών ρύπων (DLE-dry low emission) έκδοση αυτού του καυστήρα για να καίει φυσικό αέριο χρησιμοποιεί μια διπλής καύσης προσέγγιση για να πετύχει τους στόχους των ρύπων χωρίς να καταφεύγει σε νερό ή έγχυση ατμού. Πολλές άλλες εταιρίες κινητήρων ακλούθησαν τον ίδιο δρόμο μετατροπής αεροκινητήρων σε πηγές ενέργειας για ένα μεγάλο εύρος βιομηχανικών και ναυτικών εφαρμογών. Για παράδειγμα η Rolls Royce παρήγαγε βιομηχανοποιημένες εκδόσεις των αεροκινητήρων Avon, Tyne και του Spey. Για τον καυστήρα, αυτή η βιομηχανοποιημένη διαδικασία περιλάμβανε αλλαγές στην έγχυση καύσιμου, μερικές φορές για να παρέχει πολλαπλών καυσίμων ικανότητα αλλά επίσης για να διευκολύνει την έγχυση νερού ή ατμού για την μείωση NO_x. Ήταν επίσης σύνηθες η μετατροπή της μορφής της κύριας ζώνης ροής, συνήθως με την προσθήκη αέρα για να εκμεταλλευτούν την απουσία των αναγκών μεγάλων υψόμετρων και για να μειώσουν τον σχηματισμό αιθάλης και καπνού. Καθώς οι κανονισμοί των εκπομπών γίνονταν όλο και πιο αυστηρές, τέτοιου είδους απλές μετατροπές σε έναν υπάρχον αεροκινητήρα δεν αρκούσαν και χρειάζονταν πιο εξελιγμένες προσεγγίσεις. Οι σημερινοί DLE καυστήρες χρησιμοποιούν πλήρως τα πλεονεκτήματα του σταδιοποίησης των καυσίμων και της προανάμιξης καυσίμου-αέρα ώστε να πετύχουν τους στόχους των εκπομπών. Οι μηχανές αερίωσης GE LM6000 και RR211 DLE περιέχουν και οι δυο σταδιακή καύση προαναμεμιγμένων αερίων και μιγμάτων καυσίμου/αέρα. Άλλο ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό αυτών των δυο κινητήρων είναι ότι και οι δυο προέρχονται από επιτυχημένους υψηλών επιδόσεων αερο-κινητήρες που απλώς αντικαταστήθηκαν οι αερο-καυστήρες με DLE καυστήρες του ίδιου μήκους όπως φαίνεται στην εικόνα 1-23 για τον RB211. Η Rolls Royce Industrial Trent είναι ανάμεσα στους πιο προσφάτους κινητήρες αερίωσης. Περιέχει τρία διαφορετικά στάδια έγχυσης προαναμεμιγμένου καυσίμου/αέρα όπως φαίνεται και στην εικόνα 1-24.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ

2-1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι εκπομπές ρύπων από την διαδικασία καύσης, έχουν προκαλέσει μεγάλη ανησυχία στην κοινή γνώμη λόγω της επίδρασης που έχουν στην υγεία και στο περιβάλλον. Η τελευταία δεκαετία έχει γνωρίσει ραγδαίες αλλαγές όσον αφορά τους κανονισμούς που ελέγχουν τις εκπομπές αεριοστρόβιλων και τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη αυτών των αναγκών. Την διάρκεια αυτής της περιόδου η κατανάλωση καυσίμου από την πολιτική αεροπορία έχει αυξηθεί σε βαθμό που οι αεροπορικές μεταφορές έχουν περάσει στην αντίληψη ως ένας από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους ενεργοβόρους τομείς στον κόσμο. Την ίδια στιγμή οι στατικοί αεριοστρόβιλοι έχουν καθιερωθεί ως κινητήρια δύναμη στις αγορές φυσικού αερίου και τις βιομηχανίες πετρελαίου και έχουν αποκτήσει νέες εφαρμογές σε συνδυασμένου κύκλου βιομηχανίες και σε πολλούς τομείς παραγωγής ενέργειας. Όλες αυτές οι βελτιώσεις συνοδεύτηκαν από συνεχή πίεση στους μηχανικούς που ασχολούνται με θέματα καύσης, ώστε να μειώσουν τις ρυπογόνες εκπομπές από όλα τα είδη των αεριοστρόβιλων.

Το υλικό που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο χωρίζεται σε έξι κύριους τομείς:

- 1) Μια γενική επισκόπηση των ζητημάτων εκπομπών και τους κανονισμούς που έχουν θεσπιστεί για την αντιμετώπιση τους.
- 2) Τους μηχανισμούς του σχηματισμού ρύπων και τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την ανακούφιση από τους ρύπους τους από τους συμβατικούς καυστήρες αεριοστρόβιλους.
- 3) Η χρήση της μεταβλητής γεωμετρίας και σταδιακής καύσης για τη μείωση των εκπομπών με τον έλεγχο της θερμοκρασίας της φλόγας.
- 4) Οι βασικές προσεγγίσεις για τον σχεδιασμό των ξηρών καυστήρων χαμηλού NO_x και εξαιρετικά χαμηλού NO_x
- 5) Εναλλακτικοί μέθοδοι για επίτευξη καυστήρων εξαιρετικά χαμηλών σε εκπομπές NO_x, συμπεριλαμβανομένων των πλούσιας καύσης, ταχείας σβέσης, πτωχής καύσης και καταλυτικών καυστήρων.
- 6) Συσχέτιση για τις εκπομπές οξειδίου του αζώτου (NO_x) και μονοξειδίου του άνθρακα (CO).

2-2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ- ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΡΥΠΩΝ

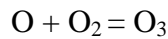
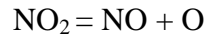
Τα καυσαέρια ενός αεριοστρόβιλων αεροσκάφους αποτελείται από μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), υδρατμούς (H₂O), άκαυστους υδρογονάνθρακες (UHC), σωματίδια (κυρίως άνθρακα), οξείδια του αζώτου (NO_x), και περίσσεια ατμοσφαιρικού οξυγόνου και αζώτου. Το διοξείδιο του άνθρακα και οι υδρατμοί δεν θεωρούνται ως ρύποι επειδή είναι η φυσική συνέπεια της πλήρους καύσης ενός καυσίμου υδρογονανθράκων. Ωστόσο, και τα δυο συμβάλλουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη και μπορούν να περιοριστούν με το να καίμε λιγότερα καύσιμα. Έτσι, οι βελτιώσεις στη θερμική απόδοση στον κινητήρα, όχι μόνο μειώνουν το άμεσο κόστος λειτουργίας αλλά μειώνουν επίσης και τη ρύπανση. Οι κυριότεροι ρύποι παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα 2-1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-1: Κύριοι ρύποι από αεριοστροβίλους

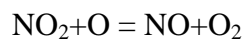
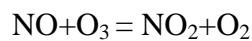
<u>ΡΥΠΟΣ</u>	<u>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ</u>
CO	ΤΟΞΙΚΟ
UHC	ΤΟΞΙΚΟ
C	ΟΡΑΤΟ
NO _x	ΤΟΞΙΚΑ, ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ ΤΗΣ ΑΙΘΑΛΟΜΙΧΛΗΣ, ΕΞΑΝΤΛΗΣΗ ΟΖΟΝΤΟΣ ΣΤΗΝ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΑ
SO _x	ΤΟΞΙΚΑ, ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΑ

Το μονοξείδιο του άνθρακα μειώνει την ικανότητα του αίματος να απορροφά οξυγόνο, και σε υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσει ασφυξία, ακόμα και θάνατο. Οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες δεν είναι μόνο τοξικοί, αλλά συνδυάζονται με τα οξείδια του αζώτου σχηματίζοντας φωτοχημικό νέφος. Τα αιωρούμενα σωματίδια (γενικά ονομαζόμενα αιθάλη ή καπνός) δημιουργούν προβλήματα όσον αφορά την ορατότητα της εξάτμισης, και ρύπανση της ατμόσφαιρας. Συνήθως δεν θεωρούνται τοξικά στα επίπεδα που εκπέμπονται, όμως πρόσφατες έρευνες δείχνουν μια ισχυρή σχέση μεταξύ άσθματος και διαφόρων άλλων αναπνευστικών παθήσεων, και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τις συγκεντρώσεις των μικρών σωματιδίων στην περιοχή των μικρογραμμαρίων. Επιπλέον, ορισμένα κατασταλτικά καπνού περιέχουν βαρέα μέταλλα, όπως το βάριο, το οποίο προσθέτει έναν άλλο ρύπο στα καυσαέρια των εξατμίσεων. Οξείδια του αζώτου (NO+NO₂), των οποίων η κυρίαρχη ένωση σε υψηλά επίπεδα εκπομπών είναι το οξείδιο του αζώτου (NO), όχι μόνο συμβάλλουν στην παραγωγή του φωτοχημικού νέφους στο επίπεδο του εδάφους, αλλά προκαλούν επίσης ζημιά στη ζωή των φυτών και προσθέτουν στο πρόβλημα της όξινης βροχής. Σε σχέση με άλλες πηγές, οι κινητήρες των αεροσκαφών έχουν μικρή συνεισφορά στην επιβάρυνση των οξειδίων του αζώτου (NO_x). Για παράδειγμα, στις Η.Π.Α οι εκπομπές των οξειδίων του αζώτου (NO_x) από τις μηχανές αεροσκαφών αντιπροσωπεύουν μόνο το 0,5% των συνολικών εκπομπών σε εθνικό επίπεδο από όλες τις πηγές. Σε παγκόσμια βάση, οι εκπομπές οξειδίων

του αζώτου από τις μηχανές αεροσκαφών, αποτελούν λιγότερο από το 3% του συνόλου των ανθρωπογενών εκπομπών. Ωστόσο, ιδιαίτερη ανησυχία προκαλεί το γεγονός ότι αυτές οι εκπομπές οδηγούν στο σχηματισμό του όζοντος στην τροπόσφαιρα-η περιοχή που εκτείνεται από το επίπεδο του εδάφους έως τα 12 περίπου χιλιόμετρα πάνω από την επιφάνεια της γής. Αυτή είναι η περιοχή στην οποία οι στατικοί αεριοστροβίλοι και τα υποηχητικά αεροσκάφη λειτουργούν. Οι σχετικοί μηχανισμοί αντίδρασης είναι:



Από μετρήσεις που λήφθηκαν για μεγάλο χρονικό διάστημα σε υψόμετρο 1 έως 3 χιλιόμετρα δείχνουν ότι το επίπεδο του όζοντος πάνω από την Δυτική Ευρώπη πλησιάζει τώρα τα 50ppb (μέρη ανά δισεκατομμύριο). Παρατεταμένη έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος, γύρω στα 100ppb σχετίζεται με αναπνευστικές παθήσεις, προβλήματα όρασης, πονοκεφάλους και αλλεργίες. Το τροποσφαιρικό όζον είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιοχές όπου τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά εμποδίζουν το τοπικό σύστημα καιρού από το να αφαιρέσει το όζον που σχηματίζεται κατά την καύση, και όπου η ισχυρή ηλιοφάνεια μπορεί να προωθήσει τις φωτοχημικές αντιδράσεις που οδηγούν στο νέφος. Το Los Angeles είναι ένα κλασικό παράδειγμα τέτοιας περιοχής. Δεν αποτελεί έκπληξη, επομένως, ότι η πολύ αυστηρή νομοθεσία για τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) προήλθε από αυτή την πόλη. Παρόμοιες μελέτες δείχνουν ότι οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) που εκπέμπονται στα ακραία υψόμετρα στα οποία τα υπερηχητικά αεροσκάφη απαιτείται να λειτουργούν, μπορούν να καταστρέψουν το στρατοσφαιρικό όζον μέσω των αντιδράσεων:



Στο τέλος αυτών των αντιδράσεων το NO απελευθερώνεται έτσι ώστε να παραχθεί περισσότερο όζον. Η μείωση του στρώματος του όζοντος επιτρέπει την αύξηση της διείσδυσης της ηλιακής υπεριώδους ακτινοβολίας, που παράγει μια αντίστοιχη αύξηση στη συχνότητα εμφάνισης καρκίνου του δέρματος.

Με τους στάσιμους κινητήρες να καίνε υπολείμματα καυσίμων, ένας επιπλέον ρύπος που είναι ανησυχητικός είναι τα οξείδια του θείου (SO_x) κυρίως το διοξείδιο του θείου (SO_2) και το τριοξείδιο του θείου (SO_3), που σχηματίζονται όταν το μίγμα που περιέχει θείο αντιδρά με το οξυγόνο στον αέρα καύσης. Είναι τοξικοί και διαβρωτικοί και οδηγούν στον σχηματισμό θειικού οξέος στην ατμόσφαιρα. Επειδή σχεδόν όλο το θείο στο καύσιμο οξειδώνεται σε οξείδια του θείου (SO_x), η μόνη βιώσιμη στρατηγική για τον περιορισμό του, είναι η αφαίρεση του θείου από το καύσιμο πριν από την καύση.

Για όλους τους τύπους των στάσιμων αεριοστροβίλων, τα προβλήματα που δημιουργούνται από τις εκπομπές αερίων από την εξάτμιση, δεν είναι λιγότερο δύσκολα από ό,τι για τους κινητήρες των αεροσκαφών. Η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας, αναμένεται να αυξηθεί τα επόμενα 30 χρόνια κατά 1,4% ετησίως. Αυτή η ζήτηση θα καλυφθεί κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων. Έτσι, οι κατασκευαστές και οι χρήστες των αεριοστροβίλων για την

παραγωγή ρεύματος, βρίσκονται τώρα στην πρώτη γραμμή όσον αφορά την ευθύνη για θέματα εκπομπών.

2-3 ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

Σε αυτήν τη παράγραφο θα δοθούν οι ισχύοντες διεθνείς κανονισμοί για εκπομπές από διαφορετικού είδους αεριομηχανές.

ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ

Ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO), έχει γνωστοποιήσει τις ρυθμίσεις των πολιτικών υποηχητικών στροβιλοκινητήρων διπλής ροής με ονομαστικό επίπεδο ώσης πάνω από 26,7 kN (6000 rounds), για ένα καθορισμένο κύκλο απογείωσης – προσγείωσης (Landing-takeoff cycle- LTO), που βασίζονται σε ένα επιχειρησιακό κύκλο γύρω από τα αεροδρόμια. Αυτός ο LTO κύκλος προορίζεται να είναι αντιπροσωπευτικός των εργασιών που εκτελούνται από ένα αεροσκάφος που κατεβαίνει από υψόμετρο 914m (3000ft) στην πορεία προσέγγισης του, προς το χρόνο που επιτυγχάνει στη συνέχεια το ίδιο ύψος, μετά την απογείωσή του.

Τα πρότυπα του Διεθνή Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO) για εκπομπές αερίων παρουσιάζονται στον πίνακα 2-2, στον οποίον το π_{00} είναι ο λόγος πιέσεων του κινητήρα κατά την απογείωση. Είναι εκφρασμένες σε όρους μιας παραμέτρου, που αποτελείται από τη συνολική μάζα σε γραμμάρια του κάθε δεδομένου αέριου ρύπου που εκπέμπεται κατά τη διάρκεια του κύκλου LTO, ανά kN της ονομαστικής ώσης στο επίπεδο της θάλασσας. Έτσι έχουμε:

$$\text{Εκπομπές (g/kN)} = \text{δείκτης εκπομπών (g/kg καυσίμου)} \times \text{μηχανή SFC (ειδική κατανάλωση καυσίμου μηχανής- Specific Fuel Consumption) (kg καυσίμου/hr kN)} \times \text{ώρες λειτουργίας (hr)} \quad (2-1)$$

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-2: ΠΡΟΤΥΠΑ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΑΕΡΙΩΝ ICAO

ΕΚΠΟΜΠΗ (g/KN)	ΥΠΟΗΧΗΤΙΚΗ ΑΕΡΙΩΘΟΥΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΗ	ΥΠΕΡΗΧΗΤΙΚΗ ΑΕΡΙΩΘΟΥΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΗ
HC	19.6	140 (0.92) π_{00}^0
CO	118.0	4550(π_{00}) ^{-1.03}
NO _x	32+1.6 π_{00}	36+2.42 π_{00}

Αυτή η εξίσωση δείχνει ότι δυο μέθοδοι είναι διαθέσιμοι για τον κατασκευαστή της μηχανής έτσι ώστε να μειώσει τα οξειδία του αζώτου (NO_x). Ο ένας είναι να κάνει βελτιώσεις στον καυστήρα, οι οποίες θα μειώσουν τους δείκτες εκπομπών (EI-Emissions Index), και ο άλλος είναι να διαλέξει ένα κύκλο μηχανής που έχει χαμηλότερο SFC. Επειδή τα επίπεδα του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και των άκαυστων υδρογονανθράκων (UHC) έχουν μειωθεί σημαντικά στις σύγχρονες μηχανές, σε όλες τις συνθήκες χαμηλής ενέργειας, και μόνο τα οξειδία του αζώτου (NO_x) εκπέμπονται σε σημαντικές ποσότητες μόνο σε υψόμετρο ταξιδιού, στην πράξη οι εκπομπές που παράγονται από τις μηχανές αεροσκαφών αποτελούνται κατά κύριο λόγο από οξειδία του αζώτου (NO_x). Ένα τυπικό παράδειγμα της κατανομής της μάζας των εκπομπών που σχετίζεται με την πτήση ενός σύγχρονου υποηχητικού αεροσκάφους παρουσιάζεται στον πίνακα 2-3. Αυτός ο πίνακας αναπαριστά μια πτήση πεντακοσίων ναυτικών μιλίων και δείχνει ότι οι εκπομπές οξειδίου του αζώτου (NO_x) κυριαρχούν τόσο στην περιοχή του αεροδρομίου όσο και στην διάρκεια του υψομέτρου ταξιδιού. Για μια μεγαλύτερης διάρκειας πτήση, οι εκπομπές του οξειδίου του αζώτου (NO_x) θα αντιπροσωπεύουν ένα ακόμα μεγαλύτερο μερίδιο από τη συνολική μάζα των εκπομπών.

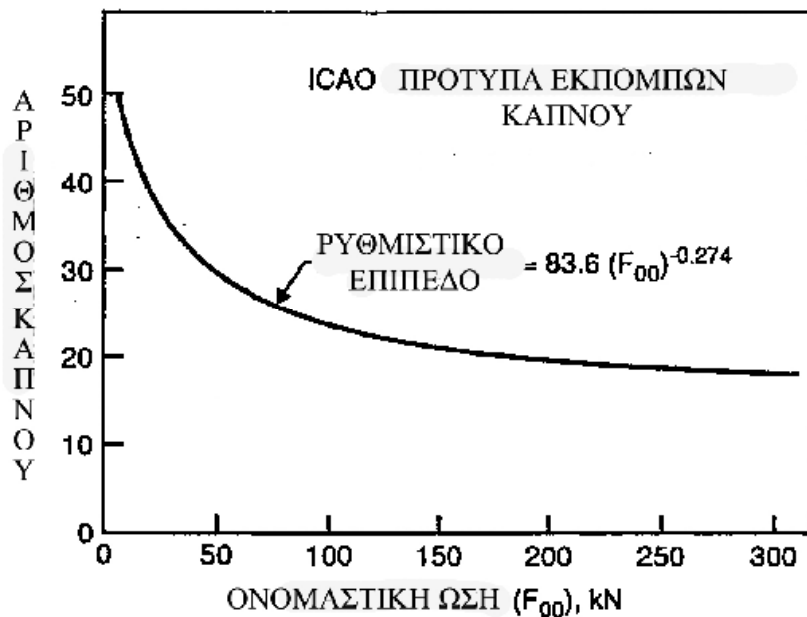
Το πρότυπο του διεθνή οργανισμού πολιτικής αεροπορίας (ICAO) για τις μετρήσεις αιθάλης εκφράζεται σε όρους ενός αριθμού καπνού (SN-Smoke Number), ο οποίος σχετίζεται με την ώση απογείωσης (F₀₀), από την σχέση

$$SN=83.6(F_{00})^{-0.274} \quad (2-2)$$

Αυτή η σχέση αναπαριστάται γραφικά στο διάγραμμα 2-1. Ο σκοπός αυτού του πρότυπου είναι η εξάλειψη οποιουδήποτε ορατού καπνού από την εξάτμιση του κινητήρα. Εφόσον η ορατότητα του καπνού εξαρτάται τόσο από την συγκέντρωση καπνού, όπως φαίνεται από την τιμή του αριθμού καπνού (SN), και από το μήκος του οπτικού μονοπατιού, ο επιτρεπόμενος αριθμός καπνού (SN) ενός κινητήρα υψηλής ώσης, είναι χαμηλότερος από αυτόν για κινητήρα χαμηλής ώσης, λόγω της μεγαλύτερης διαμέτρου της εξάτμισης.

Πίνακας 2-3: τυπική κατανομή συνολικών μαζικών εκπομπών

	Ποσοστό της συνολικής εκπεμπόμενης μάζας (δικύλινδρος κινητήρας και πεδίο 500 ναυτικών μιλίων)		
Κατηγορία	Κατά τη διάρκεια του κύκλου ICAO προσγείωσης-απογείωσης	Κατά τη διάρκεια αναρρίχησης/καταρρίχησης	Σύνολο
Καπνός	-	0.1	0.1
HC	0.6	1.0	1.6
CO	5.4	7.0	12.4
NO _x	7.8	78.1	85.9
ΣΥΝΟΛΟ	13.8 (56.5% NO _x)	86.2 (90.6% NO _x)	100



Διάγραμμα 2-1: Πρότυπα εκπομπών καπνού κατά ICAO

Η κατάσταση όσον αφορά τη συμμόρφωση στους κανονισμούς του Διεθνή Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO) είναι γενικά ικανοποιητική για τα αεροσκάφη υποηχητικών κινητήρων, και οφείλεται κυρίως στις προσπάθειες των κατασκευαστών κινητήρων κατά τη διάρκεια των τελευταίων 20 ετών για να βελτιώσουν τον σχεδιασμό του καυστήρα, και για να μειώσουν την ειδική κατανάλωση καυσίμου του κινητήρα. Ωστόσο, υπάρχει συνεχής πίεση για την ελάττωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x) από όλες τις πηγές. Στην Σουηδία τώρα οι φόροι επιβάλλονται στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) που παράγονται κατά την διάρκεια της προσγείωσης και απογείωσης (LTO) στις πτήσεις εσωτερικού, ενώ στην Ελβετία οι ζώνες χρέωσης βασίζονται τόσο στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x), όσο και στις εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων (UHC) κατά την διάρκεια της προσγείωσης και της απογείωσης. Οι ισχύοντες κανονισμοί του Διεθνή Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO), περιορίζονται σε λειτουργίες που γίνονται σε χαμηλά υψόμετρα μέσα και γύρω από τα αεροδρόμια, αλλά οι αυξανόμενες ανησυχίες σχετικά με μείωση του όζοντος στα μεγάλα υψόμετρα, θα μπορούσε να οδηγήσει στην επέκταση των νόμων και στις άλλες περιοχές της πτήσης, όπως στο υψόμετρο ταξιδιού, όπου έχουμε τις μεγαλύτερες εκπομπές οξειδίων του αζώτου.

Τα πρότυπα εκπομπών που παρουσιάζονται στον πίνακα 2-2 για υπερηχητικούς στροβιλοκινητήρες, τέθηκαν για να διασφαλιστεί ότι ο κινητήρας Olympus που τροφοδοτούσε το Concorde, θα ήταν συμβατός στα πρότυπα. Για μελλοντικούς υπερηχητικούς κινητήρες επιβατικών, η NASA έχει προτείνει μια τιμή NO_x EI των 5g/kg καυσίμου. Ο στόχος αυτός δεν φαίνεται να είναι πάρα πολύ δύσκολος όταν εξετάζεται παράλληλα με τα επίπεδα οξειδίων του αζώτου EI ταξιδιού από 8-12, που παράγονται από τα

σύγχρονα υποηχητικά αεροσκάφη. Ωστόσο, λόγω της μεγάλης αύξησης της πίεσης σε όλο τον ηχητικό κύμα που παράγεται από τα υπερηχητικά επιβατικά αεροσκάφη, οι θερμοκρασίες του καυστήρα στο στόμιο εισόδου θα είναι εξαιρετικά υψηλές, και η εφαρμογή της τρέχουσας τεχνολογίας στους καυστήρες, θα έχει σαν συνέπεια τα επίπεδα EI NO_x να κυμανθούν στο 45. Έτσι, το μέλλον της δεύτερης γενιάς υπερηχητικών αεροσκαφών, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συμμόρφωση με τους στόχους που μπορούν να επιτευχθούν μόνο με τη χρήση του “ακόμα-να-αναπτυχθεί” εξαιρετικά χαμηλών οξειδίων του αζώτου τύπο καυστήρα.

ΣΤΑΘΕΡΟΙ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ

Οι κανονισμοί που διέπουν τις εκπομπές από τους σταθερούς αεριοστρόβιλους τείνουν να γίνουν εξαιρετικά σύνθετοι, καθώς η νομοθεσία διαφέρει από τη μια χώρα στην άλλη και η συμπλήρωση τους από τους τοπικούς ή ειδικούς για το χώρο κανονισμούς και διατάξεις, θέτουν το μέγεθος και τη χρήση της εγκατάστασης υπό εξέταση, για το είδος του καυσίμου που θα πρέπει να χρησιμοποιείται. Για τον μεγάλο αριθμό μηχανών που καίνε φυσικό αέριο, οι εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων, αιωρούμενων σωματιδίων και οξειδίων του θείου, είναι ασήμαντα μικρή, και το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης προς την κατεύθυνση για πιο αυστηρούς κανονισμούς για σταθερούς αεριοστρόβιλους, διατυπώθηκε για τα οξείδια του αζώτου.

Στις ΗΠΑ, η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA), έχει γνωστοποιήσει τα πρότυπα εκπομπών, τα οποία εξαρτώνται από την ενέργεια εισόδου του κινητήρα και τη σκοπούμενη χρήση (βοηθητική ή βιομηχανική). Βάσει αυτών διαμορφώνονται αρκετά τα παγκόσμια πρότυπα.

- Για βιομηχανικές μονάδες με απόδοση κάτω από 30 MW (40000 HP), το όριο οξειδίων του αζώτου είναι 150 μέρη ανά εκατομμύριο κατ' όγκο (ppmv).
- Δεν υπάρχει όριο οξειδίων του αζώτου για τις βιομηχανικές μονάδες με ιπποδύναμη άνω των 30 MW (40000 HP).
- Για τις βοηθητικές μονάδες χρησιμότητας με περισσότερους από 107 GJ/h κατανάλωση ενέργειας (που αντιστοιχεί σε έξοδο περίπου 10000 HP), το όριο οξειδίων του αζώτου είναι 75 ppmv
- Για κινητήρες με ενέργειες εισόδου μεταξύ 10,7 και 107 GJ/h (που αντιστοιχούν σε ιπποδύναμη εξόδου περίπου 1000 έως 10000 HP), το όριο οξειδίων του αζώτου είναι 150 ppmv.
- Για κινητήρες με τα επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας κάτω από 10,7 GJ/h (που αντιστοιχούν σε περίπου 1000 HP έξοδο), δεν υπάρχει απαίτηση για τα οξείδια του αζώτου.

Σημείωση: Τα παραπάνω όρια εκφράζονται σε μέρη ανά εκατομμύριο κατ' όγκο (ppmv), αναφερόμενο σε 15% οξυγόνο σε ξηρή βάση. Ο σκοπός τους είναι εν μέρει η άρση

της ασάφειας κατά τη σύγκριση διαφορετικών πειραματικών δεδομένων, αλλά και για να δείξουν ότι οι καυστήρες που καίνε λιγότερα καύσιμα, αναμένεται να παράγουν λιγότερα οξειδία του αζώτου.

Οι Ευρωπαϊκές ρυθμίσεις συμφωνούν σε γενικές γραμμές με τα πρότυπα της Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA), με τα όρια των οξειδίων του αζώτου να κυμαίνονται περίπου στα 75 ppmv. Στην Ιαπωνία νέες ρυθμίσεις για τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου εισήχθησαν το 2010. Για την περιοχή του Τόκιο, τα όρια εκπομπών οξειδίων του αζώτου είναι 28.6 ppmv για αεριοστροβίλους μεγαλύτερους των 2 MW, και 42,9 ppmv για μηχανές μικρότερες των 2 MW. Σε μερικά μέρη του κόσμου, κυρίως την νότια Καλιφόρνια και την Ιαπωνία, η αυξανόμενη ευαισθητοποίηση του κοινού για τη συμβολή των οξειδίων του αζώτου στην παραγωγή του νέφους έχει δημιουργήσει πιέσεις για αυστηρότερα πρότυπα για τα οξειδία του αζώτου, καθώς και ορισμένοι τοπικοί κανονισμοί καλούν τώρα για όρια οξειδίων του αζώτου στα 9 ppmv. Σε όλες τις χώρες, τα δημοσιευμένα πρότυπα θεωρείται ότι είναι οι ελάχιστες απαιτήσεις και υπάρχει συχνά η απαίτηση να χρησιμοποιηθεί η "Καλύτερη Διαθέσιμη Τεχνολογία Ελέγχου" (Best Available Control Technology-BACT) ή η "Χαμηλότερη Διαθέσιμη Τιμή Εκπομπών" (Lowest Available Emission Rate-LAER). Αυτό έχει οδηγήσει σε ανησυχίες, ότι αν μια νέα τεχνολογία έχει αναπτυχθεί η οποία βελτιώνει σημαντικά τη δυνατότητα για τη μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου, θέτει ουσιαστικά το πρότυπο εκπομπών που όλα οι επόμενες μηχανές πρέπει να πληρούν. Έτσι, αφού αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες για να ανταποκριθούν στα όλο και πιο αυστηρά όρια εκπομπών, θα γίνονται το πρότυπο με το οποίο ο επόμενος γύρος των εκπομπών θα καθοδηγείται.

Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1980 η Καλύτερη Διαθέσιμη Τεχνολογία Ελέγχου (BACT) για την επίτευξη των επιπέδων οξειδίων του αζώτου στα 25 ppmv, γίνονταν με νερό ή έγχυση ατμού στη ζώνη καύσης. Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται σήμερα για τη μείωση των συγκεντρώσεων οξειδίων του αζώτου κάτω από το 10 ppmv, είναι ένας συνδυασμός αραιωμένης ένεσης (νερού ή ατμού), ή πτωχή προμιγμένη καύση παροχετευόμενο από την εξάτμιση καθαρισμού αερίων, με χρήση Επιλεκτικής καταλυτικής μείωσης (Selective Catalytic Reduction- SCR). Αυτή η διαδικασία δεν είναι μόνο ακριβή, αλλά απαιτεί και την χρήση πρόσθετων συστημάτων ελέγχου. Επιπλέον, μπορεί να επιδεινώσει το συνολικό πρόβλημα της ρύπανσης με την απελευθέρωση αέριας αμμωνίας με αποτέλεσμα να αυξήσει τις συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Αυτό αντικατοπτρίζει τις δυσκολίες που εμπλέκονται στον καθορισμό των διάφορων τεχνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών τεχνικών που θα πρέπει να εκτιμηθούν.

Τα τυπικά όρια οξειδίων του άνθρακα κυμαίνονται από 10 έως 40 ppmv.

Η επίτευξη των χαμηλών επιπέδων μονοξειδίου του άνθρακα δεν έχει παρουσιάσει σοβαρές δυσκολίες κατά το παρελθόν, που οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην επιμονή του χρήστη για υψηλή απόδοση καύσης και ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμων. Ωστόσο, η συνεχής πίεση για μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου έχει οδηγήσει στην έγχυση άφθονης ποσότητας νερού ή ατμού στη ζώνη καύσης και, πιο πρόσφατα στην υιοθέτηση της πτωχής προαναμεμειγμένης καύσης. Η επιτυχία αυτών των τεχνικών βασίζεται

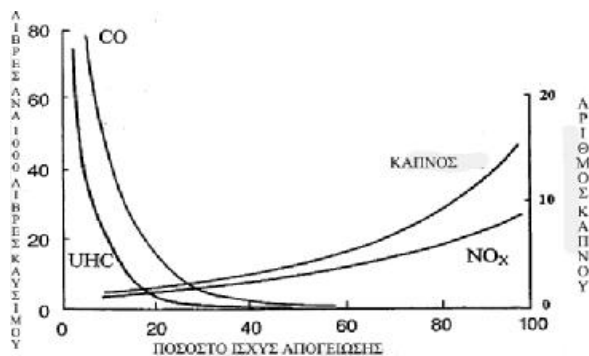
στην μείωση της θερμοκρασίας της φλόγας η οποία τείνει να προωθήσει τον σχηματισμό του μονοξειδίου του άνθρακα. Έτσι, ο έλεγχος των επιπέδων του μονοξειδίου του άνθρακα θέτει ένα πολύ πιο δύσκολο πρόβλημα από όταν οι κανονισμοί για τις εκπομπές για σταθερούς κινητήρες, διατυπώθηκαν για πρώτη φορά.

2-4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΡΥΠΩΝ

Τα επίπεδα συγκέντρωσης ρύπων στις εξατμίσεις των αεροστροβίλων μπορούν να συσχετιστούν άμεσα με την θερμοκρασία, τον χρόνο, και το ιστορικό συγκεντρώσεων κατά την διαδικασία καύσης. Αυτό ποικίλει από τον ένα καυστήρα στον άλλο, και για οποιονδήποτε καυστήρα που δίνεται, με αλλαγμένες τις συνθήκες λειτουργίας του. Η φύση σχηματισμού των ρύπων είναι τέτοια ώστε οι συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα και των άκαυστων υδρογονανθράκων να είναι υψηλότερες σε χαμηλής ισχύος συνθήκες και να ελαττώνονται με την αύξηση της ισχύος. Σε αντίθεση, τα οξείδια του αζώτου και του καπνού, είναι ασήμαντα σε ρυθμίσεις χαμηλής ισχύος και παίρνουν τις μέγιστες τιμές στις υψηλότερες καταστάσεις ισχύος. Αυτές οι χαρακτηριστικές τάσεις απεικονίζονται στο σχήμα 2-2.

ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Όταν μία ζώνη καύσης λειτουργεί με πλούσιο καύσιμο, μεγάλες ποσότητες μονοξειδίου του άνθρακα σχηματίζονται λόγω της έλλειψης επαρκούς οξυγόνου, για να ολοκληρωθεί η αντίδραση σε CO_2 . Εάν, ωστόσο η δύναμη του μείγματος στην ζώνη καύσης είναι στοιχειομετρική ή περιέχει σχετικά πτωχό καύσιμο, σημαντικές ποσότητες μονοξειδίου του άνθρακα θα είναι επίσης παρούσες, λόγω του διαχωρισμού του CO_2 . Στην πράξη, οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα βρίσκονται να είναι αρκετά υψηλότερες από ότι προβλεπόταν στους υπολογισμούς ισοζυγίου, και να είναι χαμηλότερες στις χαμηλής ισχύος καταστάσεις, όπου οι ταχύτητες καύσης και οι μέγιστες θερμοκρασίες είναι σχετικά χαμηλές. Αυτό έρχεται σε σύγκρουση με τις προβλέψεις της θεωρίας του ισοζυγίου, και αυτό δείχνει ότι ένα μεγάλο μέρος μονοξειδίου του άνθρακα προκύπτει από ατελή καύση του καυσίμου, που προκαλείται από ένα ή περισσότερα από τα ακόλουθα:

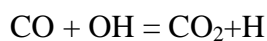


Εικόνα 2-2: χαρακτηριστικά εκπομπών μηχανών αεροστροβίλων

- Ανεπαρκείς ρυθμοί καύσης στην κύρια ζώνη, που οφείλεται στην αναλογία καυσίμου / αέρα που είναι πάρα πολύ χαμηλή και / ή στον ανεπαρκή χρόνο παραμονής.
- Ανεπαρκής ανάμειξη του καυσίμου και του αέρα, η οποία δημιουργεί ορισμένες περιοχές στις οποίες η δύναμη του μίγματος είναι πολύ αδύναμη για να υποστηρίξει την καύση, και άλλες περιοχές στις οποίες η πλούσια σε μίγμα καύση προκαλεί τοπικές υψηλές συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα .
- Καταστολή των προϊόντων της φλόγας, εγκλωβίζοντας τα στο τοίχωμα του αέρα ψύξης, στην κύρια ζώνη.

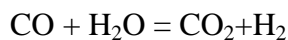
Κατ' αρχήν, θα πρέπει να είναι δυνατή η μείωση του μονοξειδίου του άνθρακα που σχηματίζεται στην αρχική καύση σε πολύ χαμηλά επίπεδα, με σταδιακή εισαγωγή πρόσθετου αέρα κατάντη, για την επίτευξη μιας σταδιακής μείωσης της θερμοκρασίας καύσης. Ωστόσο, αφού σχηματιστεί, το μονοξείδιο του άνθρακα είναι σχετικά ανθεκτικό στην οξείδωση, και η οξείδωση του σε πολλά συστήματα είναι καθοριστική όσον αφορά την επίτευξη της πλήρους καύσης.

Σε υψηλές θερμοκρασίες η κύρια αντίδραση που αφαιρεί το μονοξείδιο του άνθρακα είναι:



Αυτή είναι μια γρήγορη αντίδραση για ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών.

Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες η παρακάτω αντίδραση είναι σημαντική καθώς είναι ένα μέσο για την αφαίρεση του μονοξειδίου του άνθρακα:

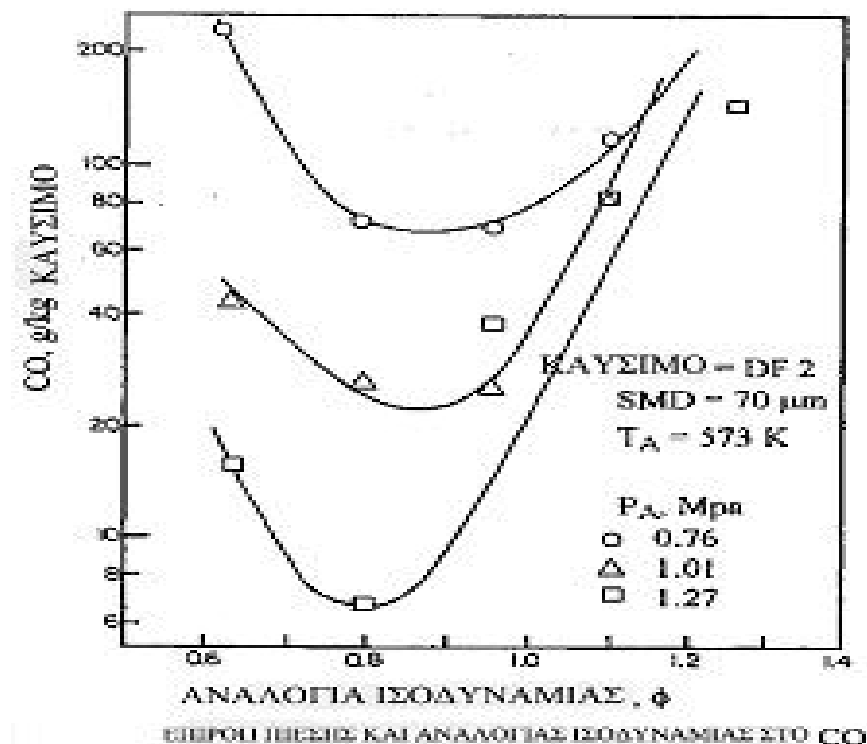


Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση καύσης και κατά συνέπεια και τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα, είναι η θερμοκρασία καυστήρα και κινητήρα στο στόμιο εισόδου, η πίεση καύσης, ο δείκτης ισοδυναμίας στην πρωτογενή ζώνη και, στα υγρά καύσιμα, το μέσο μέγεθος σταγόνας του σπρέι.

Επιρροή του λόγου ισοδυναμίας. Μερικά από τα αποτελέσματα που πρόεκυψαν από μελέτες για ένα ελαφρύ πετρέλαιο ντίτζελ (DF 2) παρουσιάζονται στο σχήμα 2-3 το οποίο δείχνει τη διακύμανση των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα με λόγο ισοδυναμίας για τρεις τιμές της πίεσης εισόδου του αέρα. Και οι τρεις καμπύλες παρουσιάζουν τα ίδια γενικά χαρακτηριστικά. Δείχνουν ότι οι αναστολές των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα, μειώνονται με την αύξηση του λόγου ισοδυναμίας, φθάνοντας στις ελάχιστες τιμές του λόγου ισοδυναμίας της τάξης του 0,8, πάνω από την οποία οποιαδήποτε περαιτέρω αύξηση του λόγου ισοδυναμίας προκαλεί αύξηση των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα. Αυτές οι τάσεις είναι τυπικές με αυτές που παρατηρούνται στους άλλους τύπους συστημάτων καύσης. Τα υψηλά επίπεδα του μονοξειδίου του άνθρακα στους χαμηλούς λόγους ισοδυναμίας οφείλονται στους αργούς ρυθμούς οξείδωσης, που σχετίζονται με τις χαμηλές θερμοκρασίες καύσης. Αύξηση του λόγου ισοδυναμίας αυξάνει τη θερμοκρασία της φλόγας, η οποία

επιταχύνει το ρυθμό της οξείδωσης, και έτσι μειώνονται οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα. Ωστόσο σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 1800K η παραγωγή μονοξειδίου του άνθρακα από την χημική διάσπαση του διοξειδίου του άνθρακα αρχίζει να γίνεται σημαντική. Έτσι σε ένα αρκετά στενό εύρος δείκτη τιμών γύρω στο 0.8 μπορούν να επιτευχθούν χαμηλά επίπεδα μονοξειδίου του αζώτου .

Επιρροή της πίεσης. Το Σχήμα 2-3 δείχνει επίσης την ευεργετική επίδραση της αύξησης της πίεσης καύσης, στην μείωση των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα (CO). Στις χαμηλές σχέσεις ισοδυναμίας, μια αύξηση της πίεσης, έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του μονοξειδίου του αζώτου (CO), με το να επιταχύνει το ρυθμό μετατροπής του μονοξειδίου του αζώτου, σε διοξείδιο του αζώτου. Στις υψηλές σχέσεις ισοδυναμίας, μια αύξηση στην πίεση καύσης μειώνει τις εκπομπές οξειδίου του άνθρακα (CO), με το να καταστέλλει την χημική διάσπαση.



Εικόνα 2-3: επίδραση της πίεσης και λόγος ισοδυναμίας στο CO

Επίδραση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντα αέρα. Αρκετοί ερευνητές εξέτασαν την επίδραση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντα αέρα στις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (CO) από έναν βιομηχανικό κινητήρα που τροφοδοτούταν με φυσικό αέριο. Μια ισχυρή επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα στο μονοξείδιο του άνθρακα (CO) παρατηρήθηκε. Οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (CO), για θερμοκρασία αέρα 287K ήταν 3 ή 4 φορές υψηλότερες από τις αντίστοιχες τιμές στους 298 K. Μια συσχέτιση αυτών των στοιχείων απέδωσε την παρακάτω έκφραση για τον υπολογισμό της επίδρασης της θερμοκρασίας του

περιβάλλοντα αέρα στο μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Θεωρείται ότι είναι έγκυρη για θερμοκρασίες άνω των 303K:

$$CO_T/CO_{288}=1-0.0634(T-288) \quad (2-4)$$

Όπου:

CO_T = οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα σε ppmv για 15% οξυγόνο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, T.

CO_{288} = οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα σε ppmv για 15% οξυγόνο στους 288 K.

Η συγκεκριμένη εξίσωση πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή, γιατί είναι πολύ πιθανό να ισχύει για συγκεκριμένους κινητήρες. Παρ' όλα αυτά, χρησιμεύει για να τονίσει την εξάρτηση των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα (CO), από την θερμοκρασία του περιβάλλοντα αέρα, και βοηθά στην εξήγηση μερικών ανωμαλιών που λαμβάνονται υπόψη μερικές φορές όταν αναλύουμε τις μετρήσεις μονοξειδίου του άνθρακα (CO), που πήραμε από επαναλαμβανόμενα τεστ κατά την διάρκεια μιας χρονικής περιόδου.

Επιρροή του αέρα ψύξης τοίχου. Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (CO), είναι το ποσό του αέρα ψύξης του τοιχώματος του φλογοθαλάμου που βρίσκεται στην κύρια ζώνη καύσης. Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), που σχηματίζεται στην πρωτοβάθμια καύση μπορεί να μεταφερθεί προς τα τοιχώματα του φλογοθαλάμου και να παρασυρθεί στον αέρα ψύξης του τοιχώματος. Η θερμοκρασία αυτού του αέρα είναι τόσο χαμηλή ώστε όλες οι χημικές αντιδράσεις να διακόπτονται. Όμως ο αέρας ψύξης φιλμ που προέρχεται από την κύρια ζώνη κανονικά περιέχει σημαντικές ποσότητες μονοξειδίου του άνθρακα (CO). Όμως αν το CO στη συνέχεια παρασυρθεί στο καυτό κεντρικό πυρήνα με επαρκή χρόνο για να αντιδράσει ολοκληρωτικά, θα εμφανιστεί στα καυσαέρια.

Επιρροή του ψεκασμού καυσίμου. Το κύριο αποτέλεσμα του μέσου μεγέθους της σταγόνας για τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (CO), προέρχεται από την ισχυρή επιρροή του για τον όγκο που απαιτείται για την εξάτμιση του καυσίμου. Σε χαμηλής ισχύος λειτουργίες, όπου αυτές οι εκπομπές φτάνουν στις υψηλότερες συγκεντρώσεις τους, μια σημαντική ποσότητα από τον συνολικό όγκο καύσης απασχολείται στην εξάτμιση του καυσίμου. Κατά συνέπεια, λιγότερος όγκος είναι διαθέσιμος για χημική αντίδραση.

Άκαυστοι υδρογονάνθρακες

Οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες, συμπεριλαμβάνουν το καύσιμο που αναδύεται από τον θάλαμο καύσης, με τη μορφή σταγόνων ή ατμού, καθώς και τα προϊόντα της θερμικής υποβάθμισης του αρχικού καυσίμου σε είδη χαμηλότερου μοριακού βάρους. Συνήθως σχετίζονται με τον κακό ψεκασμό, τα ανεπαρκή ποσοστά καύσης, τις επιπτώσεις του αέρα ψύξης, ή οποιοδήποτε συνδυασμό αυτών. Η κινητική αντίδραση στον σχηματισμό των άκαυστων υδρογονανθράκων είναι πιο περίπλοκη από αυτή στο σχηματισμό μονοξειδίου του

άνθρακα, αλλά είναι γενικά διαπιστωμένο ότι εκείνοι οι παράγοντες που επηρεάζουν τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (CO) επηρεάζουν, επίσης τις εκπομπές των άκαυστων υδρογονανθράκων και με τον ίδιο σχεδόν τρόπο.

Καπνός

Ο καπνός στην εξάτμιση προκαλείται από την παραγωγή πολύ λεπτών σωματιδίων αιθάλης στις πλούσιες σε καύσιμο περιοχές της φλόγας, στις οποίες, στους συμβατικούς θαλάμους καύσης, είναι πάντα κοντά στο ψεκασμό καυσίμου. Αυτές είναι οι περιοχές στις οποίες η ανακυκλοφορία των καμμένων προϊόντων, κινούνται ανάντη προς τα ψεκαζόμενα καύσιμα, και οι τοπικές τσέπες ατμών καυσίμου αναδύονται σε ανεπαρκή σε οξυγόνο αέρια σε υψηλή θερμοκρασία. Σε αυτές τις πλούσιες σε καύσιμο ζώνες, η αιθάλη μπορεί να παραχθεί σε σημαντικές ποσότητες. Το μεγαλύτερο μέρος της αιθάλης που παράγεται στην κύρια ζώνη καταναλώνεται στις υψηλής θερμοκρασίας περιοχές. Έτσι, από άποψη καπνού, ένας καυστήρας μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο ξεχωριστές ζώνες, την κύρια ζώνη, η οποία ρυθμίζει το ποσοστό σχηματισμού αιθάλης, την ενδιάμεση ζώνη (και, στους σύγχρονους κινητήρες υψηλής θερμοκρασίας, τη ζώνη αραιώσης επίσης), η οποία καθορίζει το ρυθμό της κατανάλωσης αιθάλης. Η συγκέντρωση αιθάλης που στην πραγματικότητα παρατηρείται στα αέρια της εξάτμισης είναι η διαφορά μεταξύ δύο μεγάλων αριθμών.

Η ανάλυση της αιθάλης που βρίσκεται στα αέρια της εξάτμισης δείχνει ότι αποτελείται κυρίως από μονοξείδιο του άνθρακα (96%) και από ένα μίγμα υδρογόνου, οξυγόνου και άλλων στοιχείων. Η αιθάλη δεν είναι ένα προϊόν ισορροπίας της καύσης, εκτός από τα δυνατά μίγματα, που είναι πολύ πλουσιότερα από εκείνα που απασχολούνται στην πρωτογενή ζώνη των αεριοστροβίλων. Έτσι, είναι πολύ πιθανόν να προβλέψεις τον ρυθμό σχηματισμού της και τελικής συγκέντρωσης της από τα κινητικά και θερμικά δεδομένα της. Στην πράξη ρυθμός σχηματισμού της αιθάλης τείνει να διέπεται περισσότερο από τις φυσικές διεργασίες του ψεκασμού και της μίξης αέρα-καυσίμου, παρά από τα κινητικά.

Επιρροή της πίεσης. Τα προβλήματα του καπνού και της αιθάλης είναι πάντα πιο σοβαρά στις υψηλές πιέσεις. Υπάρχουν πολλοί λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό, μερικοί παράγονται από τις χημικές επιδράσεις, ενώ άλλοι προέρχονται από φυσικούς παράγοντες που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά ψεκασμού και ως εκ τούτου, την κατανομή της δύναμης του μίγματος στις περιοχές σχηματισμού αιθάλης από την φλόγα. Για προαναμεμειγμένες φλόγες κηροζίνης/αέρα έχει διαπιστωθεί ότι δεν δημιουργείται αιθάλη σε πιέσεις κάτω των 0,6 MPa και σε σχέσεις ισοδυναμίας κάτω από 1.3.

Μια δυσμενής επίπτωση της αύξησης της πίεσης είναι να επεκταθούν τα όρια της ευφλεκτότητας, έτσι ώστε να παράγεται αιθάλη σε περιοχές που, σε χαμηλότερες πιέσεις, θα ήταν πολύ πλούσιες για να καούν. Η αυξημένη πίεση επίσης επιταχύνει τους ρυθμούς των χημικών αντιδράσεων, σαν αποτέλεσμα να αρχίζει η καύση νωρίτερα, και ένα μεγάλο ποσοστό του καυσίμου καίγεται στις πλούσιες σε καύσιμο περιοχές που γειτνιάζουν με τον

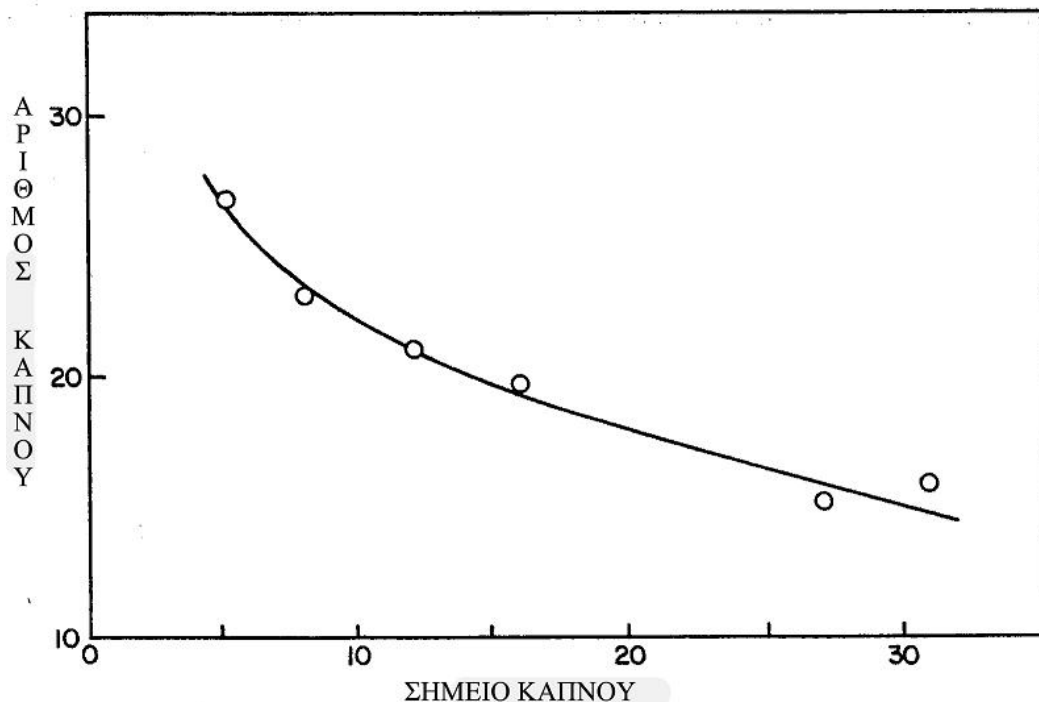
ψεκασμό. Στους ψεκαστήρες πίεσης, η μειωμένη διείδυση του ψεκασμού είναι μια από τις κύριες αιτίες δημιουργίας του καπνού σε υψηλές πιέσεις. Σε χαμηλές πιέσεις το καύσιμο διανέμεται σε ολόκληρη την ζώνη καύσης, αλλά σε υψηλές πιέσεις τείνει να συγκεντρωθεί στις περιοχές σχηματισμού αιθάλης κατάντη του ακουσίου καυσίμου. Μια άλλη αρνητική επίπτωση της αύξησης της πίεσης είναι η μείωση της γωνίας κώνου του ψεκασμού. Αυτό ενθαρρύνει τον σχηματισμό αιθάλης, εν μέρει με την αύξηση του μέσου μεγέθους ψεκασμού καυσίμου, αλλά κυρίως με την αύξηση της αντοχής του μίγματος στην ζώνη σχηματισμού αιθάλης. Το συνολικό αποτέλεσμα όλων αυτών των παραγόντων είναι ότι με τους ψεκαστήρες πίεσης, οι εκπομπές καπνού αυξάνονται απότομα με την πίεση.

Με τους ψεκαστήρες ριπής (έκρηξης), η επίδραση της πίεσης στα χαρακτηριστικά του ψεκασμού είναι λίγο πολύ αναμενόμενα. Πρόσφατες πειραματικές μελέτες έδειξαν ότι η γωνία κώνου του ψεκασμού και ο όγκος ψεκασμού είναι σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητα από την πίεση, με την προϋπόθεση ότι η αναλογία αέρα / καυσίμου διατηρείται σταθερή, το οποίο αντιστοιχεί στην κανονική λειτουργία κινητήρα που επικρατεί σε ρυθμίσεις ισχύος πάνω από το ρελαντί. Παρατηρήθηκε επίσης ότι οι αλλαγές στην πίεση έχουν πολύ μικρή επίδραση στο μέσο μέγεθος ψεκασμού. Έτσι, σε αντίθεση με τους ψεκαστήρες πίεσης χαρακτηριστικά ψεκασμού ενός ψεκαστήρα ριπής αεριοστροβίλου, διατηρούνται σε μεγάλο βαθμό ανεπηρέαστα από τις διακυμάνσεις στην πίεση του περιβάλλοντος αέρα. Αυτός είναι ο κύριος λόγος που οι θάλαμοι καύσης που είναι εξοπλισμένοι με ψεκαστήρες ριπής, παρουσιάζουν μόνο μικρές αυξήσεις στον σχηματισμό αιθάλης και καπνό με αύξηση της πίεσης καύσης.

Επιρροή του τύπου καυσίμων. Οι ιδιότητες του καυσίμου μπορεί να επηρεάσουν την παραγωγή καπνού με δύο τρόπους, πρώτον προκαλώντας τον σχηματισμό τοπικών πλούσιων σε καύσιμα περιοχών, και δεύτερον ασκώντας αντίσταση στον σχηματισμό άνθρακα. Ο πρώτος ελέγχεται από φυσικές ιδιότητες, όπως το ιξώδες και η μεταβλητότητα, οι οποίες επηρεάζουν το μέσο μέγεθος της πτώσης, τη διείδυση, και τον ρυθμό εξάτμισης του ψεκάσιμου καυσίμου, ενώ ο δεύτερος σχετίζεται με τη μοριακή δομή. Είναι αποδεδειγμένο ότι η τάση για δημιουργία καπνού αυξάνει με τη μείωση του περιεχομένου υδρογόνου και, στην πραγματικότητα, το περιεχόμενο υδρογόνο χρησιμοποιείται συνήθως στον συσχετισμό εφοδιασμού και δεδομένων του κινητήρα για δοκιμές για διάφορες παραμέτρους που σχετίζονται με την αιθάλη, όπως οι εκπομπές καπνού, η ακτινοβολία της φλόγας, και η θερμοκρασία επένδυσης τοίχου. Ωστόσο, έχει αποδειχτεί ότι ένας καλύτερος δείκτης της τάσης απόθεσης αιθάλης είναι η μέθοδος ASTM σημείου καπνού, το οποίο λαμβάνεται πειραματικά με την καύση του καυσίμου δοκιμής σε μια λάμπα με φυτίλι και αυξάνοντας το ύψος της φλόγας σταδιακά μέχρι να αρχίσει να καπνίζει. Το ύψος της φλόγας σε mm είναι το σημείο καπνού και όσο ψηλότερο είναι, τόσο μικρότερη είναι η τάση του καυσίμου για δημιουργία αιθάλης.

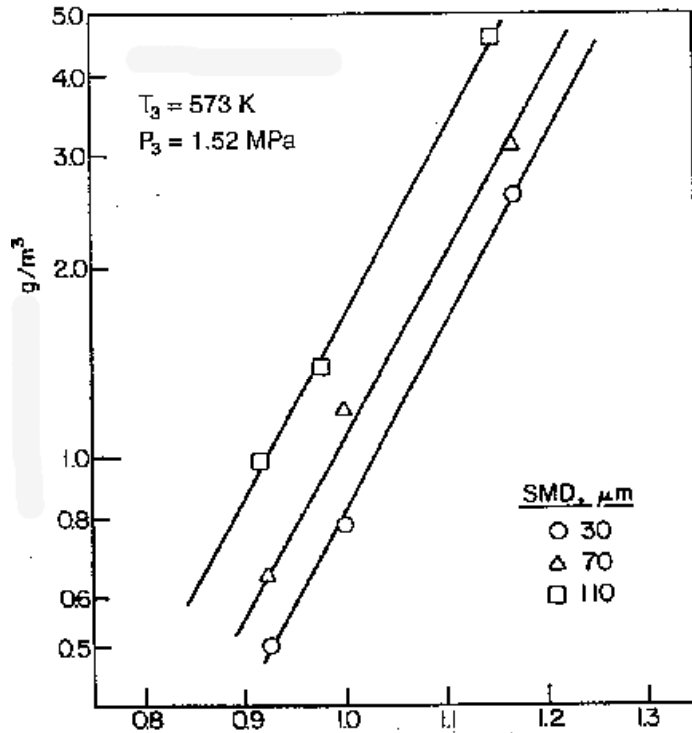
Η συσχέτιση φαίνεται στο σχήμα 2-4 και προέρχεται από την ανάλυση των μετρήσεων του αριθμού καπνού που πραγματοποιήθηκε στον Pratt & Whitney F100 καυστήρα. Τα γενικά υψηλής ποιότητας δεδομένα που λήφθηκαν από αυτόν και πολλούς άλλους καυστήρες αεροσκαφών οδήγησε στο συμπέρασμα ότι το σημείο καπνού είναι ανώτερο από την

περιεκτικότητα σε υδρογόνο, και είναι μια παράμετρος που σχετίζεται με τα φαινόμενα αιθάλης κατά την καύση.



2-4 ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ ΑΡΙΘΜΟΥ ΚΑΠΝΟΥ ΜΕ ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΠΝΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ F 100 ΚΑΥΣΤΗΡΑ

Επιρροή του ψεκασμού καυσίμου. Η επιρροή του μεγέθους της σταγόνας του καυσίμου στον σχηματισμό αιθάλης, έχει ερευνηθεί χρησιμοποιώντας τον σωληνοειδή καυστήρα που περιγράφεται παραπάνω, παροχετευόμενο με κηροζίνη. Τα αποτελέσματα τους για έναν καυστήρα με πίεση 1.52 MPa (15.5 atm) φαίνονται στο σχήμα 2-5. Το σχήμα αυτό μας δείχνει ότι βελτιώσεις στην ποιότητα του ψεκασμού αναστέλλουν τον σχηματισμό αιθάλης. Για παράδειγμα, στις υψηλότερες σχέσεις ισοδυναμίας, η μείωση του μεγέθους ρίψης ψεκασμού από 110 σε 30μm, μειώνει στο μισό την συγκέντρωση αιθάλης. Η σημασία της ποιότητας του ψεκασμού στον σχηματισμό αιθάλης και καπνού, πηγάζει από το γεγονός ότι, καθώς το ψεκασμένο καύσιμο πλησιάζει το μέτωπο της φλόγας, η θερμότητα που μεταδίδεται από την φλόγα αρχίζει να εξατμίζει τις σταγόνες. Τα μικρότερα σταγονίδια του ψεκασμού έχουν χρόνο για να εξατμιστούν εντελώς μπροστά από το μέτωπο της φλόγας, και προκύπτουν οι αναθυμιάσεις του καυσίμου που στη συνέχεια αναμειγνύονται με τον αέρα καύσης και καίγονται όπως η προμιγμένη φλόγα. Όμως, οι μεγάλες σταγόνες στο νέφος δεν έχουν χρόνο να εξατμιστούν πλήρως και αναμειγνύονται εντελώς με τον αέρα πριν αναλωθούν από τη φλόγα. Δηλαδή καίγονται με τρόπο των πλούσια σε καύσιμο φλογών διάχυσης. Γενικά, κάθε αύξηση στο μέσο μέγεθος της σταγόνας θα αυξήσει την αναλογία των μεγάλων σταγονών στο νέφος καυσίμου. Αυτό αντίθετα, θα αυξήσει την αναλογία του καυσίμου που καίγεται σε τύπου διάχυσης καύση που αντιτίθεται στην προαναμεμιγμένη καύση.



Σχήμα 2-5: Εκπομπές καπνού συναρτήσεις του λόγου ισοδυναμίας

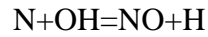
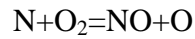
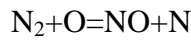
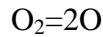
Σε γενικές γραμμές, η απαγωγή του καπνού μειώνεται με μέσο μέγεθος της σταγόνας, αλλά εάν βελτιωθεί ο ψεκασμός θα οδηγήσει σε μείωση της διείδυσης του σπρέι, όπως συμβαίνει με όλους τους τύπους ψεκαστήρων πίεσης, η παραγωγή καπνού μπορεί στην πραγματικότητα να αυξηθεί λόγω της τοπικής αύξησης της συγκέντρωσης των καυσίμων. Στην πραγματικότητα, η μείωση της διείδυσης σπρέι είναι μια από τις κύριες αιτίες του καπνού σε κινητήρες υψηλής αναλογίας πίεσης εφοδιασμένου με ψεκαστήρες με διπλό στόμιο.

Οξείδια του αζώτου

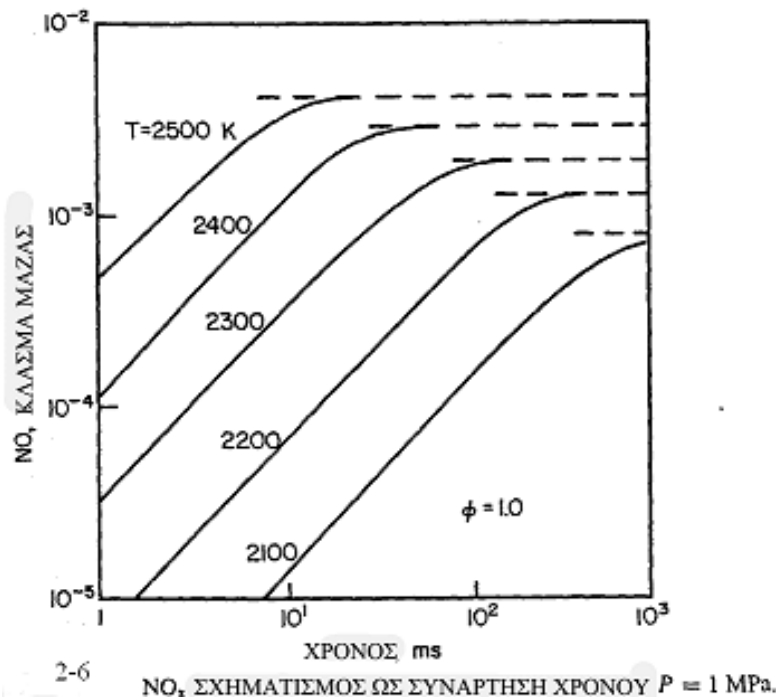
Το περισσότερο από τα μονοξείδιο το αζώτου (NO) που σχηματίζεται κατά την καύση οξειδώνεται στη συνέχεια σε NO₂. Για το λόγο αυτό είναι σύνηθες να αθροίζουμε το μονοξείδιο του αζώτου (NO) και τα οξείδια του αζώτου (NO₂), και να εκφράζουμε τα αποτελέσματα σε όρους οξειδίων του αζώτου (NO_x), παρά σε μονοξείδιο του αζώτου (NO). Μπορούν να παραχθούν με τέσσερις διαφορετικούς μηχανισμούς: Θερμικό μονοξείδιο του αζώτου, μηχανισμό υποξειδίου του αζώτου, άμεσο μονοξείδιο του αζώτου, και καύσιμο μονοξείδιο του αζώτου.

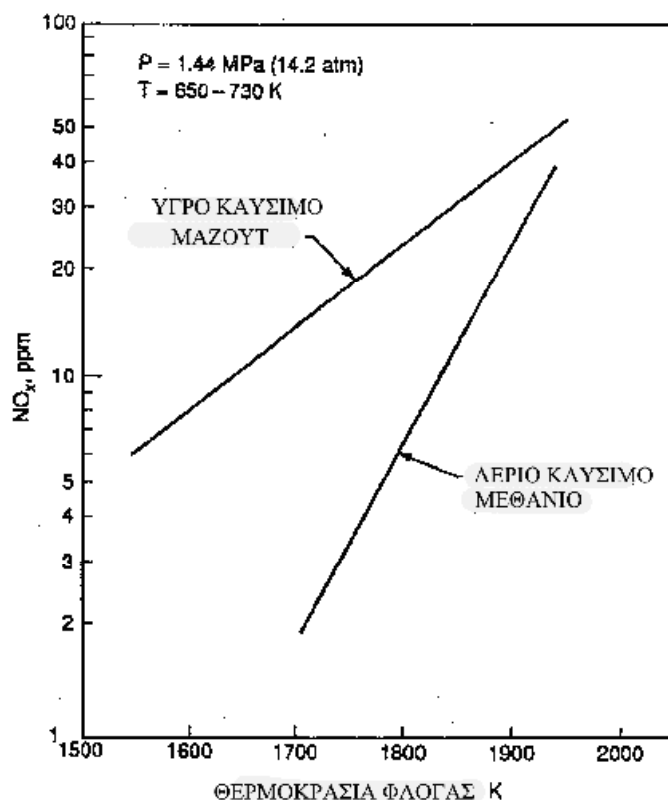
Θερμικό μονοξείδιο του αζώτου (NO). Παράγεται από την οξείδωση του ατμοσφαιρικού αζώτου σε περιοχές υψηλής θερμοκρασίας λόγω της φλόγας και στα αέρια μετά την φλόγα. Η διαδικασία είναι ενδόθερμη και προχωρά σε σημαντικό βαθμό μόνο σε θερμοκρασίες άνω και

γύρω στους 1850K. Τα περισσότερα από τα προτεινόμενα σχήματα αντίδρασης για θερμικό μονοξείδιο του αζώτου (NO) αξιοποιούν το διευρυμένο μηχανισμό Zeldovich:



Ο σχηματισμός μονοξειδίου του αζώτου (NO) βρίσκεται στο μέγιστο στην πλευρά του πτωχού καυσίμου της στοιχειομετρίας. Αυτό είναι συνέπεια του ανταγωνισμού μεταξύ των καυσίμων και του αζώτου για το διαθέσιμο οξυγόνο. Αν και η θερμοκρασία καύσης είναι υψηλότερη στην ελαφρώς πλούσια πλευρά της στοιχειομετρίας, το διαθέσιμο οξυγόνο στη συνέχεια καταναλώνονται κατά προτίμηση από το καύσιμο. Η εκθετική εξάρτηση του θερμικού μονοξειδίου του αζώτου (NO) με τη θερμοκρασία της φλόγας παρουσιάζεται στο σχήμα 2-6. Το σχήμα αυτό δείχνει ότι η παραγωγή μονοξειδίου του αζώτου μειώνεται πολύ γρήγορα, καθώς οι θερμοκρασίες μειώνονται, ιδιαίτερα σε κανονικές συνθήκες διαμονής καυστήρα περίπου 5ms.



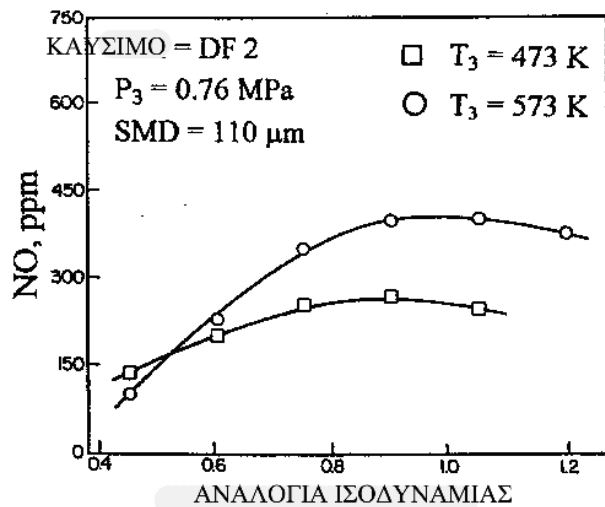


2-7 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΝΟΧΑΠΟ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΦΛΟΓΑΣ ΓΙΑ ΥΓΡΑ ΚΑΙ ΑΕΡΙΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

Το σχήμα 2-7 απεικονίζει την εκθετική εξάρτηση του μονοξειδίου του αζώτου με τη θερμοκρασία φλόγας και για τα αέρια και τα υγρά καύσιμα. Βασίζεται σε πειραματικά δεδομένα από μελέτες πάνω στην απόδοση καυστήρα, που επετεύχθη χρησιμοποιώντας ένα επαπτομενικής εισόδου ακροφύσιο πτωχής πρόμιξης καυσίμου. Στο σχήμα αυτό ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζεται στο ότι οι γνωστές διαφορές στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου μεταξύ υγρών και αέριων καυσίμων, μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας της φλόγας, και γίνονται όλο και πιο μικρές στα υψηλότερα επίπεδα της θερμοκρασίας. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι, επειδή όταν καίμε υγρά καύσιμα υπάρχει πάντα η πιθανότητα για σχεδόν στοιχειομετρική θερμοκρασία καύσης, και σαν συνέπεια τον σχηματισμό οξειδίων του αζώτου, σε τοπικές περιοχές που συνορεύουν με τις σταγόνες καυσίμου, αν και η μέση αναλογία σε όλη τη ζώνη καύσης μπορεί να είναι αισθητά μικρότερη από ό, τι η στοιχειομετρική. Με την αύξηση της αναλογίας ισοδυναμίας το μεγαλύτερο ποσοστό της θερμοκρασίας της φλόγας πλησιάζει πιο κοντά στην στοιχειομετρική τιμή, έτσι ώστε οι τοπικές συνθήκες γύρω από το μέγεθος της σταγόνας των καυσίμων να έχουν λιγότερη επίδραση στη συνολική διαδικασία καύσης και οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου ξεκινούν την προσέγγιση εκείνων που παράγονται από αέρια καύσιμα όταν καίγονται με την ίδια αναλογία ισοδυναμίας.

Επίδραση της θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής. Αφού οι εκπομπές μονοξειδίου του αζώτου είναι εξαρτώμενες από την θερμοκρασία φλόγας, μια αύξηση στην θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής αναμένεται να παράγει μια σημαντική αύξηση του μονοξειδίου του αζώτου, και αυτό επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο σχήμα 2-8. Το

σχήμα αυτό περιέχει δεδομένα από μια μέσου μεγέθους σταγόνας καυσίμου (SMD) της τάξεως των 110 μικρομέτρων, όμως παρόμοια αποτελέσματα λήφθηκαν όταν το SMD μειώθηκε στα 30 μικρόμετρα.



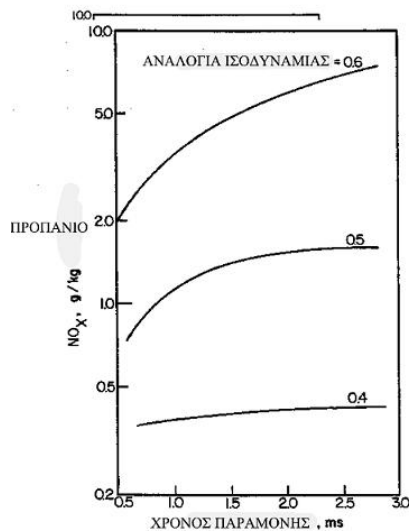
2-8

ΕΠΙΡΡΟΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΑΕΡΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΣΤΟΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ NOx

Επίδραση του χρόνου παραμονής. Ο χρόνος παραμονής στον καυστήρα μπορεί επίσης να επηρεάσει τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-9, το οποίο περιλαμβάνει αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τη χρήση ενός προαναμεμειγμένου-προεξατμισμένου καυστήρα που τροφοδοτούταν με προαναμεμειγμένο αέριο προπάνιο. Δείχνει ότι οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου αυξάνονται με μια αύξηση του χρόνου παραμονής, εκτός των πολύ πτωχών μιγμάτων ($\phi=0.4$), για τα οποία ο ρυθμός σχηματισμού είναι τόσο αργός που γίνεται αρκετά ευαίσθητος ως προς τον χρόνο.

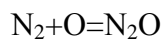
Τα βασικά σημεία σχετικά με το θερμικό μονοξείδιο του αζώτου μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Ο Θερμικός σχηματισμός του μονοξειδίου του αζώτου ελέγχεται σε μεγάλο βαθμό από την θερμοκρασία φλόγας.
- Λίγο NO σχηματίζεται σε θερμοκρασίες κάτω και γύρω στους 1850K .
- Για συνθήκες τυπικές σαν αυτές στους συμβατικής καύσης αεριοστρόβιλους (υψηλές θερμοκρασίες μόνο για μερικά ms), το μονοξείδιο του αζώτου αυξάνεται γραμμικά με τον χρόνο, αλλά δεν επιτυγχάνει την τιμή ισορροπίας του.
- Για πολύ πτωχές προαναμεμειγμένες καύσεις ($\phi < 0.5$), ο σχηματισμός μονοξειδίου του αζώτου είναι σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητος από τον χρόνο παραμονής.

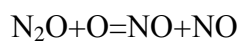


2-9 ΕΠΙΠΡΟΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ ΣΤΟ NOX ΣΕ ΕΝΑ ΠΡΟΑΝΑΜΕΜΙΓΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΕΡΑ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

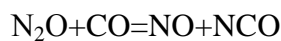
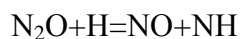
Μηχανισμός υποξειδίου του αζώτου. Αυτός ο μηχανισμός ξεκινά με την αντίδραση:



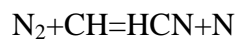
Και το υποξείδιο του αζώτου (N_2O) που σχηματίζεται στην συνέχεια οξειδώνεται σε μονοξείδιο του αζώτου κυρίως από την αντίδραση:



Αλλά επίσης και από τις αντιδράσεις:



Ταχύ (άμεσο) μονοξείδιο του αζώτου. Υπό ορισμένες συνθήκες, το μονοξείδιο του αζώτου βρίσκεται πρόωρα στην περιοχή φλόγας-γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με την ιδέα μιας κινητικά ελεγχόμενης διαδικασίας. Η αρχική αντίδραση είναι:



Η ισορροπία του μηχανισμού του άμεσου μονοξειδίου του αζώτου περιλαμβάνει την οξείδωση των μορίων του υδροκυανίου (HCN) και των ατόμων του αζώτου (N). Υπό συνθήκες πτωχής- πρόμιξης, το υδροκυάνιο (HCN) οξειδώνεται κυρίως σε μονοξείδιο του αζώτου (NO) με μια σειρά αντιδράσεων που περιλαμβάνουν $\text{HCN} \rightarrow \text{CN} \rightarrow \text{NCO} \rightarrow \text{NO}$. Το άτομο του αζώτου αντιδρά κυρίως με την δεύτερη αντίδραση του Zeldovich.

Η επίδραση της πίεσης έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και σημασία, επειδή το ταχύ μονοξείδιο του αζώτου μπορεί να έχει σημαντική συνεισφορά στις εκπομπές μονοξειδίου του αζώτου που παράγονται στη πτωχή προαναμεμειγμένη καύση. Κάποιες μελέτες έδειξαν ότι ταχύ μονοξείδιο του αζώτου σε φλόγες αέρα-αιθυλενίου σε ένα εύρος πίεσης από 1 έως 3 atm συμπέρανε ότι το ταχύ μονοξείδιο του αζώτου NO είναι ανάλογο με $P^{0.5}$. Άλλες μελέτες σε ένα μεγαλύτερο εύρος πιέσεων από 0,1 - 1,8 MPa έδειξε ότι το ταχύ μονοξείδιο του αζώτου (NO) ήταν ανεξάρτητο από την πίεση και επίσης συμπέραναν ότι τα οξειδία του αζώτου (NO_x) είναι ανεξάρτητα της πίεσης για λόγο ισοδυναμίας κάτω από 0.6.

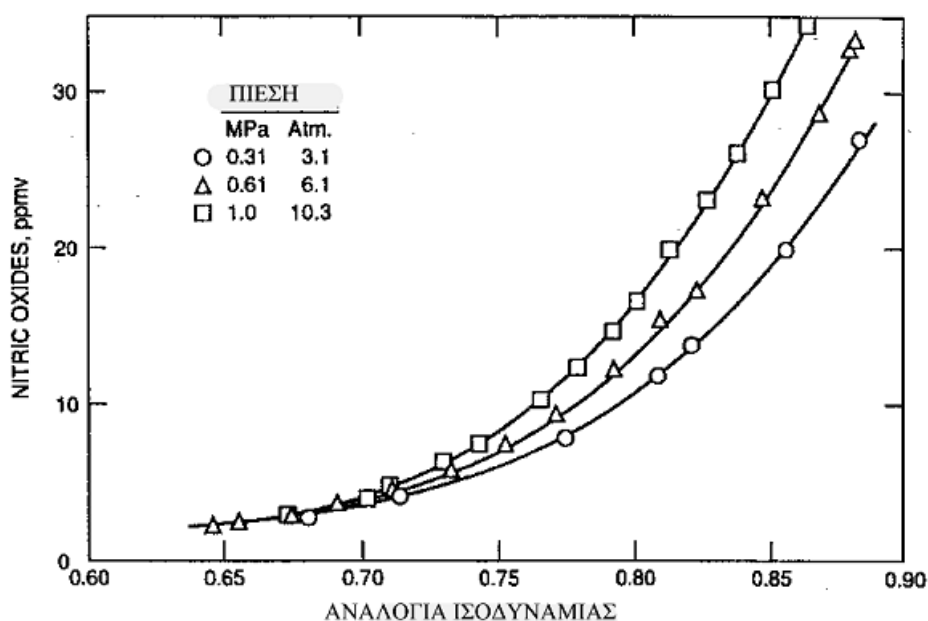
Καύσιμο μονοξείδιο του αζώτου (NO). Τα ελαφριά αποστάγματα καυσίμου περιέχουν λιγότερο από 0,06 % οργανικά συνδεδεμένου αζώτου (συνήθως γνωστό ως άζωτο δεσμευμένου καυσίμου), αλλά τα βαρέα προϊόντα απόσταξης μπορεί να περιέχουν μέχρι 1,8%. Κατά την διάρκεια της καύσης, ένα μέρος του αζώτου αντιδρά έτσι ώστε να σχηματιστεί το λεγόμενο “καύσιμο NO”. Το κλάσμα του αζώτου που υποβάλλεται σε αυτή την αλλαγή αυξάνει σιγά-σιγά με την αύξηση της θερμοκρασίας φλόγας. Όσον αφορά τα αέρια καύσιμα, τα φυσικά αέρια περιέχουν λίγο ή καθόλου καύσιμο δεσμευμένου αζώτου, όμως μερικό βρίσκεται σε συγκεκριμένες διαδικασίες και σε χαμηλού Btu αέρια. Ανάλογα με το βαθμό της μετατροπής του αζώτου, το καύσιμο μονοξείδιο του αζώτου (NO) μπορεί να αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό ποσοστό του συνόλου των εκπομπών μονοξειδίου του αζώτου (NO). Μελέτες εξέτασαν αναλυτικά την σχετική συμβολή των διαφόρων μηχανισμών που αναφέρθηκαν παραπάνω με τις συνολικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) που παράγονται από ένα πτωχό προαναμεμειγμένο καυστήρα που χρησιμοποιεί ως καύσιμο το μεθάνιο, για τον οποίο το καύσιμο μονοξείδιο του αζώτου είναι μηδέν. Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν τους ότι σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες γύρω στους 1900K, και λόγους ισοδυναμίας της τάξης του 0,8, οι συνεισφορές είναι περίπου 60 %, 10 % το υποξείδιο του αζώτου, και 30 % άμεση. Με μείωση της θερμοκρασίας και του λόγου ισοδυναμίας, οι συνεισφορές από το υποξείδιο του αζώτου και του άμεσου μονοξειδίου του αζώτου αυξάνονται σημαντικά μέχρι και σε θερμοκρασία 1500K και λόγου ισοδυναμίας γύρω στο 0,6, και οι σχετικές συνεισφορές προς τις συνολικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου γίνονται 5 %, 30 % υποξείδιο του αζώτου, και 65 % άμεση. Στις χαμηλότερες σχέσεις ισοδυναμίας ($\phi=0.5$ έως 0.6), η κύρια πηγή οξειδίων του αζώτου σχηματίζεται από τον μηχανισμό υποξειδίου του αζώτου. Αυτά τα αποτελέσματα παίζουν μεγάλο ρόλο στον σχεδιασμό εξαιρετικά χαμηλών σε οξειδία του αζώτου πτωχής πρόμιξης καυστήρων.

Επίδραση της πίεσης στο σχηματισμό οξειδίων του αζώτου

Οι επιδράσεις της πίεσης στον σχηματισμό οξειδίων του αζώτου έχουν ιδιαίτερη σημασία λόγω της συνεχής τάσης προς κινητήρες με υψηλότερη αναλογία πίεσης έτσι ώστε να ανταποκριθούν στην ανάγκη για χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου. Οι δοκιμές καυστήρων σε υψηλές πιέσεις είναι εξαιρετικά ακριβές και, ως εκ τούτου, είναι εξαιρετικά βολικό η διεξαγωγή δοκιμών καύσεων να γίνεται σε χαμηλά επίπεδα πίεσης και στη συνέχεια να προεκτείνουν τα αποτελέσματα που επιτεύχθηκαν σε υψηλά επίπεδα πίεσης, όπου οι

εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) παίρνουν τις υψηλότερες τιμές τους. Μια τέτοια αναγωγή θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με σιγουριά αν η σχέση μεταξύ των οξειδίων του αζώτου (NO_x) και της πίεσης ήταν γνωστή με ακρίβεια. Δυστυχώς, τα πειραματικά δεδομένα που λαμβάνονται από διαφορετικούς τύπους καυστήρα είναι αντικρουόμενα ως προς αυτό. Ποικίλουν από καμία επίδραση της πίεσης στα οξείδια του αζώτου (NO_x) έως αρκετά σημαντικές αυξήσεις των οξειδίων του αζώτου (NO_x) με την αύξηση της πίεσης.

Για συμβατικούς καυστήρες έχει γενικά βρεθεί ότι $NO_x \propto P^n$, όπου το n έχει τιμές που κυμαίνονται από 0.5 έως 0.8. Τα αποτελέσματα μελέτης από ένα καλής ανάμιξης καυστήρα τροφοδοτούμενο με φυσικό αέριο παρουσίασαν μια αύξηση του n με μια αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων. Για παράδειγμα, αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του καυστήρα από 1227K σε 1310K προκαλεί μια αύξηση του n από 0.38 σε 0.51. Αυτό το αποτέλεσμα είναι απόδειξη ότι τα χαμηλότερα επίπεδα οξειδίων του αζώτου προκύπτουν από το υποξείδιο του αζώτου και τους άμεσους μηχανισμούς, που κυριαρχούν σε χαμηλές θερμοκρασίες και τα οποία είναι ανεξάρτητα από την πίεση, ενώ τα υψηλότερα επίπεδα οξειδίων του αζώτου που συνδέονται με υψηλότερες θερμοκρασίες καύσης οφείλονται κυρίως στο θερμικό NO_x, το οποίο παρουσιάζει μια τετραγωνικής ρίζας εξάρτηση από την πίεση.



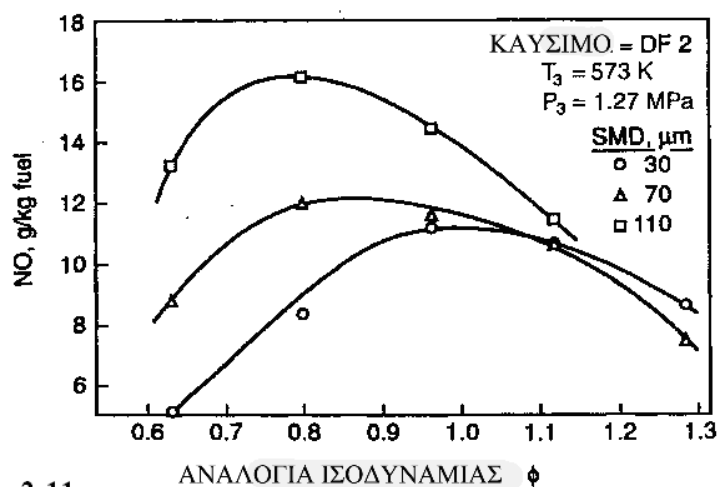
2-10 Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ NO_x

Ερευνητές μελέτησαν τυρβώδεις προαναμεμειγμένες φλόγες αερίου μεθανίου χρησιμοποιώντας μια ψυχόμενη διάτρητη πλάκα καυστήρα που λειτουργεί σε πιέσεις από 1 έως 10 atm, θερμοκρασίες αέρα εισόδου από 300 έως 615K, και λόγους ισοδυναμίας από 0.5 έως 0.9. Η μοντελοποίηση τους παρουσίασε έναν αντιδραστήρα ανάδευσης για τη σταθεροποίηση της φλόγας που ακολουθείται από έναν αντιδραστήρα στρωτής ροής και ένα κινητικό σύστημα το οποίο περιλάμβανε θερμικό και άμεσο μονοξείδιο του αζώτου. Τα αποτελέσματά τους επιβεβαίωσαν ότι οι χαμηλές θερμοκρασίες των πτωχών φλογών αποκλείουν σημαντικό σχηματισμό του μονοξειδίου του αζώτου (NO) από τον θερμικό

μηχανισμό. Σε θερμοκρασίες κάτω των 1800K ο άμεσος μηχανισμός εμφανίζεται να είναι ο κυρίαρχος. Οι επιπτώσεις αυτών των αποτελεσμάτων της επίδρασης της πίεσης στο σχηματισμό οξειδίων του αζώτου παρουσιάζεται καλά στο σχήμα 2-10 το οποίο τονίζει τα συμπεράσματα όσον αφορά την επίδραση της θερμοκρασίας της φλόγας στον εξαρτώμενο από την πίεση σχηματισμό οξειδίων του αζώτου. Αυτό το διάγραμμα δείχνει ότι τα οξείδια του αζώτου είναι ανεξάρτητα από την πίεση στις πτωχές προαναμεμειγμένες φλόγες. Αύξηση της θερμοκρασίας φλόγας, αντιστοιχεί σε μια αύξηση του λόγου ισοδυναμίας, προκαλεί την αύξηση του εκθέτη πίεσης να αυξάνεται έως στην εγγύς στοιχειομετρική περιοχή, έχει φτάσει στην τιμή του 0,5, που αντιστοιχεί σε σχηματισμό μονοξειδίου του αζώτου από το θερμικό μηχανισμό.

Επιρροή του ψεκασμού καυσίμου στο σχηματισμό οξειδίων του αζώτου (NOx)

Τον τρόπο και σε ποιο βαθμό τα οξείδια του αζώτου επηρεάζονται από το μέγεθος των σταγονιδίων του καυσίμου στον ψεκασμό εξαρτάται πολύ από την σχέση ισοδυναμίας. Η πτυχή αυτή εξετάστηκε σε πειραματικές μελέτες χρησιμοποιώντας καυστήρα συνεχή ροή στον οποίο ο μέσος όρος μεγέθους σταγόνας καυσίμου θα μπορούσε να ρυθμίζεται και να ελέγχεται ανεξάρτητα από άλλες μεταβλητές λειτουργίας.



2-11

ΕΠΙΡΡΟΗ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ NO

Τα δεδομένα που παρουσιάζονται στο σχήμα 2-11 δείχνουν ότι οι εκπομπές μονοξειδίου του αζώτου αυξάνονται με μία αύξηση στο μέσο όρο μεγέθους σταγόνων ψεκασμού, ειδικά σε χαμηλές σχέσεις ισοδυναμίας. Με την πρώτη ματιά αυτό μπορεί να προκαλεί έκπληξη, επειδή, στις αρκετά υψηλές πιέσεις που απασχολούμαστε σε αυτή τη εργασία, οι ρυθμοί εξάτμισης είναι τόσο γρήγοροι που ακόμα και για τις μεγαλύτερες πτώσεις ο χρόνος που απαιτείται για την εξάτμιση τους είναι μικρός σε σύγκριση με τον συνολικό χρόνο παραμονής της καύσης ζώνης. Ωστόσο, μία αύξηση στο SMD σημαίνει ότι ένα μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού αριθμού των σταγόνων καυσίμου του ψεκασμού μπορεί να υποστηρίξει φλόγες τύπου φακέλου (envelope). Αυτές οι φλόγες, οι οποίες περιβάλλουν

τις μεγαλύτερες σταγόνες, καίγονται σε λειτουργία διάχυσης σε μία περιοχή κοντά στην στοιχειομετρική αναλογία καυσίμου/αέρα, δίνοντας αφορμή σε πολλές τοπικές περιοχές με υψηλές θερμοκρασίες στις οποίες οξειδία του αζώτου (NO_x) σχηματίζονται σε σημαντικές ποσότητες. Μείωση στο μέσο μέγεθος σταγόνας εμποδίζει το σχηματισμό αυτών των φλογών, έτσι ώστε ένα μεγαλύτερο μέρος της συνολικής διαδικασίας καύσης συμβαίνει σε ό,τι είναι στην ουσία μία προπαρασκευασμένη λειτουργία, δημιουργώντας έτσι λιγότερα οξειδία του αζώτου. Οι φλόγες αυτές είναι απίθανο να συμβούν σε ζώνες καύσης που παρέχονται με ελαφριά αποστάγματα καυσίμου, αλλά, ακόμη κι αν καμία δεν είναι παρούσα, με την αύξηση του μέσου μεγέθους σταγόνας μεγαλύτερο ποσοστό του καυσίμου καίγεται στις πλούσιες σε καύσιμα περιοχές που δημιουργήθηκαν στο ξεκίνημα των κινούμενων σταγόνων. Αν και στην θεωρία η καύση μέσα σε αυτές τις εντοπισμένες περιοχές μπορεί να πραγματοποιηθεί σε οποιαδήποτε σχέση ισοδυναμίας εντός των ορίων αναφλεξιμότητας, τείνει να εμφανιστεί κατά προτίμηση στη στοιχειομετρική τιμή, δηλαδή, στη μέγιστη θερμοκρασία, με αποτέλεσμα να παράγονται υψηλά επίπεδα οξειδίων του αζώτου. Η υπόθεση αυτή χρησιμεύει για να εξηγηθεί γιατί αυξάνονται οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου με το SMD για πτωχά μίγματα. Ωστόσο, καθώς η συνολική σχέση ισοδυναμίας αυξάνει προς την μονάδα, ο τοπικός λόγος καυσίμου/αέρα που γεινιάζει με τις σταγόνες καυσίμου προσεγγίζει την τιμή πρόμιξης. Σύμφωνα με αυτήν την υπόθεση το μέσο μέγεθος της σταγόνας ψεκασμού δεν θα έπρεπε να έχει καμία επίδραση στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου για στοιχειομετρικά μίγματα, και αυτό επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα του διαγράμματος 2-11. Το διάγραμμα αυτό είναι σημαντικό επειδή δείχνει ότι ακόμη και σε χαμηλές σχέσεις ισοδυναμίας, όπου η μέση θερμοκρασία καύσης είναι τόσο χαμηλή που μόνο αμελητέες ποσότητες μονοξειδίου του αζώτου (NO) πρέπει, θεωρητικά, να δημιουργηθούν, η παρουσία των σταγόνων καυσίμου στη ζώνη καύσης δημιουργεί συνθήκες στις οποίες η καύση μπορεί και προχωρεί σε κοντά σε στοιχειομετρικές σχέσεις ισοδυναμίας, ανεξάρτητα από το μέσο όρο της σχέσης ισοδυναμίας στη ζώνη καύσης. Αυτό, φυσικά, είναι το σκεπτικό για τα διάφορα είδη καυστήρων πτωχών, πρόμιξης, προ-εξάτμισης, των οποίων η επιτυχία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό για την κατάργηση του συνόλου των σταγόνων των καυσίμων από τη ζώνη καύσης.

2-5 Μείωση των ρύπων στους συμβατικούς καυστήρες

Αν και μπορεί εύλογα να υποστηριχθεί ότι οι συμβατικοί καυστήρες δεν ενέχουν πλέον καμία πραγματική τεχνική πρόκληση, το κάνουν, ωστόσο, αποτελούν τη μεγάλη πλειοψηφία των καυστήρων τώρα στην αγορά. Επιπλέον, οι περισσότερες από τις γνώσεις μας από τους βασικούς παράγοντες που διέπουν τον σχηματισμό των ρύπων σε συστήματα καύσης συνεχούς ροής, η οποία εφαρμόζεται τώρα στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη των χαμηλών σε οξειδία του αζώτου καυστήρων, αποκτήθηκε από την εμπειρία που κερδίσαμε από αυτό που καλούμαι τώρα "συμβατικοί" καυστήρες.

Στην προηγούμενη ενότητα η προσοχή εστιάστηκε στους διάφορους μηχανισμούς και τις διαδικασίες που εμπλέκονται στο σχηματισμό των εκπομπών ρύπων. Ίδιο ενδιαφέρον και

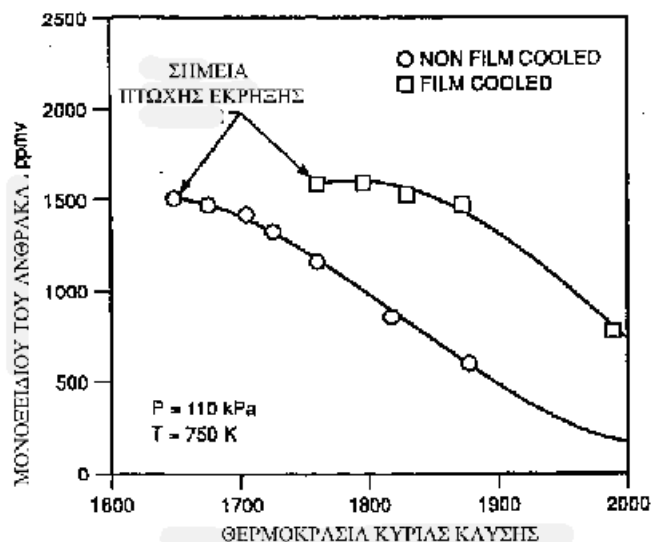
σημασία έχει η εφαρμογή αυτής της γνώσης στα προβλήματα της ελάφρυνσης των εκπομπών ρύπων στα πρακτικά συστήματα καύσης.

Οι κύριοι παράγοντες που ρυθμίζουν τις εκπομπές από τους συμβατικούς καυστήρες μπορούν να θεωρηθούν:

- Θερμοκρασία κύριας ζώνης και σχέση ισοδυναμίας.
- Βαθμός ομοιογένειας της διαδικασίας καύσης της πρωτοβάθμιας ζώνης.
- Χρόνος παραμονής στην κύρια ζώνη.
- Χαρακτηριστικά σβέσης τοιχώματος φλογοθαλάμου.
- Χαρακτηριστικά ψεκασμού καυσίμου (για υγρά καύσιμα)

Στην αναθεώρηση των πρακτικών μεθόδων σχεδιασμού για μείωση των ρύπων, μια βολική προσέγγιση είναι να εξετασθεί κάθε επιμέρους είδος ρύπου με τη σειρά του. Θα καταστεί σαφές, ωστόσο, ότι με τους συμβατικούς καυστήρες ένας μεγάλος συμβιβασμός εμπλέκεται στο σχεδιασμό, όχι μόνο ανάμεσα στο ένα είδος και το άλλο, αλλά επίσης και μεταξύ των πολλών άλλων απαιτήσεων στην επίδοση, όπως το πτωχό όριο έκρηξης και τον παράγοντα πρότυπο (pattern factor) .

- Μονοξείδιο του άνθρακα και άκαυστοι υδρογονάνθρακες



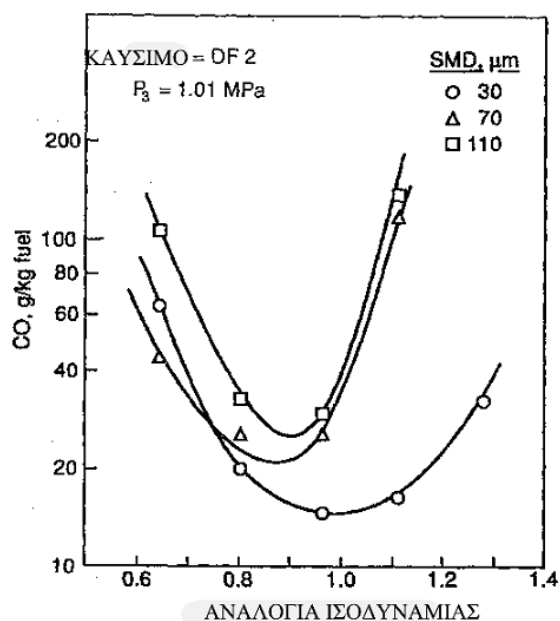
2-12 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΤΗΣ ΕΞΑΛΕΙΨΗΣ ΤΗΣ ΨΥΞΗΣ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΤΟΥ ΦΛΑΜ

Η παρουσία των ειδών αυτών στα καυσαέρια είναι μια εκδήλωση της ατελούς καύσης. Έτσι, όλες οι προσεγγίσεις για την μείωση του μονοξειδίου του άνθρακα και των άκαυστων υδρογονανθράκων βασίζεται σε μια κοινή φιλοσοφία η οποία είναι η αύξηση του επιπέδου της αποδοτικότητας καύσης. Μια αποτελεσματική μέθοδος για την επίτευξη αυτού

είναι με την ανακατανομή της ροής του αέρα να φέρουμε την ισοδυναμία αναλογίας της κύριας ζώνης πιο κοντά στην ιδανική τιμή του περίπου 0,8. Ένα υψηλότερο ποσοστό ισοδυναμίας (μέχρι περίπου 1.05) θα αύξανε την ταχύτητα καύσης περαιτέρω, αλλά δεν θα απέφερε μείωση των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα και άκαυστων υδρογονανθράκων λόγω της έλλειψης του οξυγόνου που τα εν λόγω είδη χρειάζονται για να μετατραπούν σε διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και νερό (H_2O). Η καλή ανάμειξη καύσιμου και αέρα στην κύρια ζώνη είναι επίσης απαραίτητη για χαμηλό μονοξείδιο του άνθρακα και άκαυστων υδρογονανθράκων. Ακόμα και όταν λειτουργεί με τη βέλτιστη σχέση ισοδυναμίας, η φτωχή ανάμειξη μπορεί να παράγει τοπικές περιοχές στις οποίες η δύναμη του μίγματος να είναι είτε πάρα πολύ φτωχή σε καύσιμο για να παράγει επαρκή ποσοστά καύσης ή τόσο πλούσια σε καύσιμο που δεν υπάρχει επαρκής O_2 για να μετατρέψει όλο το μονοξείδιο του άνθρακα που παράγεται σε διοξείδιο του άνθρακα.

Άλλα αποτελεσματικά μέσα για την μείωση του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και των άκαυστων υδρογονανθράκων (UHC) είναι η χρησιμοποίηση λιγότερου αέρα ψύξης του φλογοθαλάμου ειδικά στην κύρια ζώνη. Το διάγραμμα 2-12 δείχνει την επίδραση της αντικατάστασης ενός τοιχώματος ψύξης φίλμ με ένα τοίχωμα χωρίς ψύξη φίλμ στην κύρια ζώνη μιας βιομηχανικής Rolls Royce RB211 με καυστήρα χαμηλών εκπομπών όταν αυτή λειτουργεί σε ατμοσφαιρική πίεση. Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) μειώνεται σημαντικά (στους 1850K από 1500 σε 700 ppm) ενώ η πτωχή θερμοκρασία έκρηξης έχει χαμηλώσει κατά 110K. Σαφώς, η ανάπτυξη νέων υλικών και μεθόδων κατασκευής του τοιχώματος του φλογοθαλάμου, το οποίο επιτρέπει στο φλογοθάλαμο να λειτουργεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες μετάλλου, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη νέων μεθόδων ψύξης τοιχωμάτων που απαιτούν πολύ λιγότερη ψύξη του αέρα, όπως η έγχυση και η διάδοση της ψύξης, μπορεί να έχει μια πολύ άμεση και σημαντική συμβολή στην μείωση των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και άκαυστων υδρογονανθράκων(UHC). Συνοψίζοντας, οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και άκαυστων υδρογονανθράκων (UHC) μειώνονται από τα παρακάτω:

- Ανακατανομή της ροής αέρα για να φέρει την ισοδυναμία αναλογίας της κύριας ζώνης πιο κοντά στην ιδανική τιμή του 0,8.
- Αύξηση του όγκου της κύριας ζώνης και/ή το χρόνο παραμονής
- Μείωση του αέρα ψύξης του τοιχώματος του φλογοθαλάμου ειδικά στην κύρια ζώνη.
- Βελτίωση ψεκασμού του καυσίμου.



2-13 ΕΠΙΡΡΟΗ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO

Το διάγραμμα 2-13 παρουσιάζει τις μειώσεις μονοξειδίου του άνθρακα (CO) που θα προκύψουν από βελτιώσεις στην ποιότητα του ψεκασμού, ενώ το διάγραμμα 2-14 δείχνει ότι οι εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων (UHC) είναι επίσης μειωμένες σημαντικά λόγω των μειώσεων στο μέσο μέγεθος σταγόνας. Μόνο σε χαμηλές σχέσεις ισοδυναμίας, όπου οι ρυθμοί καύσης τείνουν να είναι περιορισμένοι περισσότερο από τους ρυθμούς της χημικής αντίδρασης παρά από τα ποσοστά εξάτμισης, είναι η επίδραση του μέσου μεγέθους της πτώσης των καυσίμων στις εκπομπές λιγότερο έντονη.

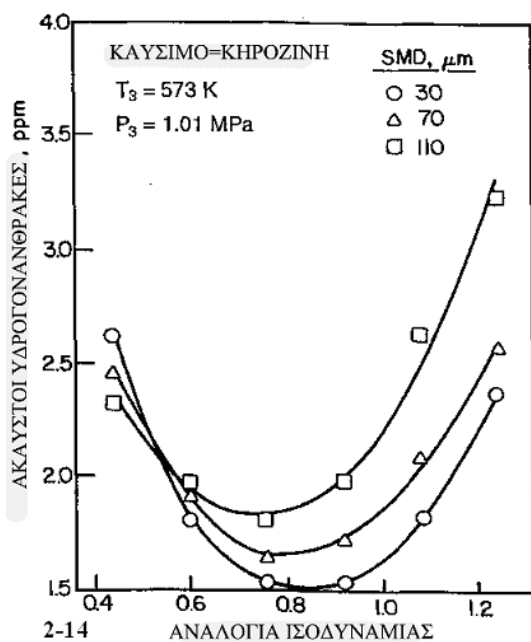
- Καπνός

Οι κύριοι παράγοντες που διέπουν τις εκπομπές καπνού είναι η θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής του καυστήρα, η πίεση και τα χαρακτηριστικά ψεκασμού του καυσίμου. Η επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα εισαγωγής είναι πολύπλοκη, επειδή μια αύξηση σε αυτήν την παράμετρο εξυπηρετεί στην επιτάχυνση τόσο στη διαδικασία σχηματισμού της αιθάλης όσο και στην εξουθένωση της; το καθαρό αποτέλεσμα είναι συνήθως μια μείωση στον καπνό. Τα προβλήματα καπνού είναι πιο σοβαρά σε υψηλές πιέσεις. Υπάρχουν πολλοί λόγοι για αυτό, οι περισσότεροι από τους οποίους προέρχονται από χημικές επιδράσεις όπως αναλύθηκε ανωτέρω. Με τα υγρά καύσιμα, υπάρχουν επιπλέον φυσικοί παράγοντες που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά ψεκασμού και ως εκ τούτου, επίσης, την κατανομή της δύναμης του μίγματος στις σχηματιζόμενες περιοχές αιθάλης της φλόγας.

Στην πράξη, η εξάλειψη του καπνού των καυσαερίων είναι βασικά θέμα πρόληψης της εμφάνισης των πλούσιων σε καύσιμα θυλάκια στη φλόγα. Η έγχυση περισσότερου αέρα στην κύρια ζώνη είναι πάντα ευεργετική, ιδιαίτερα αν συνοδεύεται από περισσότερη ομογενοποίηση του μίγματος. Δυστυχώς, αυτή η προσέγγιση είναι κάπως περιορισμένη σε

πεδίο εφαρμογής, λόγω των δυσμενών συνεπειών της αύξησης του αέρα στην ανάφλεξη στην πρωτογενή ζώνη και τα όρια της σταθερότητα για τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και άκαυστων υδρογονανθράκων (UHC) στο ρελαντί.

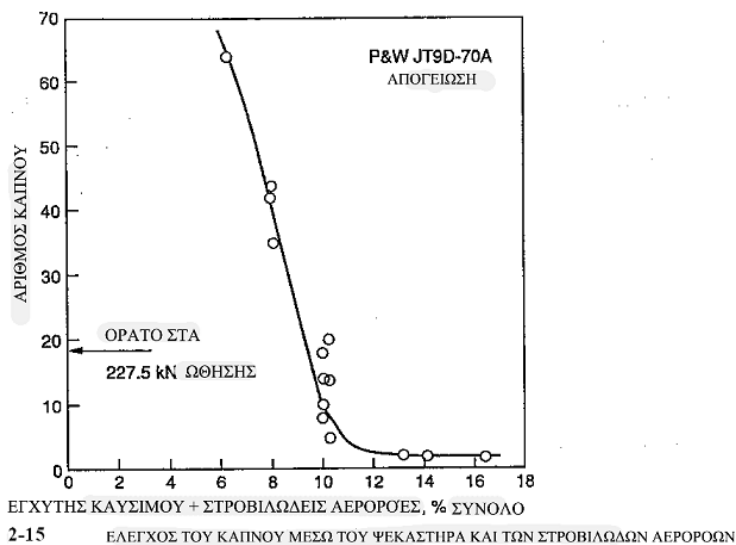
Ο σχεδιασμός του εγχύτη καυσίμου και, ειδικότερα, ο βαθμός πρόσμιξης των καυσίμων και του αέρα πριν από την καύση, έχουν μια πολύ μεγάλη επιρροή στο αν ο δεδομένος καυστήρας παράγει σημαντικές ποσότητες καπνού. Οι σχετικά χαμηλές εκπομπές καπνού από τα συστήματα ψεκασμού που χρησιμοποιούνται σε ορισμένες μηχανές Rolls Royce δεν οφείλεται στην προεξάτμιση (pre-*evaporation*) των καυσίμων, αλλά από την προανάμιξη των καυσίμων και του αέρα η οποία εκδηλώνεται εντός των σωλήνων ψεκασμού.



Η άμβλυνση του σχηματισμού αιθάλης και καπνού αναμειγνύοντας αέρα και καύσιμο είναι πλήρως αποτελεσματική μόνο εάν χρησιμοποιείται επαρκής αέρας. Αυτό παρουσιάζεται καλά στο διάγραμμα 2-15, το οποίο δείχνει πως ο καπνός μειώθηκε δραστικά σε έναν P&W JT9D-70 καυστήρα που λειτουργεί σε συνθήκες απογείωσης με την προσθήκη περισσότερου αέρα μέσω της έγχυσης καυσίμου και στροβιλιζόμενου αέρα. Η έγχυση αέρα μέσω αυτών των συστημάτων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στη μείωση του καπνού γιατί όλος ο αέρας ρέει απευθείας στην ζώνη σχηματισμού αιθάλης.

Τα πλεονεκτήματα των ψεκαστήρων *airblast* (έκρηξης-ριπής) από τους διπλού στομίου πίεσης ψεκαστήρες σε σχέση με τις εκπομπές καπνού είναι καλά εδραιωμένα. Δεν είναι απλώς ένα ζήτημα καλύτερου ψεκασμού, αν και αυτό είναι πολύ σημαντικό σε υψηλές πιέσεις καύσης, όπου τα επίπεδα καπνού παίρνουν τις υψηλότερες τιμές τους, αλλά επειδή η διαδικασία ψεκασμού *airblast* εγγυάται ουσιαστικά καλή ανάμιξη του αέρα και των

σταγόνων καυσίμου πριν από την καύση. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα του airblast ψεκαστήρα είναι ότι η ποιότητα ψεκασμού είναι υψηλή σε όλο το εύρος λειτουργίας από την κατάσταση αδράνειας έως την πλήρη ισχύ. Το ίδιο ισχύει και για την μέριμνα για την πλοήγηση της airblast έγχυσης, επειδή δεν υπάρχει φυσική παρεμβολή μεταξύ του χειριστή και του κυρίως σπρέι. Με τα ακροφύσια διπλού στομίου, λόγω της αλληλεπίδρασης του χειριστή και του κυρίως σπρέι, υπάρχει πάντα μια σειρά ροών καυσίμου, ξεκινώντας από το σημείο όπου το κυρίως καύσιμο εισάγεται για πρώτη φορά, επί της οποίας η ποιότητα ψεκασμού είναι κακή και οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και άκαυστων υδρογονανθράκων(UHC) είναι αναπόφευκτα υψηλές.



- Οξειδία του αζώτου

Σε οποιαδήποτε προσπάθεια για τη μείωση των οξειδίων του αζώτου (NO_x), ο κύριος στόχος πρέπει να είναι η ελάττωση της θερμοκρασίας της αντίδρασης. Ο δεύτερος στόχος πρέπει να είναι η εξάλειψη των "hot spots" (θερμών σημείων) από τη ζώνη αντίδρασης, καθώς υπάρχει ένα μικρό σημείο για την επίτευξη μιας ικανοποιητικά χαμηλής μέσης θερμοκρασίας, εάν η ζώνη αντίδρασης περιέχει τοπικές περιοχές με υψηλή θερμοκρασία στην οποία το ποσοστό του σχηματισμού οξειδίων του αζώτου (NO_x) παραμένει σε υψηλά επίπεδα. Τέλος, ο διαθέσιμος χρόνος για το σχηματισμό των οξειδίων του αζώτου (NO_x) θα πρέπει να περιοριστεί στο ελάχιστο.

Πρακτικές προσεγγίσεις για την ελάττωση των οξειδίων του αζώτου στους συμβατικούς καυστήρες που περιλαμβάνουν την προσθήκη περισσότερου αέρα στην κύρια ζώνη καύσης για να μειώσει τη θερμοκρασία της φλόγας, βελτίωση του ψεκασμού (βλ. σχήμα. 2-11), αύξηση της πτώσης πίεσης για παροχή καλύτερης ανάμειξη και κατά συνέπεια την εξάλειψη των "hot spots" από τη ζώνη καύσης, και μείωση του χρόνου παραμονής καύσης. Δυστυχώς, η μείωση της θερμοκρασίας φλόγας και του χρόνου παραμονής οδηγεί σε αύξηση της παραγωγής του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και των άκαυστων υδρογονανθράκων(UHC).

Στην πραγματικότητα, σαν γενίκευση, μπορούμε να πούμε ότι οποιαδήποτε τροποποίηση των συνθηκών λειτουργίας της διαμόρφωσης του καυστήρα που μειώνει τα οξειδία του αζώτου τείνει επίσης να επιδεινώσει τα προβλήματα μονοξειδίου του άνθρακα και άκαυστων υδρογονανθράκων, και το αντίστροφο.

Ψεκασμός νερού. Εφόσον ο σχηματισμός είναι εκθετικά εξαρτώμενος από τη θερμοκρασία, ένας προφανής τρόπος για τη μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου είναι η μείωση της θερμοκρασίας της ζώνης καύσης. Πρόσθετος αέρας είναι αποτελεσματικός, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο με φειδώ, γιατί αυξάνει την ταχύτητα της κύριας ζώνης, η οποία έχει αρνητικές επιπτώσεις και στην ανάφλεξη και στην σταθερότητα της απόδοσης. Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι η εισαγωγή ενός νεροχύτη θερμότητας, όπως νερού ή ατμού, στη ζώνη καύσης. Η τεχνική είναι τελειώς ακατάλληλη για κινητήρες αεροσκαφών όμως είναι μία πρακτική πρόταση για μεγάλους σταθερούς κινητήρες, ιδιαίτερα εάν μεγάλες ποσότητες νερού ή ατμού είναι διαθέσιμες. Έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για να ελέγχει τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου στο επίπεδο που απαιτείται από τους κανονισμούς ΕΡΑ. Μελέτες έχουν αναφέρει μία μείωση 40% στα οξειδία του αζώτου μέχρι τον στόχο των 75 ppm κατά την χρήση αναλογίας νερού/λαδιού 0.4. Σε μερικές περιπτώσεις το νερό ή ο ατμός εγχύεται απευθείας μέσα στην φλόγα, είτε μέσω ενός αριθμού ξεχωριστών ακροφυσίων που βρίσκονται στο τέλος της κεφαλής του καυστήρα ή μέσω τρυπών που είναι ενσωματωμένες στο ακροφύσιο καυσίμου. Εναλλακτικά, η έγχυση νερού μπορεί να πραγματοποιηθεί ανάντη από την επένδυση καυστήρα, συνήθως στη ροή του αέρα, η οποία στη συνέχεια ρέει στη ζώνη καύσης μέσω του κεντρικού στροβιλιστή αέρα. Αυτή η μέθοδος εξασφαλίζει καλό ψεκασμό επειδή τα μικρότερα σταγονίδια μεταφέρονται από την ροή του αέρα μέσω του στροβιλιστή στην ζώνη καύσης, ενώ οι μεγαλύτερες σταγόνες προσκρούουν στις βάνες στροβιλισμού όπου σχηματίζουν μια λεπτή υγρή μεμβράνη η οποία είναι ψεκασμού έκρηξης καθώς ρέει πάνω από το κατάντη άκρο της βάνας.

Όταν ο ατμός που χρησιμοποιείται για τη μείωση οξειδίων του αζώτου μπορεί επίσης να εγχυθεί απευθείας στην ζώνη καύσης ή στον αέρα ο οποίος στη συνέχεια χύνεται στη ζώνη καύσης. Σε μερικές εγκαταστάσεις ο ατμός διοχετεύεται στον συμπιεστή εκκένωσης αέρα. Η μέθοδος είναι απλή αλλά εγγενώς σπάταλη επειδή μόνο το 40% του ατμού στην πραγματικότητα ρέει στην ζώνη καύσης. Αυτός μπορεί να είναι μόνο ένας δευτερεύοντας παράγοντας, αν περίσσεια ατμού είναι διαθέσιμη.

Η αποτελεσματικότητα του νερού και του ατμού για την μείωση των οξειδίων του αζώτου έχει καταδειχθεί από πολλούς ερευνητές και μια γενικά αποδεκτή σχέση μεταξύ της μείωσης των οξειδίων του αζώτου και του λόγου μάζας νερού/καυσίμου, X, μπορεί να εκφραστεί ως

$$\text{Υγρά οξειδία του αζώτου (NOx)/ξηρά οξειδία του αζώτου (NOx)} = \exp^{-(0.2X^2 + 1.41X)} \quad (2-6)$$

Η σχέση αυτή βρέθηκε να εφαρμόζεται τόσο σε υγρά όσο και αέρια καύσιμα. Δείχνει, για παράδειγμα, ότι ίσοι ρυθμοί ροής μάζας νερού και καυσίμου (για τους οποίους $X=1$) αποδίδει 80% μείωση στα οξειδία του αζώτου.

Η εξίσωση (2-6) δεν πρέπει να θεωρηθεί ότι έχει καθολική εφαρμογή. Σχετικές μελέτες έχουν δείξει ότι η έγχυση νερού είναι λιγότερο αποτελεσματική με καύσιμα που περιέχουν άζωτο δεσμευμένο στο καύσιμο. Η κύρια επίδραση της προσθήκης νερού είναι η μείωση του θερμικού οξειδίου του αζώτου (NO_x), αν και μειώνει ελαφρά το άμεσο μονοξείδιο του αζώτου (NO). Αυτό σημαίνει ότι η έγχυση νερού είναι πιο αποτελεσματική όταν η καύση γίνεται σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες, όπου η παραγωγή των θερμικών οξειδίων του αζώτου (NO_x) είναι υψηλή, και είναι λιγότερο αποτελεσματική σε χαμηλές πιέσεις και θερμοκρασίες, όπου ένα μεγαλύτερο ποσοστό των συνολικών οξειδίων του αζώτου (NO_x) σχηματίζεται μέσω του άμεσου μηχανισμού. Το σημείο κλειδί είναι ότι η έγχυση νερού και/ή ατμού πάντα μειώνει τα οξειδία του αζώτου (NO_x), αλλά η έκταση της μείωσης εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας καυστήρα και τον τύπο καυσίμου.

Μελέτες έχουν αναφέρει μειώσεις οξειδίων του αζώτου (NO_x) περίπου 60% για αναλογία μάζας ατμού/καυσίμου μονάδα σε δύο GE βιομηχανικούς κινητήρες που καίνε φυσικό αέριο. Καθώς ο ατμός είναι λιγότερο αποτελεσματικός διαλύτης από το νερό, λόγω της λανθάνουσας θερμότητας της εξάτμισης του νερού, οι μειώσεις στα οξειδία του αζώτου που επιτυγχάνονται με έγχυση ατμού τείνει να είναι λιγότερο δραματική από ό,τι όταν χρησιμοποιείται νερό, και έτσι περίπου 60% περισσότερος ατμός από ό,τι νερό είναι απαραίτητη για να επιτευχθεί μια δεδομένη τη μείωση των οξειδίων του αζώτου.

Παρότι και η έγχυση νερού και ατμού είναι πολύ αποτελεσματική στην μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x) και έχει χρησιμοποιηθεί σε σταθερούς κινητήρες που λειτουργούν σε σχεδόν συνεχείς συνθήκες φορτίου από τις αρχές του 1970, έχουν μια σειρά από μειονεκτήματα. Έτσι, υπάρχει μια αύξηση στο κόστος κεφαλαίου από 10 σε 15 \$/KW και μια αύξηση στη κατανάλωση καυσίμου της τάξεως του 2 με 3 %. Αυτό το πρόσθετο καύσιμο είναι αναγκαίο για τη θέρμανση του νερού σε θερμοκρασία καύσης, αν και η ισχύς είναι αυξημένη λόγω της επιπλέον ροής μάζας μέσω του στροβίλου. Το νερό πρέπει να είναι υψηλής καθαρότητας για την αποτροπή των υπολειμμάτων και της διάβρωσης στα καυτά τμήματα κατόντη του καυστήρα. Η κατεργασία αυτού του νερού είναι δαπανηρή και απαιτεί μια ξεχωριστή μονάδα με βάση την αντίστροφη όσμωση και τον απιονισμό. Η έγχυση νερού έχει δείξει μια σημαντική αύξηση στον τομέα της επιθεώρησης και συντήρησης του υλικού. Γι' αυτό, υπάρχουν, πρακτικά όρια για την ποσότητα του νερού ή ατμού που μπορεί να εγχυθεί στον καυστήρα. Η υποβάθμιση της απόδοσης καύσης, που προκύπτει από την έγχυση νερού-ατμού εκδηλώνεται με την αύξηση των επιπέδων των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα και των άκαυστων υδρογονανθράκων και με την αύξηση των διακυμάνσεων της πίεσης του καυστήρα. Αυτές οι διακυμάνσεις μπορούν να γίνουν πιο έντονες, με σύζευξη με τη διαδικασία καύσης και να προκαλέσουν φθορά του υλικού του καυστήρα.

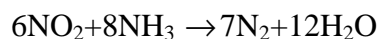
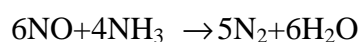
Τα ποικίλα προβλήματα που σχετίζονται με την έγχυση νερού, όπως προαναφέρθηκε, μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

-Υψηλότερο κόστος κεφαλαίου.

- Αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου.
- Υψηλό κόστος για κατεργασία νερού.
- Ενδεχόμενη διάβρωση των τμημάτων της θερμής περιοχής.
- Υψηλότερο κόστος συντήρησης.
- Αύξηση των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα και άκαυστων υδρογονανθράκων .
- Αύξηση των παλμών της πίεσης καύσης.

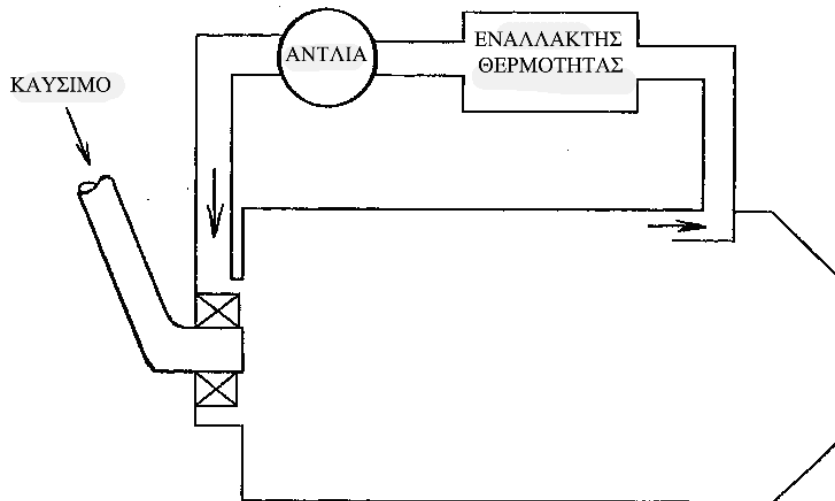
Αυτά τα μειονεκτήματα της έγχυσης νερού και ατμού έχουν ενθαρρύνει την ανάπτυξη του λεγόμενων "dry low NOx" (στεγνών χαμηλών NOx) καυστήρων, δηλαδή, καυστήρες που μπορεί να ικανοποιήσουν τους στόχους εκπομπών, χωρίς να χρειάζεται να καταφύγουμε σε ένεση διαλύτη.

Επιλεκτική καταλυτική μείωση (Selective catalytic reduction-SCR). Αυτή είναι μια μέθοδος για τη μετατροπή των οξειδίων του αζώτου σε ένα ρεύμα καυσαερίων σε ένα στρόβιλο σε μοριακό άζωτο και υδρατμούς με την έγχυση αμμωνίας στην κυκλοφορία του ρεύματος με την παρουσία ενός καταλύτη. Τα καυσαέρια πρώτα περνούν μέσω ενός καταλύτη οξείδωσης και στη συνέχεια αναμειγνύονται με αμμωνία πριν από την είσοδο τους στον καταλύτη SCR. Ο καταλύτης οξείδωσης αφαιρεί τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα και άκαυστων υδρογονανθράκων οξειδώνοντας αυτές σε διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και νερό (H₂O). Για τη μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου, αμμωνία εγχέεται με ένα τρόπο σχεδιασμένο ώστε να πετύχει οικεία ανάμειξη με το ρεύμα καυσαερίων του κινητήρα. Μετά την ανάμειξη, τα καυσαέρια περνούν πάνω από τον καταλύτη (συνήθως πεντοξειδίου του βαναδίου) που έχει ως αποτέλεσμα την επιλεκτική μείωση των οξειδίων του αζώτου (NOx) για να σχηματίσουν N₂ και νερό. Οι κύριες αντιδράσεις είναι:



Η έγχυση νερού ή ατμού χρησιμοποιείται πρώτα για να μειώσει το επίπεδο των οξειδίων του αζώτου μέχρι περίπου 40 ppmv, αφήνοντας τη διαδικασία SCR να επιτύχει περαιτέρω μείωση κάτω από 10 ppmv. Η επιλεκτική καταλυτική μείωση (SCR) δουλεύει καλύτερα με φυσικό αέριο και είναι αρκετά ανεκτική στο θείο που φέρουν τα υγρά καύσιμα. Απαιτεί ότι η θερμοκρασία του ρεύματος καυσαερίων της εξάτμισης να ανήκει σε ένα σχετικά στενό εύρος από 560 έως 670K, και έτσι περιορίζεται σε συστήματα στα οποία το καυσαέριο ρέει σε μια συσκευή ανάκτησης θερμότητας, συνήθως μια γεννήτρια ατμού. Ένα μεγάλο πρόβλημα με αυτή την μέθοδο είναι η απαίτηση ενός συστήματος ελέγχου που τροφοδοτεί την απαιτούμενη ποσότητα αμμωνίας, και η ανάγκη για ένα σύστημα συνεχούς παρακολούθησης που μπορεί να ανατροφοδοτήσει τον μηχανισμό προμήθειας αμμωνίας

κάτω από διαφορετικές συνθήκες φορτίου. Ένα άλλο πρόβλημα είναι το μέγεθος και το βάρος του εξοπλισμού. Σύμφωνα με σχετική έρευνα για έναν 83MW MS7000 αεριοστρόβιλο μια SCR που σχεδιάστηκε για να αφαιρεί 90 % των οξειδίων του αζώτου από το ρεύμα των καυσαερίων έχει τον όγκο των 175m³ και ζυγίζει 111 τόνους. Παρά τα μειονεκτήματα αυτά, η μέθοδος χρησιμοποιείται αρκετά.



2-16

ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΤΗΣ
ΑΝΑΚΥΚΛΟΦΡΗΣΗΣ ΚΑΠΝΟΥ

Ανακύκλωση καυσαερίων. Η βασική αρχή της προσέγγισης αυτής είναι η μείωση της θερμοκρασίας φλόγας με την ανακυκλοφορία των ψυχρών προϊόντων της καύσης πίσω στην κύρια ζώνη, όπως φαίνεται στο σχήμα. 2-16. Η πρακτική σκοπιμότητα αυτής της μεθόδου μείωσης των οξειδίων του αζώτου βρέθηκε ότι σημαντικές μειώσεις (50 %), θα μπορούσαν να επιτευχθούν με ποσοστά ανακύκλωσης 20% ή λιγότερο σε βασικές συνθήκες φορτίου. Η μεγάλη θερμική επίδραση προέρχεται από τη μειωμένη συγκέντρωση του οξυγόνου στον αέρα εισαγωγής, αλλά υπάρχει επίσης μια δευτερεύουσα επίδραση λόγω της μεγαλύτερης θερμοχωρητικότητας του αέρα με αυξημένο το περιεχόμενο νερό και το διοξείδιο του άνθρακα.

Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι απαιτείται λίγο ή καθόλου εξέλιξη καυστήρων και βασικής παραγωγής καυστήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Το κύριο μειονέκτημα της έγκειται στην ανάγκη για ένα intercooler μεταξύ της εξάτμισης και της εισαγωγής. Αυτό πρακτικά το αποκλείει για απλούς αεριοστρόβιλους, αλλά η εφαρμογή τους σε εγκαταστάσεις συνδυασμένου κύκλου προσφέρει μεγαλύτερη υπόσχεση λόγω των σημαντικά χαμηλότερων θερμοκρασιών των καυσαερίων. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι μόνο τα πολύ καθαρά καύσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποφευχθούν τα προβλήματα της ρύπανσης και της μόλυνσης.

2-6 ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ ΕΛΕΓΧΟΝΤΑΣ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΦΛΟΓΑΣ

Από όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν τις εκπομπές ρύπων από τους καυστήρες αεριοστροβίλων, ο πιο σημαντικός με διαφορά είναι η θερμοκρασία της ζώνης καύσης. Με τους συμβατικούς καυστήρες, αυτό μπορεί να κυμαίνεται από 1000K σε χαμηλής ισχύος λειτουργία έως 2500K σε υψηλής ισχύος λειτουργία όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2-17. Αυτό το διάγραμμα επίσης δείχνει ότι αρκετό μονοξείδιο του άνθρακα (CO) σχηματίζεται σε θερμοκρασίες κάτω και γύρω στους 1670K ενώ υπερβολικές ποσότητες οξειδίων του αζώτου (NOx) παράγονται σε θερμοκρασίες υψηλότερες από ότι γύρω στους 1900 K. Μόνο στην αρκετά στενή λωρίδα θερμοκρασιών μεταξύ 1670 και 1900 K είναι τα επίπεδα μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και οξειδίων του αζώτου (NOx) κάτω των 25 και 15 ppmv, αντίστοιχα. Ο βασικός στόχος όλων των διαφόρων προσεγγίσεων προς τις χαμηλές εκπομπές καυστήρων που περιγράφονται παρακάτω είναι να διατηρηθεί η ζώνη καύσης (ή ζώνες) μέσα σε ένα σχετικά στενό εύρος θερμοκρασιών σε όλο το εύρος ισχύος του κινητήρα.

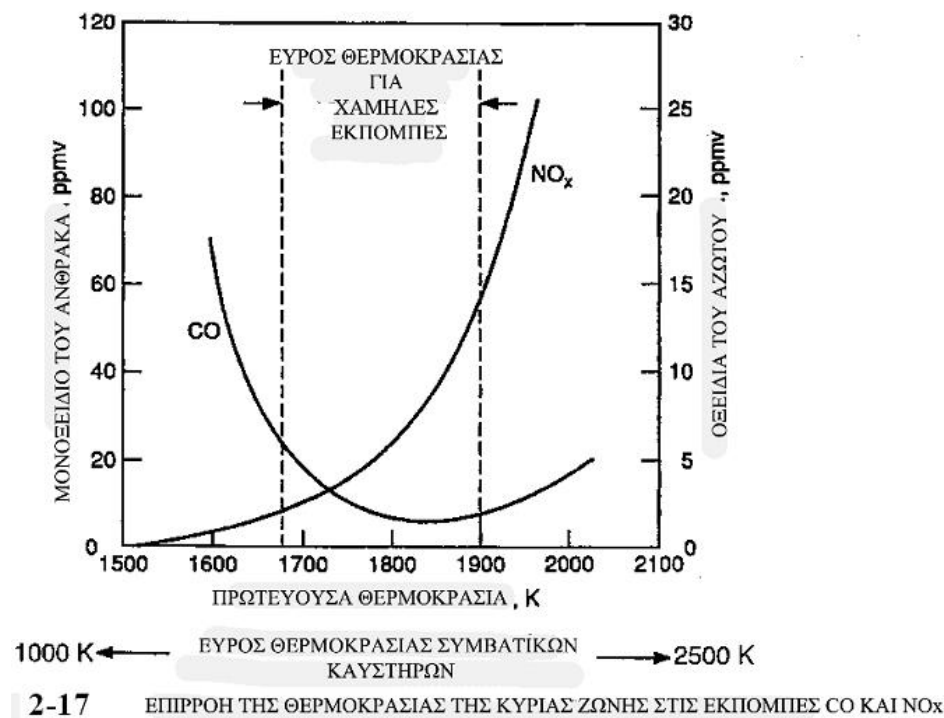
- Μεταβλητή Γεωμετρία

Ένα ιδεατό σύστημα μεταβλητής γεωμετρίας θα ήταν ένα στο οποίο μεγάλες ποσότητες αέρα εισάγονται στο ανάντη άκρο του φλογοθαλάμου καύσης σε καταστάσεις μέγιστης ισχύς για τη μείωση της θερμοκρασίας πρωτογενούς ζώνης και να παράσχει επαρκή ψύξη με φίλμ αέρα. Με τη μείωση της ισχύος του κινητήρα, ένα αυξανόμενο ποσοστό του αέρα εκτρέπεται προς την ζώνη αραίωσης για να διατηρήσει τη θερμοκρασία της πρωτογενούς ζώνης εντός των χαμηλών εκπομπών "window" όπως φαίνεται στο σχήμα 2-17. Πρακτικοί τρόποι για να επιτευχθεί κάποια μεταβολή στην κατανομή του αέρα περιλαμβάνουν τη χρήση των στροβιλιστών μεταβλητής περιοχής για να ελέγχουν την ποσότητα του αέρα που ρέει στη ζώνη καύσης, μεταβλητά ανοίγματα αέρα μέσα στη ζώνη αραίωσης, ή ένας συνδυασμός αυτών.

Αυτά τα μειονεκτήματα σε όλες τις μορφές των συστημάτων μεταβλητής γεωμετρίας περιλαμβάνουν πολύπλοκους μηχανισμούς ελέγχου και ανάδρασης που έχουν την τάση να αυξάνουν το κόστος και το βάρος και να μειώσουν την αξιοπιστία. Προβλήματα για την επίτευξη του επιθυμητού μοτίβου θερμοκρασίας στην εκροή του θαλάμου καύσης αερίων θα μπορούσαν επίσης να προκύψουν, ειδικά αν η πτώση πίεσης της επένδυσης επιτρεπόταν να διαφέρει πάρα πολύ. Το κίνητρο για να ξεπεραστούν αυτά τα πρακτικά προβλήματα είναι ότι η μεταβλητή γεωμετρία έχει τη δυνατότητα για ταυτόχρονη μείωση όλων των κύριων ειδών ρύπων χωρίς να θυσιάζει τις άλλες πτυχές της απόδοσης καύσης. Έχει επίσης διάφορα άλλα πλεονεκτήματα. Για παράδειγμα, καθώς η θερμοκρασία καύσης δεν πέφτει ποτέ κάτω από μια κατώτερη τιμή της τάξεως των 1670K, οι ρυθμοί της χημικής αντίδρασης είναι σχετικά υψηλοί. Αυτό επιτρέπει στη ζώνη καύσης να είναι μικρότερη, με επακόλουθα πλεονεκτήματα όσον αφορά τις μειώσεις στο μέγεθος και το βάρος του καυστήρα. Για εφαρμογές σε αεροσκάφη, η μεταβλητή γεωμετρία έχει επίσης τη δυνατότητα για ευρεία όρια σταθερότητας και βελτιωμένης απόδοσης επανένανσης σε υψόμετρο.

Στην ιδανική περίπτωση, οι μεταβλητής γεωμετρίας καυστήρες πρέπει να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με προαναμειγμένες-προαεροποιημένα συστήματα ψεκάσμου καυσίμου. Μόνο με αυτόν τον τρόπο είναι πιθανό να αποφύγουμε την τοπική υψηλή θερμοκρασία, τις υψηλού σχηματισμού οξειδίων του αζώτου περιοχές, που δημιουργούνται των σταγονιδίων καυσίμου στην ζώνη καύσης.

Αν και η μεταβλητής γεωμετρίας καυστήρες έχουν χρησιμοποιηθεί σε μερικούς μεγάλους βιομηχανικούς κινητήρες, υπάρχουν μερικές επιτυχημένες εφαρμογές αυτής της τεχνικής σε μικρούς έως μεσαίους αεριοστρόβιλους λόγω της μείωσης του κόστους και του μεγέθους και επίσης λόγω των ανησυχιών σχετικά με την επιχειρησιακή αξιοπιστία.



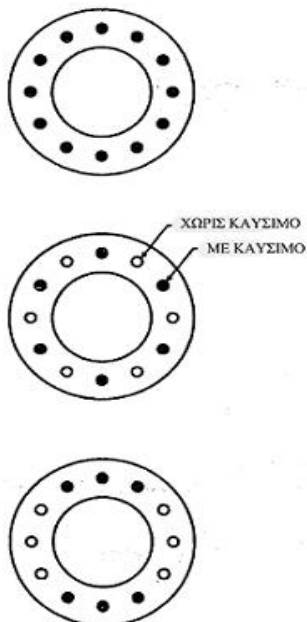
- Καύση σε στάδια

Με τα συστήματα μεταβλητής γεωμετρίας, η θερμοκρασία καύσης ελέγχεται με ακρίβεια εντός αρκετά στενών ορίων με την αλλαγή του αέρα από τη μία ζώνη στην άλλη με αλλαγές στη ρύθμιση της ισχύος του κινητήρα. Αντίθετα, η κατανομή της ροής αέρα μέσα στους σταδιακής καύσης καυστήρες παραμένει σταθερή, η ροή του καυσίμου εναλλάσσεται από τη μία ζώνη στην άλλη, προκειμένου να διατηρήσει μια αρκετά σταθερή θερμοκρασία καύσης. Μια απλή μέθοδος σταδιοποίησης των καυσίμων είναι με την “επιλεκτική έγχυση καυσίμου”. Με αυτή την τεχνική, το καύσιμο παρέχεται μόνο σε επιλεγμένους συνδυασμούς εγχυτήρων καυσίμου σε συνθήκες σβέσης, επανένανσης και στο ρελαντί, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2-18. Ο στόχος αυτής της τεχνικής διαμόρφωσης είναι η αύξηση του λόγου ισοδυναμίας και ως εκ τούτου, επίσης, της θερμοκρασίας των τοπικών ζωνών καύσης σε λειτουργία χαμηλής ισχύος. Αυτή η προσέγγιση, η οποία είναι πλέον σε κοινή

χρήση, όχι μόνο μειώνει τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα και άκαυστων υδρογονανθράκων, αλλά και έχει το πρόσθετο πλεονέκτημα της επέκτασης του ορίου πτωχής έκρηξης σε χαμηλότερους λόγους ισοδυναμίας.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα του επιλεκτικού ψεκασμού καυσίμου είναι η “ψύξη” των χημικών αντιδράσεων που εμφανίζεται στα εξωτερικά άκρα των επιμέρους ζωνών καύσης. Αυτή η ψύξη μειώνει την αποδοτικότητα της καύσης, όπως αναφέραμε πριν, και αυξάνει το σχηματισμό μονοξειδίου του άνθρακα και άκαυστων υδρογονανθράκων. Επιπλέον, η περιμετρικά μη ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας εξόδου οδηγεί σε απώλεια απόδοσης του αεριοστροβίλου. Αυτοί οι περιορισμοί έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη καυστήρων σταδιακής καύσης στους οποίους δεν γίνεται καμία προσπάθεια για να επιτευχθούν όλοι οι στόχοι απόδοσης σε μία ζώνη καύσης. Αντ' αυτού, δύο ή περισσότερες ζώνες απασχολούνται, καθεμία από τις οποίες έχει σχεδιαστεί ειδικά για τη βελτιστοποίηση ορισμένων πτυχών της απόδοσης καύσης.

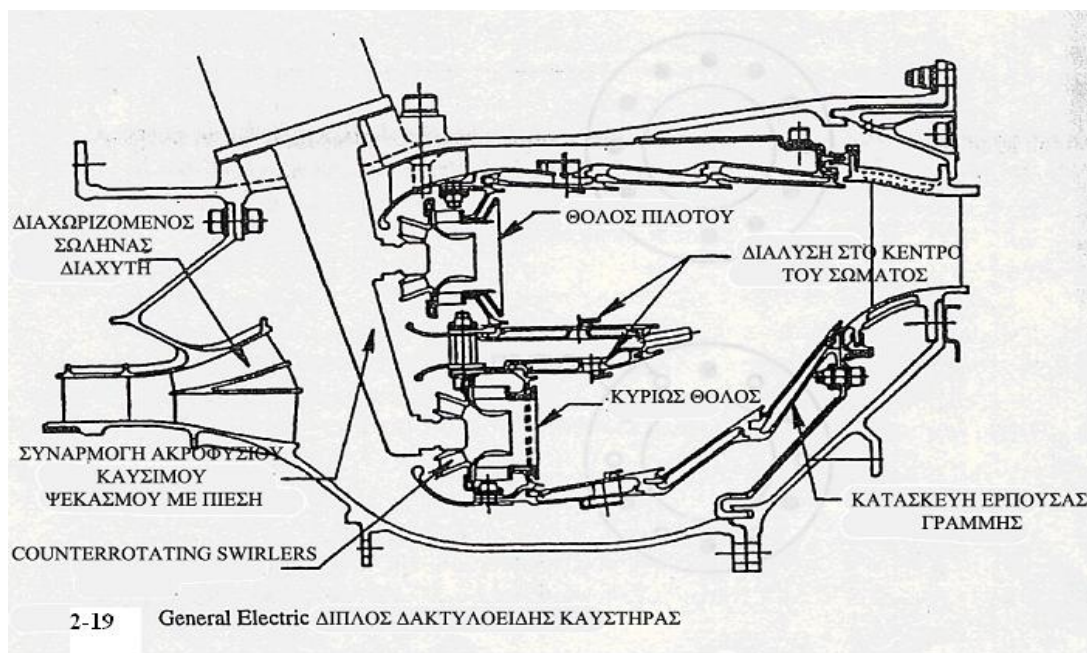
Ένας τυπικός σταδιακής καύσης καυστήρας έχει μια ελαφρά φορτωμένη κύρια ζώνη η οποία παρέχει όλη την άνοδο της θερμοκρασίας που απαιτείται για να οδηγήσει τον κινητήρα σε συνθήκες χαμηλής ισχύος. Λειτουργεί σε ισοδυναμία αναλογίας γύρω στο 0,8 για την επίτευξη υψηλής απόδοσης καύσης και χαμηλές εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα και άκαυστων υδρογονανθράκων. Σε υψηλότερες ρυθμίσεις ισχύος, ο κύριος ρόλος του είναι να λειτουργήσει ως πηγή οδηγός της θερμότητας για την κύρια ζώνη καύσης που τροφοδοτείται με ένα πλήρως προαναμεμειγμένο μίγμα καυσίμου-αέρα. Όταν λειτουργεί σε συνθήκες μέγιστης ισχύος, η ισοδυναμία αναλογίας και στις δύο ζώνες διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα γύρω στο 0.6 για να ελαχιστοποιήσει τα οξείδια του αζώτου και του καπνού.



2-18 ΠΑΤΕΝΤΑ ΓΙΑ ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΗ ΕΓΧΥΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

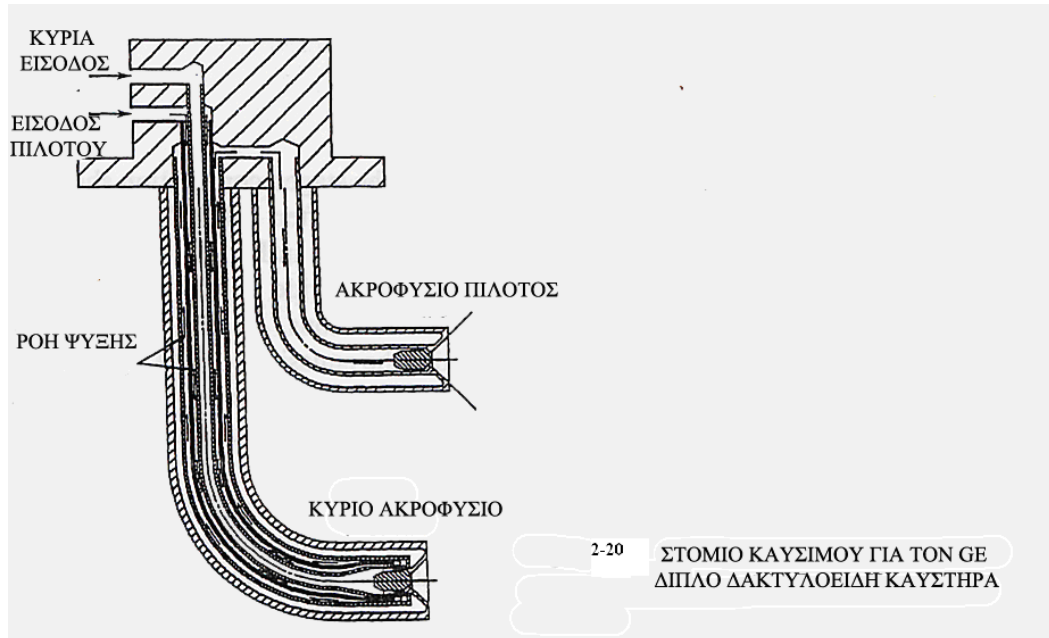
Μια σημαντική επιλογή για τον σχεδιαστή είναι το κατά πόσον η καύση σε στάδια θα πρέπει να λάβει χώρα σε συστοιχία "σειράς" ή "εν παραλλήλω". Η επόμενη προσέγγιση, που συχνά αποκαλείται "ακτινική σταδιοποίηση", περιλαμβάνει τη χρήση ενός διπλού δακτυλοειδή καυστήρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-19. Ένας από αυτούς τους καυστήρες είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί σε χαμηλό φορτίο και να παρέχει όλη την άνοδο της θερμοκρασίας που απαιτείται κατά την εκκίνηση, υψόμετρο, επανένανυση και συνθήκες ρελαντί του κινητήρα. Στο ρελαντί, η σχέση ισοδυναμίας της ζώνης καύσης επιλέγεται για να ελαχιστοποιήσει τις εκπομπές του μονοξειδίου του άνθρακα και των άκαυστων υδρογονανθράκων. Ο άλλος δακτυλοειδής καυστήρας έχει σχεδιαστεί ειδικά για να βελτιστοποιήσει τη διαδικασία καύσης σε υψηλές ρυθμίσεις ισχύος. Διαθέτει μία μικρή, υψηλής φόρτισης ζώνη καύσης μικρού χρόνου παραμονής και χαμηλό τιμή λόγου ισοδυναμίας ώστε να ελαχιστοποιήσει το σχηματισμό των οξειδίων του αζώτου και του καπνού.

Το κύριο πλεονέκτημα της ακτινικής σταδιοποίησης είναι ότι επιτρέπει να επιτευχθούν όλοι οι στόχοι της απόδοσης καύσης, συμπεριλαμβανομένων των χαμηλών εκπομπών, μέσα σχεδόν στο συνολικό μήκος σαν ενός συμβατικού καυστήρα. Αυτό το μικρού μήκους χαρακτηριστικό είναι ελκυστικό από τη σκοπιά του χαμηλού βάρους του κινητήρα και μειωμένων προβλημάτων δυναμικής του ρότορα.



Αν οι θόλοι καυστήρα των εσωτερικών και εξωτερικών σταδίων είναι τοποθετημένα έτσι ώστε να είναι κάθετα προς τον άξονα της γραμμής, τα άκρα έγχυσης καυσίμου και για τα δύο στάδια μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα κοινό βραχίονα τροφοδοσίας, όπως φαίνεται στο σχήμα. 2-19. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της ρύθμισης είναι ότι είναι οι κύριοι εγχυτήρες σταδιακού καυσίμου ψύχονται από το συνεχούς ροής πιλότο καυσίμου, όπως

φαίνεται στο σχήμα 2-20. Αυτό αποτρέπει την απανθρακοποίηση από τα κύρια ακροφύσια σταδίου όταν είναι χωρίς καύσιμα αλλά εξακολουθούν να είναι εκτεθειμένα στο ζεστό περιβάλλον του κινητήρα.



Υπάρχει ένας αριθμός μειονεκτημάτων στην ακτινική σταδιοποίηση. Ένα βασικό μειονέκτημα είναι ότι όλες οι ζώνες προμηθεύονται αέρα στην θερμοκρασία του εξωτερικού συμπιεστή, που σημαίνει ότι όλες οι ζώνες έχουν σχετικά χαμηλό όριο πτωχής έκρηξης. Είναι επίσης ξεκάθαρο ότι η μείωση ρύπων πετυχαίνεται με το κόστος αυξημένης περιπλοκότητας σχεδιασμού και μια αύξηση στον αριθμό των εγχυτήρων καυσίμου. Η μεγαλύτερη επιφάνεια του φλογοθαλάμου απαιτεί επιπλέον αέρα ψύξης που έχει δυσμενείς επιδράσεις στον pattern factor. Ακόμα, οι κορυφώσεις του προφίλ της ακτινικής θερμοκρασίας θα μπορούσε να μετατοπιστεί σε ακτινική θέση σαν αποτέλεσμα της παρουσίας καυσίμου, με πιθανά αντίθετες επιδράσεις στους θερμούς τομείς κατόπιν του καυστήρα. Άλλο ένα βασικό πρόβλημα με την ακτινική σταδιοποίηση είναι ότι το να πετύχουμε την επιθυμητή απόδοση σε μέτριες ρυθμίσεις ισχύος όπου και οι δυο ζώνες λειτουργούν εκτός του εύρους που έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν.

Ο ακτινικός σταδιακός καυστήρας της εικόνας 2-19 έχει σχεδιαστεί από την General Electric. Πετυχε γύρω στο 35 % μείωση CO και UHC και 45% μείωση σε NOx, σε σύγκριση με τον αντίστοιχο μονο-δακτυλοειδή καυστήρα. Ο κινητήρας GE CFM56-5B, εξοπλισμένος με αυτόν τον διπλό δακτυλοειδή καυστήρα, είναι τώρα εν υπηρεσία στα αεροσκάφη A320 και A321.

Με εν σειρά ή εν παραλλήλω παρουσία καυσίμου, ένα κομμάτι του καυσίμου εγχέεται μέσα σε μια σχετικά συμβατική κύρια ζώνη καύσης. Επιπλέον καύσιμο συνήθως προαναμεμιγμένο με αέρα εγχέεται κατόπιν σε μια δευτερεύουσα ή κύρια ζώνη καύσης που λειτουργεί σε χαμηλές αναλογίες για να ελαχιστοποιήσει τον σχηματισμό NOx και καπνού. Η κύρια ζώνη καύσης χρησιμοποιείται στην εκκίνηση του κινητήρα και παράγει την αύξηση θερμοκρασίας που χρειάζεται για να αυξηθεί η ταχύτητα περιστροφής μέχρι ο κινητήρας να βρεθεί σε κατάσταση ρελαντί. Σε υψηλότερη ισχύ το καύσιμο τροφοδοτείται στην

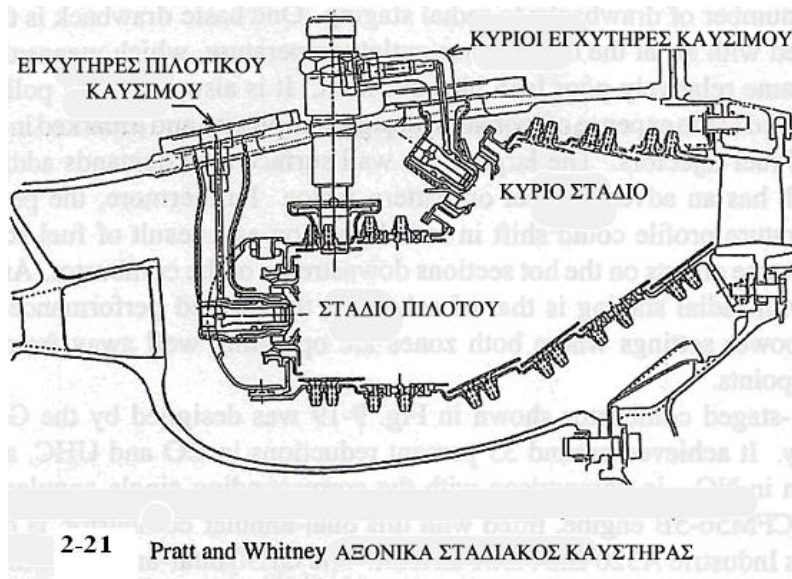
δευτερεύουσα ζώνη καύσης και όσο η ισχύς του κινητήρα αυξάνεται προς την μεγίστη τιμή της η λειτουργία της κύριας ζώνης γίνεται μια από τις παροχές της θερμότητας που χρειάζεται για να ξεκινήσει η ταχεία καύση του καυσίμου που τροφοδοτείται στο δεύτερο στάδιο.

Η αξονική παρουσία έχει ξεκάθαρα πλεονεκτήματα σε σχέση με το ακτινική παρουσία καυσίμου. Επειδή το κύριο στάδιο είναι κατάντη του οδηγού σταδίου, η ανάφλεξη του κυρίως σταδίου από το πιλότο είναι γρήγορη και αξιόπιστη. Επίσης το θερμό αέριο από τον πιλότο στην κύρια ζώνη καύσης εγγυάται υψηλή αποδοτικότητα καύσης από την κύρια φάση ακόμα και σε χαμηλές αναλογίες.

Το κύριο μειονέκτημα του του αξονικής διαμόρφωσης είναι ότι η εν σειρά διαμόρφωση των σταδίων τείνει να δημιουργεί επιπλέον μήκος που κάνει το πρόβλημα του εκ των ύστερων εξοπλισμού δύσκολο για κάποιους κινητήρες. Σε σύγκριση με τους συμβατικούς καυστήρες, η επιφάνεια του φλογοθαλάμου που πρέπει να ψηχθεί είναι μεγαλύτερη. Οι εγχυτήρες καυσίμου για τα δυο στάδια καύσης χρειάζονται ξεχωριστά συστήματα παροχέτευσης που περιλαμβάνουν δυο διαφορετικές διεισδύσεις των περιβλημάτων των καυστήρων. Ακόμα το καύσιμο πιλότος δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ψύξει το κύριο στάδιο καυσίμου καθώς μπορεί να γίνει συμβατικά με ακτινική διαμόρφωση. Η εικόνα 2-21 δείχνει μια άποψη διατομής ενός αξονικής διαμόρφωσης καυστήρα που αναπτύχθηκε από την εταιρία Pratt & Whitney. Για σαφήνεια, οι εγχυτήρες του κυρίου σταδίου δείχνονται περιστρεμμένοι κατά το μισό ενός εγχυτήρα για να είναι στην ίδια ευθεία με τους πιλοτικού σταδίου εγχυτήρες. Η κεντρική γραμμή του κινητήρα είναι στο κάτω μέρος της εικόνας. Η πιλοτική ζώνη καύσης είναι ειδικά σχεδιασμένη να παρέχει μεγάλα όρια σταθερότητας και μεγάλη αποδοτικότητα καύσης (χαμηλό CO και UHC). Με αύξηση ισχύος του κινητήρα πάνω από το ρελαντί, το καύσιμο διοχετεύεται στην κύρια ζώνη καύσης όπου η καύση ξεκάνει και διατηρείται από το θερμό αέριο που προέρχεται από την πιλοτική ζώνη. Οι ποσότητες καυσίμου που διοχετεύονται στην κύρια και στην πιλοτική ζώνη είναι τόσες που δεν δημιουργείται καθυστέρηση ώθησης όταν το καύσιμο πρωτοεμφανίζεται στην κύρια ζώνη. Σε συνδυασμό, οι κύριες ζώνες και οι πιλοτικές ζώνες διατηρούν χαμηλή ισορροπία αναλογίας που εξασφαλίζουν χαμηλές εκπομπές NOx σε υψηλότερη ισχύ.

Ιδιάζουσας σημασίας στην εικόνα 2-21 είναι η εσωτερική τοποθεσία της πιλοτικής ζώνης καύσης. Αυτό μειώνει την ευαισθησία της φλόγας να σβήσει σε βροχή επειδή ο συμπιεστής φυγοκεντρίζει το νερό στο εξωτερικό μέρος του μονοπατιού της ροής αέρα. Άλλο ένα πλεονέκτημα του να έχουμε κύρια ζώνη έξω από την πιλοτική είναι ότι το προφίλ της ακτινικής θερμοκρασίας στο εξωτερικό του καυστήρα κορυφώνεται προς την εξωτερική ακτίνα της τουρμπίνας, μια κατάσταση κατάλληλη για μεγάλη διάρκεια ζωής των λεπίδων της τουρμπίνας.

Μακροπρόθεσμα είναι πιθανό ότι η σταδιοποίηση της ροής του αέρα με μεταβαλλόμενη γεωμετρία σε συνδυασμό με τη σταδιοποίηση του καυσίμου μπορεί να γίνει μια περισσότερο ελκυστική σχεδιαστική επιλογή.



2-7 ΣΤΕΓΝΟΙ ΧΑΜΗΛΟΥ (DRY-LOW) NO_x ΚΑΥΣΤΗΡΕΣ

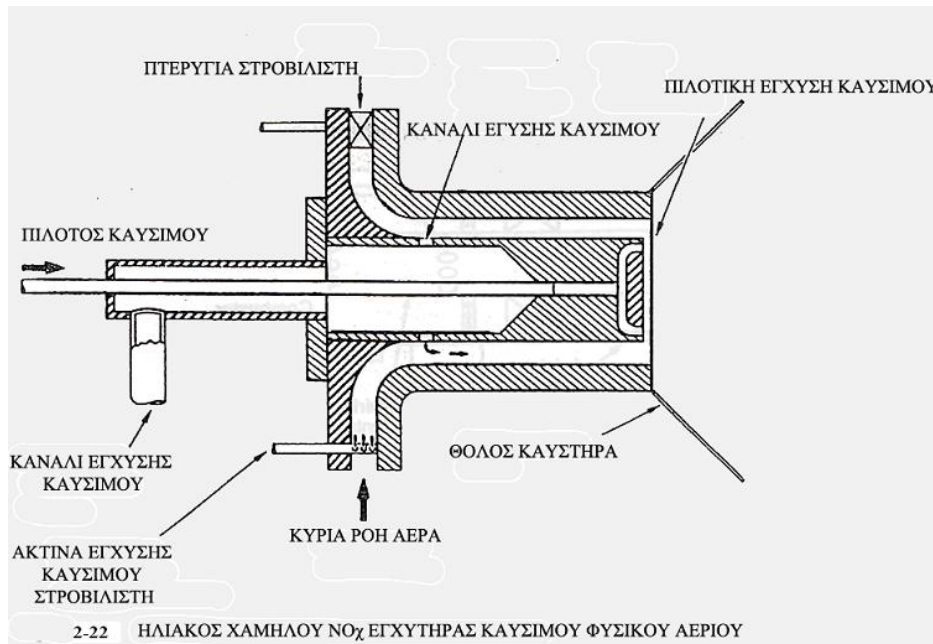
Στο σχεδιασμό DL NO_x καυστήρων για στατικές τουρμπίνες αερίων υπάρχουν δυο μεγάλα κριτήρια απόδοσης που πρέπει να πληρούνται. Όπως επισημαίνεται σε έρευνες, μια προφανή ανάγκη είναι επιτύχουν τους στοχους των εκπομπών σε βασικό φορτίο και σε αέρια και σε υγρά καύσιμα καθώς και ο έλεγχος τις παραλλαγής των επίπεδων των εκπομπών κατά μήκος της περιοχής φορτίων του κινητήρα. Μια ακόμα εξίσου σημαντική ανάγκη είναι να επιτύχουμε σε υψηλή λειτουργία συστήματος σταθερή καύση σε όλες τις καταστάσεις λειτουργίας, καλή απόκριση συστήματος σε γρήγορες αλλαγές φορτιού, αποδεκτά επίπεδα θορύβου καύσης και αν χρειάζεται, ικανότητα ομαλής αλλαγής από αέριο σε υγρό καύσιμο και το αντίστροφο.

Αυτή η παράγραφος αξιολογεί κάποιες από τις προσεγγίσεις που διάφοροι κατασκευαστές ακολουθούν στην προσπάθεια τους να επιτύχουν χαμηλές εκπομπές ρύπων , συγκεκριμένα NO_x , χωρίς να πρέπει να καταφύγουν στην έγχυση νερού η ατμού. Καυστήρες αυτού του τύπου είναι γνωστοί ως “dry low NO_x (DLN) ή “dry low emissions” (DLE) καυστήρες.

- Solar DLE ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΙ

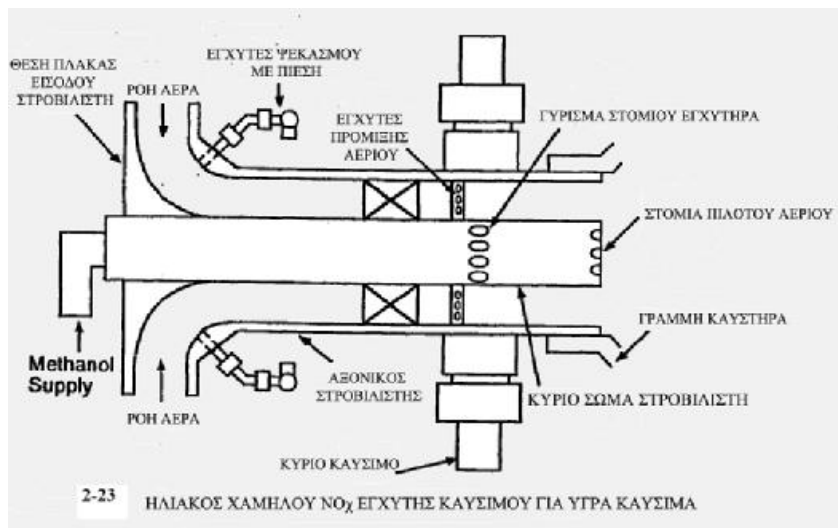
Οι *Solar Turbines* στο Σαν Ντιέγκο ήταν από τις πρωτοπόρες στην ανάπτυξη καυστήρων χαμηλών ρύπων για βιομηχανικούς αεροστροβίλους. Η εικόνα 2-22 δείχνει μια άποψη διατομής του εγχυτήρα καύσιμου που σχεδιάστηκε για την εγκατάσταση των πολλαπλών-κόνων συστημάτων καύσεως για τους Mars και Centaur κινητήρες. Ένας 18 βανών ακτινικής ροής στροβιλιστής χρησιμοποιείται για να μεταδώσει ένα μεγάλο βαθμό περιστροφής στον κύριο αέρα του καυστήρα που υπηρετεί και για να προωθήσει τη μίξη καύσιμου /αέρα και για να επιφέρει ροή επανακυκλοφορίας στην κύρια ζώνη. Η κατασκευή του στροβιλιστή καύσιμου εγχύτη/αέρα επιτρέπει 3 διαφορετικούς τρόπους έγχυσης καύσιμου, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2-22. Η καλύτερη μίξη γίνεται με έγχυση αερίου καυσίμου μέσα από 18 ακτίνες, που η κάθε ακτίνα είναι τοποθετημένη ανάμεσα από ένα ζευγάρι βανών στροβιλισμού. Η κάθε ακτίνα περιέχει 6 τρύπες διαμέτρου 0,89mm, ο συνολικός αριθμός σημείων έγχυσης είναι 108. Οι δοκιμές καύσεων που έγιναν στην

κατασκευή του εγχυτήρα καύσιμου (που ήταν τοποθετημένος σε ένα κυλινδρικό φλογοθάλαμο καύσης έδειξαν ότι αυτό το σενάριο είναι ικανό να πετυχει εκπομπές NOx κάτω από 10 ppmv όταν καιει φυσικό αέριο σε πιέσεις μέχρι 1.1 MPa, μαζί με χαμηλές τιμές CO και UHC.



Ο τρόπος με τον οποίο αυτό το σύστημα έγχυσης καύσιμου υιοθετήθηκε για υγρά καύσιμα σε διάφορες εφαρμογές φαίνεται στην εικόνα 2-23. Το σύστημα περιέχει δυο διαφορετικούς τρόπους έγχυσης υγρού καύσιμου. Ο τρόπος “εσωτερικό φίλμ” περιλαμβάνει λέπτυνση του καυσίμου στο κεντρικό μέρος του κυλινδρικού στροβιλιστή. Το καύσιμο παραδίδεται στην εξωτερική επιφάνεια του κεντρικού μέρους μέσα από 8 τρύπες τοποθετημένες γύρω από τη περιφέρεια του κεντρικού μέρους. Αυτό το καύσιμο δημιουργεί ένα φίλμ που μεταφέρεται κατάντη του σημείου βασικού στροβιλισμού της αεροροής. Ατμοποιείται και αναμιγνύεται με τον αέρα καθώς το φίλμ προχωρεί κατά μήκος του κεντρικού σώματος και μέσα στη κύρια ζώνη. Ο “εξωτερικού φίλμ” τρόπος λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο αλλά ο σχηματισμός του φίλμ γίνεται στην εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια του καναλιού στροβιλισμού του αέρα.

Τα τεστ καύσης έδειξαν ότι οι εκπομπές του NOx ήταν χαμηλές είτε με ολική εσωτερική τροφοδότηση είτε με συνδυασμό εσωτερικού και εξωτερικού φίλμ. Ο καυστήρας απέδωσε γύρω στα 12 ppmv NOx στα 0,6 MPa και 20 ppmv στα 0,9 MPa. Το CO ήταν πάντα κάτω από 50 ppmv. Από κοινού με τα καλύτερα-αναμεμιγμένα συστήματα, χαμηλές συγκεντρώσεις και CO και NOx ήταν εφικτές μόνο με ένα μικρό εύρος συνθηκών λειτουργίας. Πιθανές βελτιώσεις για αυτό το σενάριο περιλαμβάνουν την αύξηση του αριθμού των τρυπών έγχυσης που χρησιμοποιούνται για να παραδώσουν καύσιμα στην επιφάνεια φίλμ για να βοηθήσουν στον σχηματισμό ενός ποιο ομοιομόρφου φίλμ και με την αύξηση του μήκους του κυρίου μέρους του εγχυτή για να υπάρχει μεγαλύτερος χρόνος για την εξάτμιση και την μίξη του καύσιμου.



- SIEMENS ΥΒΡΙΔΙΚΟΣ ΚΑΥΣΤΗΡΑΣ

Αυτός ο καυστήρας είχε αρχικά αναπτυχθεί για να λειτουργεί με φυσικό αέριο είτε για λειτουργία διάχυσης ή προανάμιξης. Έχει δυο ξεχωριστά περάσματα για τον αέρα, ένα εσωτερικό που έχει ένα αξονικό στροβιλιστή δίπλα στην έξοδο του και ένα ομόκεντρο εξωτερικό πέρασμα που έχει οριστεί στην εικόνα 2-24 ως διαγώνιος στροβιλιστής επειδή έχει κλίση σε σχέση με τον άξονα του καυστήρα. Το εσωτερικό πέρασμα που μεταφέρει το 10% του συνολικού αέρα, περιέχει την διάχυση του αερίου και τους πιλοτικούς καυστήρες. Κατά την εκκίνηση και σε λειτουργία χαμηλού φορτίου, όλο το καύσιμο περιορίζεται σε αυτό το πέρασμα. Όσο αυξάνεται το φορτίο, μια αναλογία καύσιμου/αέρα επιτυγχάνεται και εκεί ο καυστήρας αλλάζει από λειτουργία διάχυσης σε λειτουργία προανάμιξης. Τότε το αέριο εγχέεται μέσα στο εξωτερικό πέρασμα αέρα μέσα από μικρούς σωλήνες όπου ο καθένας περιέχει 10 τρύπες. Αυτή η διαμόρφωση εξασφαλίζει ένα μεγάλο επίπεδο ακτινικής και περιμετρικής ομοιομορφίας στο μίγμα καυσίμου/αέρα που μπαίνει στην προαναμεμιγμένη ζώνη καύσης. Καλή σταθερότητα επιτυγχάνεται με την παρουσία του πιλότου καυστήρα στο εσωτερικό πέρασμα. Ειδικότερα, το σύστημα λειτουργεί σαν καυστήρας διάχυσης στα χαμηλά φορτία κινητήρα και μετά λειτουργεί σαν προαναμεμιγμένος καυστήρας σε μεγαλύτερα φορτία.

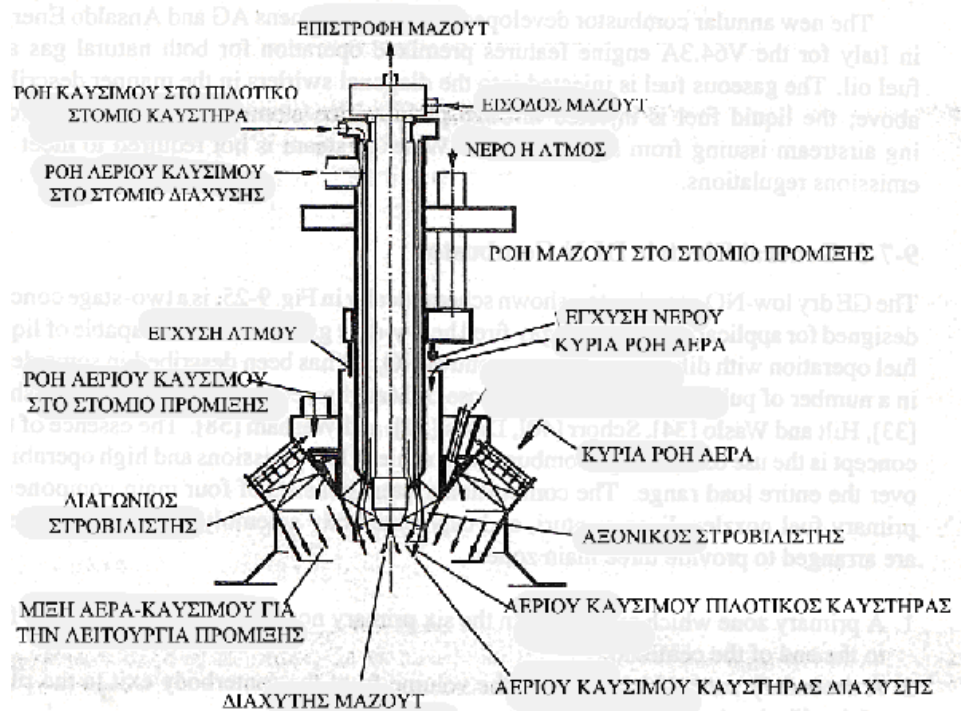
Για υγρά καύσιμα, ο **burner** εξοπλίζεται με μια κεντρική λόγχη λαδιού. Ένα ακόμα σύστημα στομίων για έγχυση νερού ή ατμού εξασφαλίζει ότι οι εκπομπές NOx μπορούν να μειωθούν σε χαμηλές τιμές σε όλο το εύρος λειτουργίας του κινητήρα.

Ο Siemens υβριδικός καυστήρας είναι πλέον καθιερωμένος σαν ένα σύστημα χαμηλών ρύπων για κινητήρες κλάσης 150 MW, και έχει επιτύχει με συνέπεια μονοψήφιους αριθμούς εκπομπών NOx (9 ppm) όταν καίει φυσικό αέριο. Η ευελιξία του έχει επιδεχθεί από την εφαρμογή του από την MAN GHH στον THM 1304 κινητήρα της. Αυτός ο 9 MW αεριοστροβίλος είναι ένα δυο αξόνων βαρύ μηχάνημα που έχει δυο σωληνοειδής θαλάμους καύσης τοποθετημένους πάνω από το περίβλημα του κινητήρα. Οι εκπομπές NOx είναι λιγότερες από 5 ppm ανάμεσα στο 75 και στο 100 % φορτίου όταν δουλεύει με φυσικό αέριο.

Στους πρώτους Siemens καυστήρες αναρροφήσεως (silo), όλοι οι υβριδικοί καυστήρες ήταν του ίδιου σχεδίου και μεγέθους. Υιοθέτηση σε διαφορετικά μεγέθη καυστήρων έγινε με την αλλαγή του αριθμού των καυστήρων. Όμως, στους νέους HBR (hybrid burner ring) δακτυλοειδείς καυστήρες, ο αριθμός των καυστήρων διατηρείται στους

24 για να πετυχουμε ένα ικανοποιητικό θερμοκρασιακό συντελεστή προτύπου. Αυτό σημαίνει ότι το μέγεθος του θαλάμου καύσης πρέπει να ποικίλει για να ταιριάζει στο μέγεθος του καυστήρα. Όμως, ο βασικός υβριδικός θάλαμος καύσης παραμένει ίδιος.

Ο νέος δακτυλοειδής καυστήρας που αναπτύχθηκε από την Siemens AG και την Ansaldo Energia στην Ιταλία για τον V64.3A κινητήρα, περιλαμβάνει προαναμεμιγμένη λειτουργία για φυσικό αέριο και για μαζούτ. Το αέριο καύσιμο εγχέεται μέσα στους διαγώνιους στροβιλιστές με τον τρόπο που περιγράφεται παραπάνω. Το υγρό καύσιμο εγχέεται από στόμια ψεκαστήρων μέσα στον αέρα που βγαίνει από τους στροβιλιστές. Νερό η ατμός δεν χρειάζονται για να καλυφτούν οι κανονισμοί ρύπων.



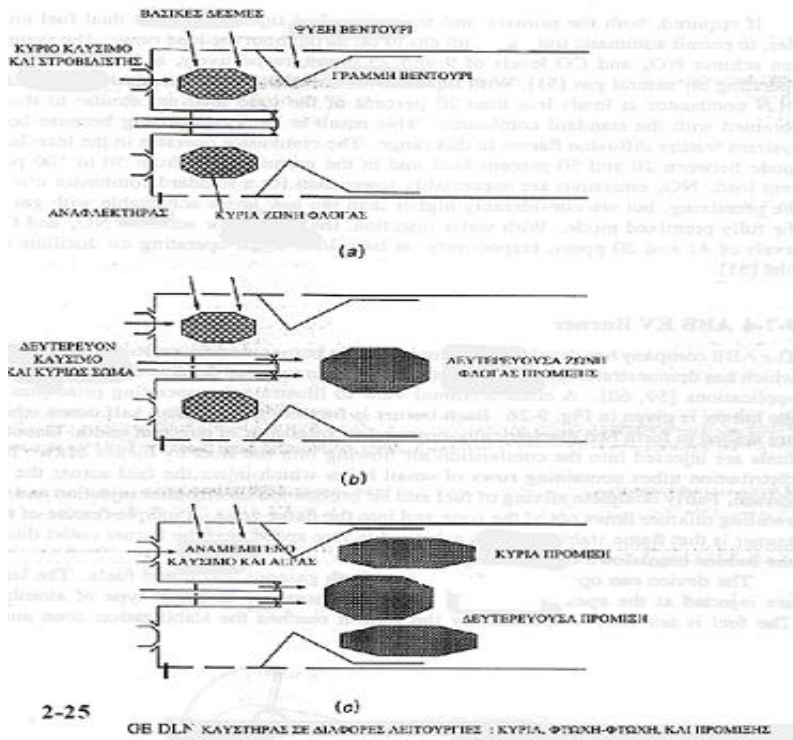
2-24 Siemens ΥΒΡΙΔΙΚΟΣ ΚΑΥΣΤΗΡΑΣ

- GENERAL ELECTRIC DLN ΚΑΥΣΤΗΡΑΣ

Ο GE dry low-NOx καυστήρας, που δίνεται σχηματικά στην εικόνα 2-25, είναι μια ιδέα δυο σταδίων που έχει σχεδιαστεί για χρήση σε φυσικού αερίου βαρέως τύπου αεριοστροβίλου, αλλά είναι ικανό για χρήση υγρού καύσιμου με αραιωτική έγχυση για τον έλεγχο του NOx. Η ουσία του είναι η χρήση των δυο σταδίων καύσης για να πετυχει χαμηλές εκπομπές και υψηλή λειτουργικότητα σε όλο το εύρος φορτιού. Το σύστημα καύσης αποτελείται από τέσσερα κύρια εξαρτήματα: κύρια ακροφυσία καύσιμου, φλογοθάλαμο, σωλήνες venturi, και συνδεσμολογία καλύματος/κέντρου σώματος. Αυτά τα εξαρτήματα είναι διατεταγμένα έτσι ώστε να παρέχουν τρεις κύριες ζώνες :

1. Μια κύρια ζώνη που εκτείνεται από έξι κύρια ακροφύσια τοποθετημένα στο εμπρός μέρος του καλύμματος μέχρι το τέλος του κυρίου σώματος.
2. Μια δευτερεύουσα ζώνη που περιλαμβάνει τον όγκο από την έξοδο του κέντρου του σώματος έως το επίπεδο των οπών αραίωσης.
3. Μια ζώνη αραίωσης που καταλαμβάνει τον χώρο από τις οπές αραίωσης μέχρι το τέλος του φλογοθαλάμου.

Ο καυστήρας λειτουργεί με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους που έχουν οριστεί σαν : κύριος, πτωχός-πτωχός (lean-lean), δευτερεύων, και πρόμιξης.



Κύριος. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 2-25a, σβέση επιτυγχάνεται με καύσιμο που ρέει μέσα από τα κύρια ακροφύσια τοποθετημένα στο πάνω μέρος του φλογοθαλάμου. Ο κυρίως αέρας καύσης μπαίνει μέσα από στροβιλιστές που περικλείουν το ακροφύσιο και μέσα από τρύπες αέρα. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας χρησιμοποιείται για ανάφλεξη, επιτάχυνση και λειτουργία της μηχανής σε ρυθμίσεις χαμηλής ισχύς μέχρι το 40% του μεγίστου φορτίου.

Lean-Lean. Καθώς το φορτίο του κινητήρα αυξάνεται, το καύσιμο τροφοδοτεί την δευτερεύουσα ζώνη από τέσσερις ακτινικούς σωλήνες που βρίσκονται στο κυρίως σώμα. (εικόνα 2-25b). Το καύσιμο αναμιγνύεται με αέρα και μετά ρέει μέσα από ένα στροβιλιστή στην έξοδο του κυρίως σώματος για να δημιουργήσει μια σταθερή από στροβιλισμούς δευτερεύουσα ζώνη καύσης. Η κυρίως και η δευτερεύουσα ζώνη λειτουργούν και οι δυο σε χαμηλούς λόγους ισοδυναμίας και λόγου αυτού και ο όρος lean-lean γι' αυτό το τρόπο λειτουργίας που μπορεί να αυξήσει την παραγωγή της τουρμπίνας σε μέγεθος βασικού φορτίου.

Δευτερεύουσα: Αυτός ο τρόπος εκπροσωπεί μια μετάβαση ανάμεσα στον lean-lean και στον προαναμεμιγμένο τρόπο. Η τροφοδοσία καύσιμου στην κύρια ζώνη μειώνεται σταδιακά ενώ

αυξάνεται η ροή καύσιμου στην δευτερεύουσα ζώνη. Τελικά, η κύρια φλόγα σβήνει αφήνοντας φλόγα μόνο στην δευτερεύουσα ζώνη.

Πρόμιξης: Το καύσιμο ξαναπαρουσιάζεται μέσα από τα κύρια ακροφύσια και η κύρια ζώνη καύσης (τώρα προαναμεμιγμένη) μετατοπίζεται σε μια περιοχή κατάντη του venturi του φλογοθαλάμου όπου αναφλέγεται από την δευτερεύουσα ζώνη φλόγας. (εικόνα 2-25c) Το venturi αποτελείται από ένα τμήμα συγκλίνον/αποκλίνον που επιταχύνει την ροή από το πρώτο στάδιο για να αποτρέψει ξαφνική επανένανση. Επίσης δημιουργεί μια σπειροειδή ζώνη επανακυκλοφορίας πάνω στην κωνική επιφάνεια του για να σταθεροποιήσει την κύρια ζώνη καύσης σε αυτόν τον προαναμεμιγμένο τρόπο που επιτυγχάνεται στο σημείο σχεδιασμού της μηχανής. Αυτός ο τρόπος ανταποκρίνεται σε χαμηλές εκπομπές ρύπων.

Αν χρειαστεί και οι κύριοι και οι δευτερεύοντες εγχυτήρες καύσιμου μπορούν να γίνουν διπλού καύσιμου στόμια, για να επιτρέψουν αυτόματη μεταφορά από αέριο σε πετρέλαιο σε όλο το εύρος φορτιού. Το σύστημα μπορεί να πετύχει NOx και CO επίπεδα των 9 και 25 ppm αντίστοιχα, σε βασικό φορτίο όταν λειτουργεί με φυσικό αέριο. Με τα υγρά καύσιμα, οι ρύποι NOx και CO από τον DLN καυστήρα σε φορτία λιγότερα του 20% του βασικού φορτιού είναι παρόμοιοι σε αυτά λαμβάνονται από τον κανονικό καυστήρα. Αυτό το αποτέλεσμα δεν προκαλεί έκπληξη γιατί και τα δυο συστήματα περιλαμβάνουν φλόγες διάχυσης σε αυτό το εύρος. Ο καυστήρας λειτουργεί με το σύστημα lean-lean ανάμεσα στο 20% και στο 50% φορτιού και στο προεναμεμιγμένο τρόπο από 50% έως 100% φορτιού. Οι NOx εκπομπές είναι χαμηλότερες από τον κανονικό καυστήρα αλλά μεγαλύτερες από τα χαμηλά επίπεδα που επιτυγχάνονται με αέριο στον προαναμεμιγμένο τρόπο. Με την έγχυση νερού, ο καυστήρας πετυχαίνει επίπεδα NOx και CO των 42 και 20 ppm αντίστοιχα, σε βασικό φορτίο που λειτουργεί με απόσταγμα καυσίμου πετρελαίου.

- ABB EV καυστήρας

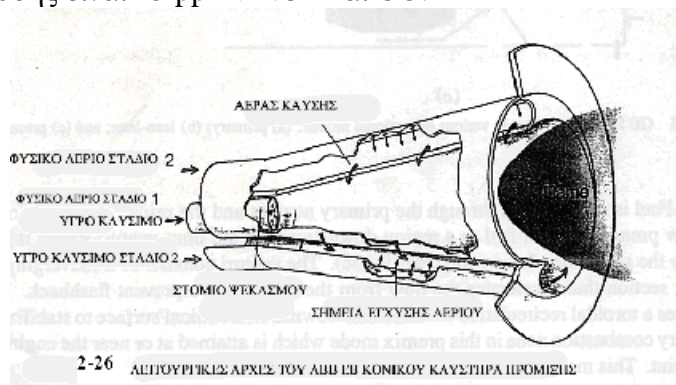
Η εταιρία ABB ανεπτυξε ένα κωνικό προαναμεμιγμένο τύπο καυστήρα που ονομάζεται EV-καυστήρας, που είχε καλή αποδοτικότητα σε ένα μεγάλο εύρος στεγνών χαμηλού NOx εφαρμογών καύσης. Μια άποψη διατομής που δείχνει τις αρχές λειτουργίας του καυστήρα φαίνεται στην εικόνα 2-26. Ο κάθε καυστήρας σχηματίζεται από δυο αντισταθμισμένους μισούς κώνους που έχουν μετατοπιστεί για να διαμορφώσουν δυο διαμετρικά αντίθετες θέσεις για εισαγωγή αέρα. Αέρια καύσιμα εγχέονται μέσα στον αέρα καύσης που ρέει στις θέσεις με τη βοήθεια δυο σωλήνων παροχής που περιέχουν σειρές από μικρές τρύπες που εγχέουν το καύσιμο μέσα στο ρεύμα του αέρα. Σχετικά ολοκληρωμένη μίξη του καύσιμου και του αέρα λαμβάνονται λίγο αργότερα από την έγχυση και η στροβιλισμένη μίξη ρέει έξω από τον κώνο και μέσα στη ζώνη φλόγας. Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό αυτού του καυστήρα είναι ότι η σταθεροποίηση της φλόγας επιτυγχάνεται σε κενό χώρο δίπλα στο καυστήρα λόγω του ξαφνικού σπασίματος της στροβιλιζόμενης ροής.

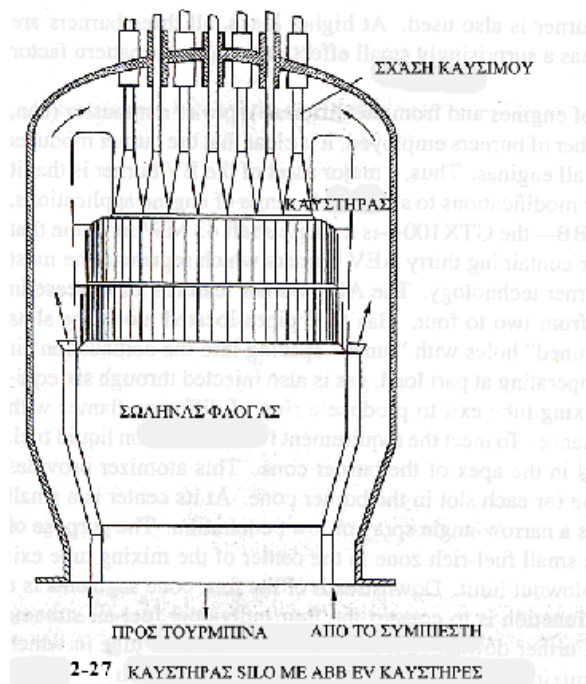
Η εγκατάσταση μπορεί να λειτουργεί ικανοποιητικά και με αέρια και με υγρά καύσιμα. Τα υγρά εγχέονται στη κορυφή του κώνου με τη χρήση ενός ψεκαστήρα τύπου πίεσης ή υποβοήθησης με αέρα. Το καύσιμο δεν έχει εξατμιστεί πλήρως όταν φτάνει την ζώνη σταθεροποίησης και μια τύπου διάχυσης φλόγα διεισδύει μέσα στον καυστήρα, που εξηγεί γιατί δεν χρειάζεται πιλοτικό στάδιο για να επιτύχουμε επαρκή σταθερότητα φλόγας. Επίσης, επειδή η φλόγα δεν ακουμπά ποτέ τα τοιχώματα το κωνικό σώμα παραμένει καθαρό και οι θερμοκρασίες των μεταλλών είναι σχετικά χαμηλές.

Από τα διαφορετικά μεγέθη κινητήρων και από τους διαφορετικούς τύπους καυστήρων (σωληνοειδής, δακτυλοειδής και αναρροφήσεως) και των αριθμών των θαλάμων καύσης που απασχολούνται, είναι ξεκάθαρο ότι οι καυστήρες δεν μπορούν να έχουν το ίδιο μέγεθος για

όλους τους κινητήρες. Έτσι, ένα μεγάλο προσόν του καυστήρα EV είναι ότι μπορεί να αλλάξει μέγεθος μόνο με λίγες τροποποιήσεις για να ταιριάζει σε ένα μεγάλο εύρος κινητήρων.

Ο πιο πρόσφατος κινητήρας από την ABB, ο GTX100, είναι μια μονοαξονική 43 MW μηχανή που περιλαμβάνει ένα δακτυλιοειδή καυστήρα που περιέχει καυστήρες AEV. Ο καυστήρας AEV περιλαμβάνει μια αύξηση του αριθμού των εσωτερικών υποδοχών αέρα από δυο σε τέσσερις. Οι σωλήνες που τροφοδοτούν αέριο που είναι τοποθετημένες κατά μήκος των υποδοχών, εγχέουν αέριο καύσιμο μέσα από “συντονισμένες” τρύπες με “συντονισμένο” χώρο μέσα στον αέρα καύσης που ρέει μέσα στις υποδοχές. Όταν λειτουργεί σε μερικό φορτίο, το αέριο εγχέεται και μέσα από έξι όσων διαστημάτων τρύπες γύρω από την έξοδο κάθε σωλήνα ανάμιξης για να παράγει ένα δαχτυλίδι από φλόγες διάχυσης με καλή απόδοση αδύναμης εξαφάνισης. Για να ανταποκριθεί στην ανάγκη της λειτουργίας με υγρό καύσιμο ένας ψεκαστήρας πίεσης τοποθετείται στην κορυφή του κώνου του καυστήρα. Ο ψεκαστήρας παρέχει τέσσερις ξεχωριστούς ψεκαστήρες καύσιμου, ένα για κάθε υποδοχή στον κώνο του καυστήρα. Στο κέντρο του είναι ένας μικρός ψεκαστήρας-πλότος που παράγει ένα στενής γωνίας ψεκασμό χαμηλής διεισδυτικότητας. Ο σκοπός αυτού του στομίου είναι να δημιουργήσει μια μικρή πλούσια σε καύσιμο ζώνη στο κέντρο της εξόδου του σωλήνα ανάμιξης και ως εκ τούτου να παρατείνει το πτωχό όριο έκρηξης. Κατάλη των τεσσάρων κώνων είναι ένα κοντό κομμάτι μετάβασης που η λειτουργία του είναι να μετατραπεί τα τέσσερα ξεχωριστά ρεύματα αέρα σε μια μονό συνδεδεμένη ροή. Ποιο κάτω είναι ένας κυλινδρικός σωλήνας ανάμιξης μέσα στον οποίο γίνεται η εξάτμιση του καύσιμου και η ανάμιξη αέρα-καύσιμου. Η εκροή του σωλήνα ανάμιξης μετά, εκκενώνετε μέσα σε ένα δακτυλιοειδή φλογοθάλαμο όπου η φλόγα διατηρείται σε κενό χώρο. Η αποδοτικότητα των εκπομπών του καυστήρα AEV στον GTX100 κινητήρα ανάμεσα στο 50% και στο 100% πλήρες φορτίου είναι 15 ppmv NOx και CO σε αέριο καύσιμο. Σε πετρέλαιο εσωτερικής καύσης είναι 25 ppmv NOx και CO.

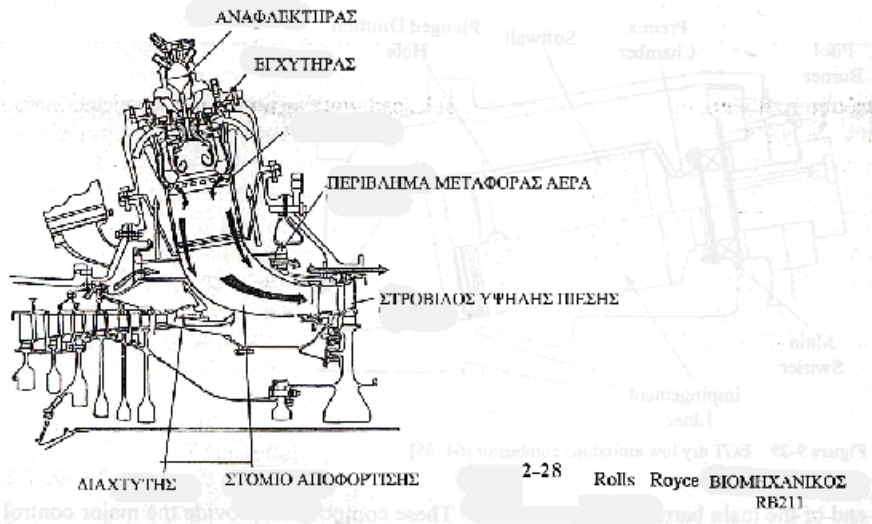




- Rolls Royce RB211 Βιομηχανικός καυστήρας

Η περισσότερη από την λειτουργική εμπειρία που αποκομίζεται από τη ξηρή χαμηλών εκπομπών τεχνολογία, προέρχεται κυρίως από βαρέως τύπου αεροστρόβιλους που οι εφαρμογές τους καλούν για μεγάλες περιόδους λειτουργίας με βασικό φορτίο. Όμως, υπάρχουν πολλές άλλες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα μηχανική κίνηση για συμπιεστές αγωγών, όπου χρειάζεται σημαντική ευελιξία λειτουργίας. Οι κινητήρες αερίωθησης έχουν πολλά να προσφέρουν για το θέμα αυτό, και υπάρχει ένας αριθμός στατικών κινητήρων στην κατηγορία του μικρομεσαίου μεγέθους που προέρχεται από επιτυχημένους υψηλών επιδόσεων αεροκινητήρες. Ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα είναι ο Rolls Royce RB211 κινητήρας στον οποίο ο δακτυλιοειδής αεροκαυστήρας έχει αντικατασταθεί από εννέα ακτινικά τοποθετημένους, αντίθετης ροής καυστήρες, (εικόνα 2-28). Αυτή η διαμόρφωση έχει ως αποτέλεσμα μια αύξηση 80% στον όγκο της καύσης. Η κύρια ζώνη τροφοδοτείται από δυο αντίθετης περιστροφής στροβιλιστές αέρα, με αρκετά σημεία έγχυσης αερίου καύσιμου τοποθετημένα σε κάθε πέρασμα στροβιλισμού. Ο δευτερεύον αγωγός μίξης είναι τυλιγμένος γύρω από τον κύριο καυστήρα αλλά είναι αποκομμένος από τον καυστήρα με έναν άλλο δακτυλιοειδή αγωγό ο οποίος παρέχει τον αέρα ψύξης τοιχωμάτων. Αέριο καύσιμο εγχέεται από τον δευτερεύον αγωγό από 36 ισαπέχουσες ακτινικές μπάρες ψεκασμού, όπου η κάθε μια περιέχει έξι υποδοχές έγχυσης. Αυτή η διαμόρφωση μπάρας καύσιμου, καθορίστηκε από υπολογισμούς τροχιάς. Δειγματοληψία καυσίμων και τεστ καύσης έδειξαν ομοιομορφία μίξης καύσιμου-αέρα κοντά στο 4%. Τεστ καύσης πραγματοποιήθηκαν σε ένα εύρος πιέσεων από 0,1 έως 0,2 MPa και είχε να επιδείξει την ικανότητα αυτού του αξονικά διατεταγμένου, χαμηλών εκπομπών (DLE) καυστήρα να επιτυχαίνει ταυτόχρονα χαμηλά NOx και CO σε μεγάλο εύρος δυναμικής και περιβαλλοντικής θερμοκρασίας χωρίς να καταφύγουμε σε μεταβαλλόμενη γεωμετρία και έκχυση αέρα. Επιδείχτηκε επίσης ότι μια ομοιόμορφη παροχή καύσιμου πριν τη καύση είναι ιδανική για να επιτύχουμε χαμηλές εκπομπές ειδικά σε μεγάλες πιέσεις. Βασισμένοι στις πληροφορίες των τεστ που έχουμε έως τώρα, σε καταστάσεις

μεγίστου φορτιού οι προβλεπόμενοι ρύποι του κινητήρα είναι 17 ppmv NOx, 5 ppmv CO και μηδέν UHC.



- EGT DLN Καυστήρας

Η Ευρωπαϊκή εταιρία αεριοστρόβιλων (European Gas Turbine-EGT) υιοθέτησε ένα απλό γεωμετρικό, μερικώς προαναμεμιγμένο σύστημα για τον G30 DLN καυστήρα της. Ο στόχος ρύπων NOx των 25 ppmv επιτυγχάνεται με την μερική προανάμιξη του καυσίμου με το μισό του συνολικού αέρα καύσης που ρέει. Επίσης, η ενσωμάτωση μιας ψυχόμενης με επικάλυψη θερμικής μπάρας φλογοθαλάμου μειώνει δραματικά την επίδραση σβέσης των τοιχωμάτων που σχετίζονται με συμβατικούς ψύξης με φιλμ φλογοθαλάμους και περιορίζει τις εκπομπές CO και UHC σε κάτω από 50 και 20 ppmv αντίστοιχα.

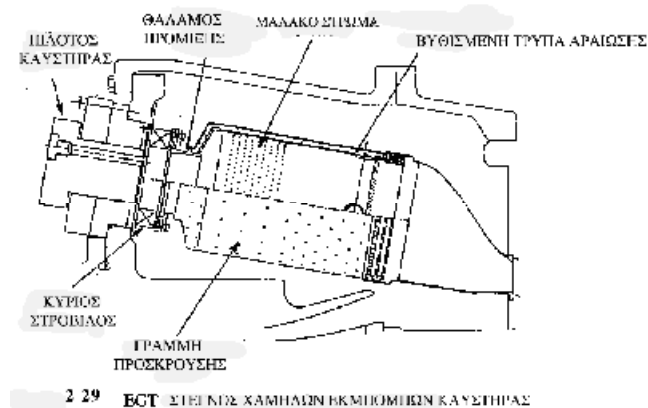
Τα οξειδωτικά χαρακτηριστικά του G30 καυστήρα δείχνονται σχηματικά στην εικόνα 2-29. Η βασική φιλοσοφία σχεδιασμού είναι η επίτευξη καλής μίξης σε υψηλές θερμοκρασίες για να μειωθεί η παράγωγή NOx και σχετικά καλή μίξη σε χαμηλότερες θερμοκρασίες για να έχουμε καλή σταθερότητα και χαμηλές CO/UHC εκπομπές.

Ο σωληνοειδής καυστήρας ενσωματώνει ένα μικρό ακτινικής εισροής στροβιλιστή, μια υποδοχή στροβιλισμού στο σύστημα εισαγωγής καυσίμου και ένα θάλαμο προανάμιξης, όλα προσκολλημένα στο πάνω μέρος του κυρίου κυλίνδρου του καυστήρα. Αυτά τα μέρη παρέχουν τον έλεγχο του αέρα καύσης, της έγχυσης του καυσίμου και της ανάμιξης. Η ανάφλεξη και η σταθεροποίηση της φλόγας γίνεται μέσα στο πυρήνα του στροβίλου του προθαλάμου. Υγρό καύσιμο εγχέεται στην είσοδο της κάθε υποδοχής στροβιλισμού μέσα από ένα τζέτ μέτρησης που είναι προστατευόμενο κάτω από ένα σημείο στην πάνω μεριά της υποδοχής. Σε χαμηλές ροές καυσίμου, αντίστοιχα σε χαμηλές θερμοκρασίες φλόγας, το εγχέομενο καύσιμο παραμένει κοντά στο πίσω μέρος του τοιχώματος της υποδοχής και παραδίδει ένα ανεπαρκώς αναμεμιγμένο μίγμα αέρα-καυσίμου στον προθάλαμο. Με την αύξηση της ροής καυσίμου, το καύσιμο διεισδύει περισσότερο κατά μήκος του στροβιλιστή

υποδοχής και αναμιγνύεται καλύτερα με τον στροβιλιζόμενο αέρα, και ως εκ τούτου παρέχει μια πιο ομοιογενή μίξη στην ζώνη καύσης.

Κατά την έναρξη και την επιτάχυνση του κινητήρα υπάρχει η ανάγκη για μια οδηγό φλόγα υψηλής σταθερότητας και αποδοτικότητας. Αυτή παρέχεται από τον πιλότο/αναφλεκτήρα καυστήρα που είναι κεντρικά τοποθετημένος στη κορυφή του προθαλάμου (εικόνα 2-29). Η ποσότητα καύσιμου που παρέχεται στον πιλότο κάτω από συνθήκες έναρξης και επιτάχυνσης, ρυθμίζεται αυτόματα για να πετυχει ομαλή και σταθερή έναρξη. Σε μέγιστη ταχύτητα κινητήρα, χωρίς φορτίο ή με χαμηλή θερμοκρασία, η πιλοτική αναλογία καύσιμου είναι σχετικά μεγάλη (γύρω στο 50%) για να βοηθήσει στη σταθερότητα της φλόγας σε αυτές τις πτωχές σε καύσιμο συνθήκες. Αυτή η αναλογία σταδιακά μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας της φλόγας και φτάνει στην ελαχίστη τιμή της στο μέγιστο φορτίο.

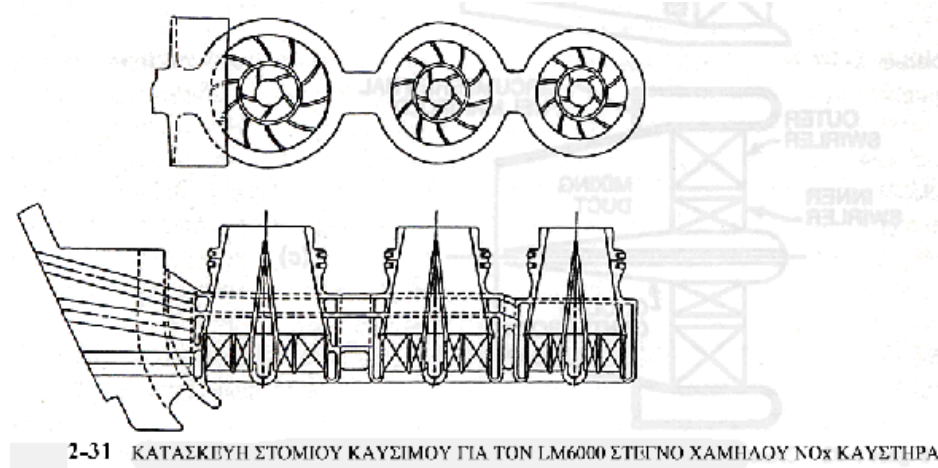
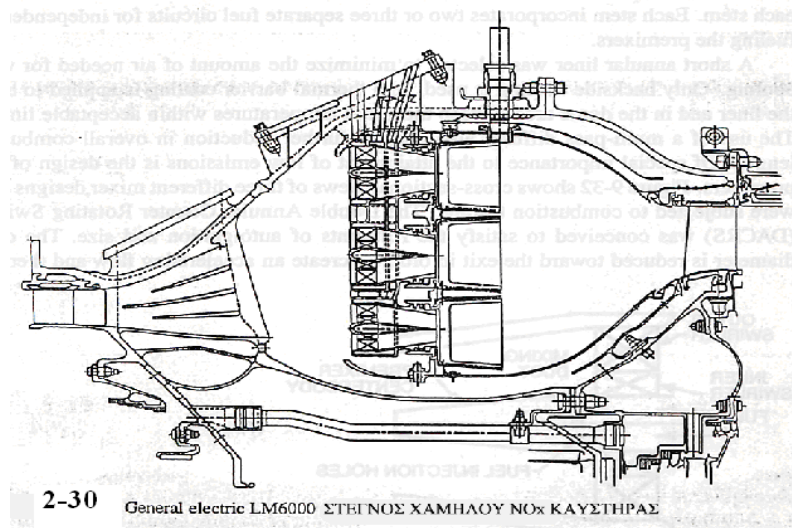
Ο G30 καυστήρας σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε αρχικά για τον 4,9 MW Typhoon αεριοστρόβιλο. Προορίζεται να είναι τεχνικά αναβαθμισμένος για τους EGT Typhoon/Tornado/Tempest κινητήρες. (<10MW). Έχουν επιτευχθεί εκπομπές βασικού φορτίου: NOx κάτω από 15 ppmv και 10 ppmv CO με μηδενικό UHC για τον Tornado μονοαξονικό βιομηχανικό κινητήρα.



- General Electric LM6000 Καυστήρας

Άλλος ένας σημαντικός κινητήρας αερίωσης αεριοστρόβιλος είναι ο GE LM6000. Η εικόνα 2-30 δίνει μια εικόνα διατομής του στεγνού χαμηλού NOx καυστήρα που έχει σχεδιαστεί γιατί το κινητήρα. Αυτός ο προαναμιξης καυστήρας περιλαμβάνει σχεδόν το διπλάσιο όγκο του συμβατικού δακτυλιοειδή καυστήρα που αντικαθιστά για να διατηρεί χαμηλά επίπεδα CO και UHC ενώ μειώνει δραστικά τις έπεμπες NOx. Μέρος του αέρα που χρησιμοποιείται στην καύση, που σε μέγιστη ισχύ είναι γύρω στο 80% του συνολικής ροής αέρα καυστήρα, ρέει μέσα στην ζώνη καύσης μέσα από 3 δακτυλιοειδή δαχτυλίδια προαναμικτων. (εικόνα 2-30). Τα δυο εξωτερικά δαχτυλίδια έχουν το καθένα 30 αναμίκτες αέρα-καύσιμου, ενώ το εσωτερικό δαχτυλίδι έχει 15. Αυτή η διαμόρφωση των αναμικτών διευκολύνει την σταδιοποίηση καύσιμου σε μερικού φορτίου λειτουργία. Το σύνολο των 75 στομιών σχηματίζεται με το να έχουμε 15 κύρια μέρη με το κάθε ένα να έχει 3 αναμίκτες.

(εικόνα 2-31) συν 15 σημεία με δυο αναμίκτες στο κάθε ένα. Το κάθε τέτοιο σημείο ενσωματώνει 2 ή 3 διαφορετικές διαδρομές καυσίμου για ανεξάρτητη τροφοδότηση των αναμικτών.

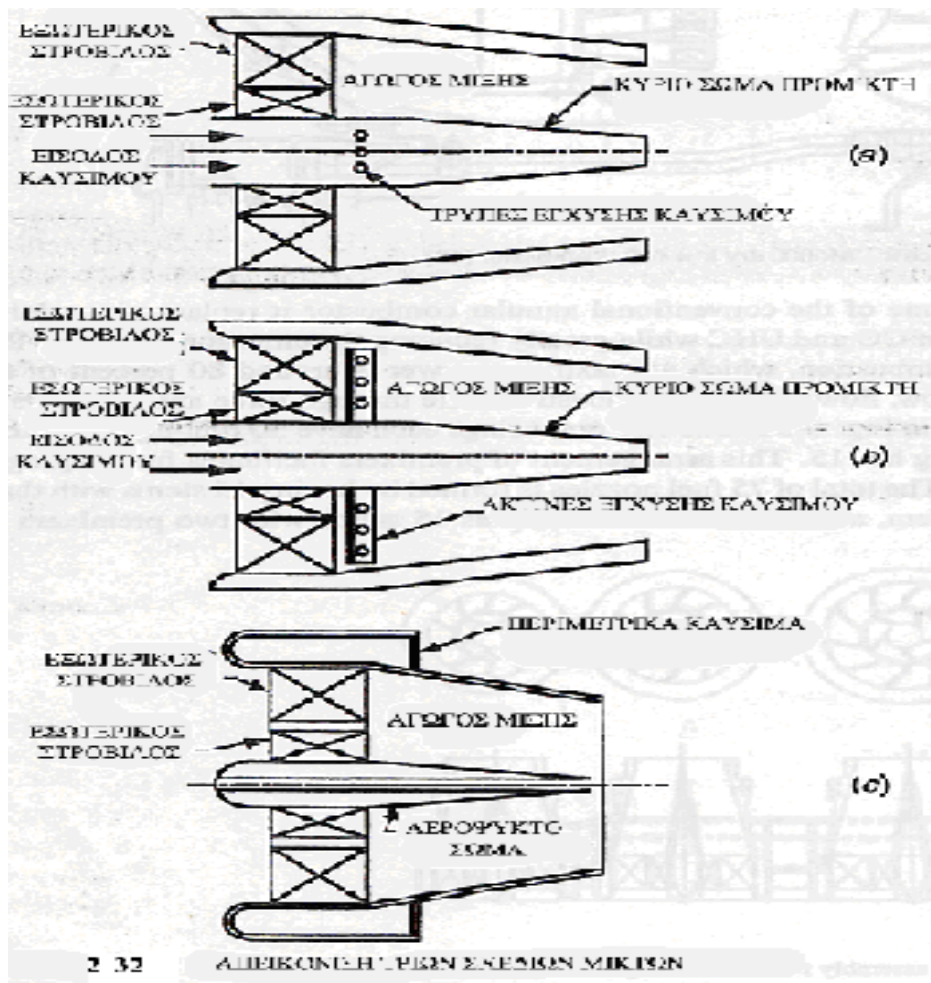


Ένας κοντός δακτυλιοειδής φλογοθάλαμος επιλέχτηκε για να ελαχιστοποιήσει την ποσότητα αέρα που χρειάζεται για την ψύξη τοιχωμάτων. Μόνο οπίσθια ψύξη χρησιμοποιείται και έτσι μια επένδυση θερμικής μπάρας χρησιμοποιείται και στο φλογοθάλαμο στην περιοχή του θόλου για να κρατήσει τις θερμοκρασίες μετάλλου χαμηλές. Η χρήση του πολλαπλών περασμάτων διαχύτη επίσης επιτρέπει ακόμα περισσότερο μείωση στο συνολικό μήκος του καυστήρα. Μεγάλης σημασίας στην επίτευξη χαμηλών εκπομπών είναι το σχέδιο των προ-αναμικτών. Η εικόνα 2-32 δείχνει όψη διατομής τριών διαφορετικών σχεδίων ανάμικτων που υποβλήθηκαν σε τεστ καύσης. Ο Double Annular Counter Rotating Swirler (DACRS) σχεδιάστηκε να ικανοποιεί τους περιορισμούς της αυτόματης ανάφλεξης και του μεγέθους. Η διάμετρος του σωλήνα μειώνεται προς την έξοδο για να δημιουργήσει μια επιταχυνόμενη ροή και ως εκ τούτου να αποτρέψει ταχεία επανένωση. Το κωνικό κύριο σώμα που είναι τοποθετημένο κατά μήκος της κεντρικής γραμμής του προαναμίκτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτεί καύσιμο σε ένα ψεκάστρα στην κορυφή του καθώς και αέρια για διάχυση σε χαμηλής ισχύος συνθήκες.

Ο σκοπός με αυτό το τύπο συσκευής μίξης είναι να παραχθεί ένα ολοκληρωτικά ομοιογενές μίγμα καύσιμου και αέρα στην έξοδο του προαναμίκτη. Καθώς η συνολική περιοχή των τρυπών έγχυσης καύσιμου καθορίζεται από τη συχνότητα ροής και την διαθέσιμη πίεση έγχυσης καύσιμου, η διαδικασία σχεδιασμού είναι να βρεθεί ο κατάλληλος συνδυασμός ανάμεσα στην επιθυμία για τις μικρές τρύπες έγχυσης να δίνουν ένα μεγάλο αριθμό από σημεία έγχυσης καύσιμου και η εξίσου σημαντική ανάγκη των μεγάλων τρυπών έγχυσης να επιτρέπουν στις δέσμες καυσίμων να εισχωρούν κατά μήκος του ρεύματος αέρα.

Στο σχέδιο προαναμικτη που έχει ορίσει ως DACRS στην εικόνα 2.32α, το καύσιμο εγχέεται ακτινικά προς τα έξω στο ρεύμα αέρα από τρύπες στο κεντρικό σώμα κατάντη των πτερυγίων στροβιλισμού. Αυτή η διαμόρφωση έπασχε από μη ικανοποιητική εισχώρηση δεσμών καυσίμου, έτσι λοιπόν έγινε μια τροποποίηση με την προσθήκη 8 ακτινών στην τοποθεσία των τρυπών στο κύριο σώμα (εικόνα 2.32β). Κάθε ακτίνα έχει 3 τρύπες για να εγχέεται αέριο καύσιμο κάθετα στο αιωρούμενο ρεύμα αέρα. Τεστ καύσης αυτού του DACRS II μίκτη, έδειξαν ότι μονοψήφια νούμερα εκπομπών NOx είναι εφικτά με αυτό το σχεδιασμό. Μια επιπλέον τροποποίηση στο σχεδιασμό του προαναμικτη αυτού έγινε με την προσθήκη τρυπών έγχυσης μέσα στα πτερύγια στροβιλισμού του εξωτερικού στροβιλιστή (εικόνα 2.32γ). Σε αυτή τη διαμόρφωση, το καύσιμο εγχέεται μέσα από 3 τρύπες στο πίσω άκρο κάθε εξωτερικού πτερυγίου στροβιλιστή και από μια οπή στα εξωτερικά τοιχώματα ανάμεσα σε κάθε πτερύγιο. Καύσιμο τροφοδοτείται στα εξωτερικά πτερύγια μέσα από ένα πολλαπλή στο εξωτερικό του αγωγού προανάμιξης. Οι εκπομπές NOx που λαμβάνονται με τον DACRS III μίκτη ήταν παρόμοιες με το σχέδιο DACRS II.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα του σχεδίου του προαναμίκτη ήταν, ότι όταν αναπτυσσόταν, είχε εφαρμογή σε μεγάλο εύρος μεγεθών καυστήρων, όπως συζητήθηκε παραπάνω σε σχέση με τον ABB-EV καυστήρα. Αυτό το βασικό σχέδιο παραμένει το ίδιο άσχετα από το μέγεθος του καυστήρα. Μόνο ο αριθμός και η διαμόρφωση αλλάζει. Έτσι, οι DACRS II και DACRS III μίκτες μπορούν να εφαρμόσουν σε ένα εύρος GE κινητήρων, περιλαμβανόμενων των LM1600, LM2500 και LM6000, επειδή μονοψήφια νούμερα εκπομπών NOx μπορούν να επιτευχθούν και με τους δυο αυτούς μίκτες σε καταστάσεις ελέγχου που προσομοιώνουν το εύρος λειτουργίας αυτών των κινητήρων.



- Allison AGT100 Καυστήρας

Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτού του καυστήρα, (εικόνα 2-33) είναι: περιλαμβάνει ένα προθάλαμο μέσα στον οποίο το καύσιμο εξατμίζεται και αναμιγνύεται με αέρα, ένα πιλοτικό θάλαμο καθώς και θάλαμο ανάφλεξης, και τον κυρίως κυλινδρικό θάλαμο. Μεταβλητή γεωμετρία χρειάζεται για να ελέγχεται η στοιχειομετρία στην κύρια ζώνη.

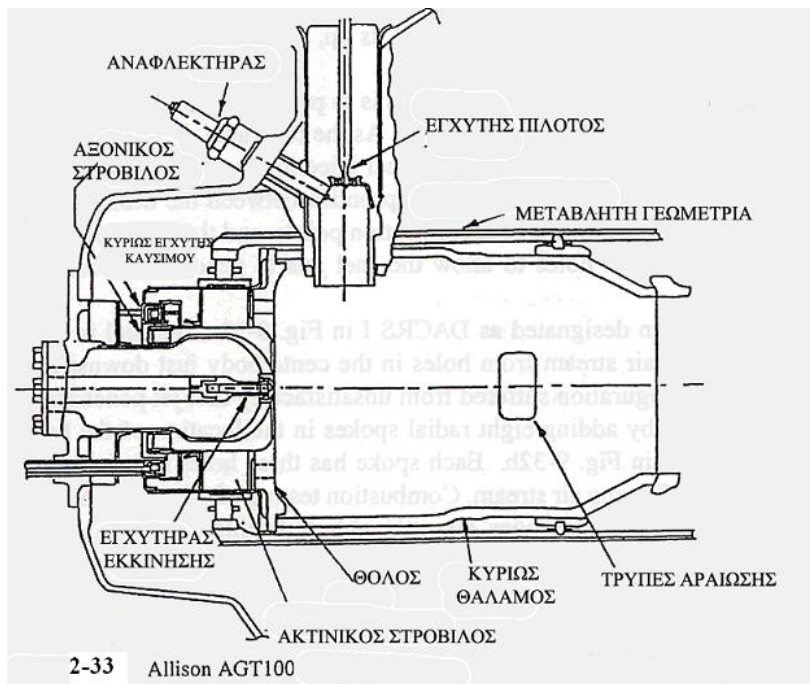
Ο προθάλαμος περιέχει ένα κύριο σώμα που έχει μέσα και τον κύριο εγχυτήρα καύσιμου και ένα στόμιο-πilotο που χρησιμοποιείται μόνο για να ανάψει και να επιταχύνει το κινητήρα σε ταχύτητα ρελαντί. Το καύσιμο εισάγεται από μια πολλαπλή που περικυκλώνει το προθάλαμο κατόπιν του αξονικού στροβιλιστή του προθαλάμου. Ομοίμορφη μεμβράνη του καύσιμου επιτυγχάνεται με τον ψεκασμό του μέσα από 8 εφαπτόμενες τρύπες στην χαραγμένη επιφάνεια του προθαλάμου.

Ο αέρας στροβιλισμού βοηθά στην διαδικασία προ-μεμβρανοποίησης. Οι υψηλές θερμοκρασίες του εσωτερικού αέρα και των τοιχωμάτων του προθαλάμου συνδυάζονται για να παροτρύνουν την γρήγορη εξάτμιση του καύσιμου μέσα στο προθάλαμο. Σε ισχύ μεγαλύτερη από τη ρελαντί ισχύ, επιπλέον αέρας μπαίνει στο προθάλαμο μέσω ενός ακτινικού στροβιλιστή για να ενωθεί και να αναμιχτεί με τον αέρα που αιωρείται μέσα από τον αξονικό στροβιλιστή.

Η έναρξη του κινητήρα γίνεται μέσα σε ένα μικρό πιλοτικό θάλαμο τοποθετημένο στη μεριά του κυρίου θαλάμου καύσης. Αυτή η συσκευή-πιλότος επίσης εξυπηρετεί σαν μια πηγή διατήρησης όταν ο καυστήρας λειτουργεί σε χαμηλές θερμοκρασίες εσωτερικού αέρα η σε συνθήκες έξω από τα κανονικά πτωχά όρια ευφλεξιμότητας.

Το στροβιλιζόμενο εξατμισμένο μίγμα καύσιμου-αέρα ρέει μέσα στο κύριο θάλαμο μέσα από ένα κυκλικό άνοιγμα στο κέντρο του θόλου. Σε μεγάλες ισχύεις, επιπλέον αέρας εγχέεται στο κύριο θάλαμο μέσα από 8 τρύπες που είναι τρυπημένες με ένα τρόπο σχεδιασμένο να μεταδίδει στροβιλώδη κίνηση στο αέρα. Τέσσερεις απλές ορθογώνιες τρύπες αραίωσης επιλέχθηκαν για να διευκολύνουν την κατασκευή του κεραμικού φλογοθαλάμου. Μεταβλητή γεωμετρία, στη μορφή συρόμενων ζωνών, χρησιμοποιείται για να μεταβάλλει και να ελέγχει τις περιοχές ροής των οπών αραίωσης και του ακτινικού στροβιλιστή στο προθάλαμο. Σε χαμηλή ισχύ, το μεγαλύτερο μέρος του αέρα ρέει μέσα από τρύπες αραίωσης. Καθώς η ροή του καύσιμου αυξάνεται πάνω από το ρελαντί, η μεταβαλλόμενη γεωμετρία μετακινείται για να αυξήσει την ροή αέρα μέσα από τον ακτινικό στροβιλιστή και για να μειώσει σε ένα αντίστοιχο ποσοστό την ροή αέρα μέσα από τις τρύπες αραίωσης.

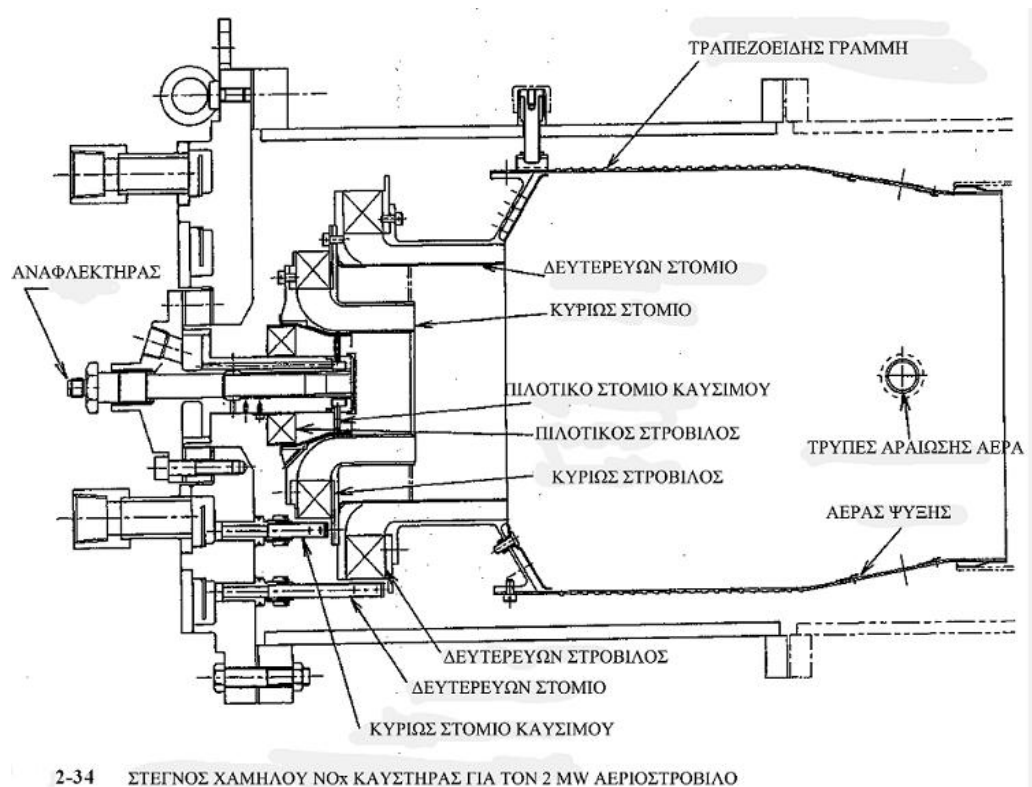
Η χρήση της μεταβλητής γεωμετρίας επέτρεψε στον AGT100 καυστήρα να επιτύχει τους στόχους του προγράμματος. 5 και 37g/kg καύσιμου για NO_x και CO αντίστοιχα.



- Πρόοδοι στην Ιαπωνία

Οι αυστηροί NO_x κανονισμοί στην Ιαπωνία προώθησαν διάφορες στη ξηρή χαμηλή NO_x καύση. Υιοθετήθηκε μια τριών σταδίων διαμόρφωση στο σχέδιο του ενός στεγνού χαμηλού NO_x καυστήρα για εφαρμογή σε μια 2 MW φυσικού αερίου μηχανή. Το σχέδιο φαίνεται σχηματικά στην εικόνα 2-34. Η συνδεσμολογία του καυστήρα περιλαμβάνει πρωτεύοντα και δευτερεύοντα δακτυλοειδή στόμια και ένα στόμιο πιλότο στο κέντρο. Το σχέδιο της έγχυσης καύσιμου για τους 3 ομοαξονικά τοποθετημένους καυστήρες χωρίζεται σε τρεις λειτουργίες. Η λειτουργία 1 απασχολεί και το πιλότο και τα πρωτεύοντα στόμια με όμοια ροή καύσιμου στο καθένα. Χρησιμοποιείται για να διατηρεί καύση από την αρχή μέχρι

το 50% των συνολικών rpm του κινητήρα. Σε αυτό το σημείο, το προγραμματισμένο σύστημα αλλάζει σε λειτουργία 2 στην οποία η πιλοτική ροή καύσιμου κρατιέται σταθερή και η πρωτεύουσα ροή καύσιμου αυξάνεται με την αύξηση του φορτίου μέχρι το 50% του βασικού φορτίου. Στη λειτουργία 3, η πιλοτική και η πρωτεύουσα ροή καύσιμου παραμένουν και οι δυο σταθερές και η δευτερεύουσα ροή καύσιμου αυξάνεται με την αύξηση του φορτίου από 50% μέχρι το 100% του βασικού φορτίου. Τεστ που έγιναν σε αυτόν τον καυστήρα σε πίεση των 1.18MPa και σε εσωτερική θερμοκρασία των 643 K έδειξαν επίπεδα NOx των 10 ppm (για 16% O₂) σε βασικό φορτίο, και αποτελεσματικότητα καυστήρα πάνω από 99.8 % σε όλα τα φορτία πάνω από 50%.



2-8 ΠΤΩΧΗ ΠΡΟ-ΑΝΑΜΕΜΙΓΜΕΝΗ ΠΡΟ-ΕΞΑΤΜΙΣΜΕΝΗ ΚΑΥΣΗ

Ένα κοινό χαρακτηριστικό όλων των ξηρών χαμηλού NOx καυστήρων που περιγράφηκαν παραπάνω είναι ότι θετικές προσπάθειες γίνονται για να εξαλείψουν τοπικές περιοχές μεγάλης θερμοκρασίας μέσα στη φλόγα, αναμιγνύοντας καύσιμο και αέρα πάνω από την ζώνη καύσης. Η ιδέα πτωχή προανάμιξη-προεξάτμιση (Lean Premix Pre-ignite, LPP) αντιπροσωπεύει το απόλυτο σε αυτό το πλαίσιο. Η βασική αρχή είναι να παρέχει στην ζώνη καύσης ένα ολοκληρωτικά ομοιογενές μίγμα αέρα καύσιμου και μετά να λειτουργεί σε ένα λόγο ισοδυναμίας που είναι πολύ κοντά στο πτωχό όριο ευφλεκτότητας. Όσο μικρότερο το περιθώριο ανάμεσα σε σταθερή καύση και στο σβήσιμο της φλόγας τόσο μικρότερη θα είναι η εκπομπή NOx.

Ένας τυπικός τέτοιου τύπου LPP καυστήρας μπορεί να χωριστεί σε 3 κύριες περιοχές. Η πρώτη περιοχή είναι για έγχυση καύσιμου, εξάτμιση καύσιμου και μίξη αέρα-καύσιμου. Η λειτουργία της είναι να επιτυχαίνει ολοκληρωτική εξάτμιση και ολοκληρωτική

μίξη αέρα και καύσιμου πριν τη καύση. Με την εξάλειψη της καύσης σταγονιδίων και με την παροχή της ζώνης καύσης με ένα ομοιογενές μίγμα χαμηλής αναλογίας ισοδυναμίας, η διαδικασία καύσης προχωρεί σε μια ομοιόμορφα χαμηλή θερμοκρασία και δημιουργείτε πολύ λίγο NOx. Στη δεύτερη περιοχή η φλόγα σταθεροποιείται με την δημιουργία μιας η περισσότερων ζωνών επανακυκλοφορίας. Η καύση ολοκληρώνεται σε αυτή τη περιοχή και τα παραγόμενα προϊόντα μετά ρέουν στην τρίτη περιοχή που μπορεί να περιέχει μια σχετικά συμβατική ζώνη αραίωσης.

Ένα χρήσιμο υποπροϊόν αυτού του είδους καύσης είναι ότι είναι κατ' ουσίαν απαλλαγμένη από δημιουργία άνθρακα, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται αέρια καύσιμα, στην οποία περίπτωση πτωχή πρόμιξη (Lean Premixed, LPM) είναι η πιο πρόβλεψη. Η απουσία άνθρακα όχι μόνο εξαλείφει εκπομπές αιθάλης αλλά επίσης μειώνει σημαντικά την ποσότητα της θερμότητας που μεταφέρεται στα τοιχώματα του φλογοθαλάμου με την ακτινοβολία, και έτσι μειώνει την ποσότητα του αέρα που χρειάζεται για την ψύξη των τοιχωμάτων του φλογοθαλάμου. Αυτός είναι ένας σημαντικός παράγοντας επειδή σημαίνει ότι περισσότερος αέρας είναι διαθέσιμος για να χαμηλώνει την θερμοκρασία της ζώνης καύσης και για να βελτιώνει το pattern factor του καυστήρα.

Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι για φλόγες που η θερμοκρασία υπερβαίνει τα 1900 K για την ποσότητα NOx που δημιουργείται δεν αυξάνεται με το χρόνο παραμονής του. Αυτό σημαίνει ότι αυτά τα συστήματα μπορούν να σχεδιαστούν με μεγάλους χρόνους παραμονής για την επίτευξη χαμηλού CO και UHC ενώ παραμένει χαμηλό το NOx. Αυτό το εύρημα είναι σημαντικό για τους βιομηχανικούς κινητήρες όπου το μέγεθος είναι λιγότερο σημαντικό από τους αεροκινητήρες. Όπως επισημάνθηκε παραπάνω, αυτή η προσέγγιση οδηγεί σε ένα όγκο καυστήρα LPM που είναι περίπου διπλάσιος σε μέγεθος από ένα συμβατικό καυστήρα.

Το κύριο πρόβλημα με αυτό το σχέδιο είναι ότι ο μεγάλος χρόνος που χρειάζεται για την εξάτμιση καυσίμου και για την προανάμιξη καυσίμου-αέρα πάνω από την ζώνη καύσης μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα στην εμφάνιση αυτανάφλεξης στις υψηλές εσωτερικές θερμοκρασίες αέρα και πιέσεων που σχετίζονται με την λειτουργία σε υψηλή ισχύ. Ένα ακόμα πρόβλημα που σχετίζεται με όλα τα καλά αναμιγμένα συστήματα καύσης είναι ότι η ακουστική συνήχηση που συμβαίνει όταν η διαδικασία καύσης ζευγαρώνει με την ακουστική του καυστήρα. Ειδικότερα τα πτωχά προαναμεμιγμένα συστήματα είναι πιο επιρρεπή σε αυτό το πρόβλημα.

Συνοπτικά, η πτωχή-προαναμεμιγμένη-προεξατμισμένη καύση έχει σημαντικές προοπτικές για χαμηλές εκπομπές NOx. Επίπεδα κάτω από 10 ppmv έχουν αναφερθεί ακόμα και για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 2000K. Όμως, πολλά προβλήματα παραμένουν, με τα κυριότερα να είναι να πετυχαίνεται ολοκληρωτική εξάτμιση του καυσίμου και μίξη του καυσίμου με τον αέρα μέσα στην καθυστέρηση αυτανάφλεξης και χωρίς το ρίσκο της ακουστικής συνήχησης ή του flashback.

- ΠΡΟΑΝΑΜΙΞΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ-ΑΕΡΑ

Η επιτυχία των περισσότερων τύπων καυστήρων εξαιρετικά χαμηλών εκπομπών, εξαρτώνται από την επίτευξη μιας σχεδόν τελείας ομοιογενούς μίξης πριν την καύση. Μια ομοιογενής μίξη καυσίμου έχει το πλεονέκτημα ότι μειώνει εξαιρετικά την πιθανότητα αυτανάφλεξης. Παρόλο που τα μίγματα καυσίμου αέρα τείνουν να έχουν μεγάλες τιμές καθυστέρησης, ατέλειες στη μίξη έχουν ως αποτέλεσμα τοπικές περιοχές στις οποίες η αναλογία ισοδυναμίας είναι μεγαλύτερη από το μέσο όρο, και έτσι, ο χρόνος καθυστέρησης ανάφλεξης να μειώνεται σημαντικά. Έτσι, ένας μεγάλος βαθμός ομογένειας του μίγματος είναι σημαντικός, όχι μόνο

για την επίτευξη χαμηλών εκπομπών NOx, αλλά και για να ελαφρύνει το πρόβλημα της αυτανάφλεξης.

Η επιρροή της ομοιογένειας του μίγματος στον σχηματισμό NOx έχει εξεταστεί από διαφόρους ερευνητές θεωρητικά και πειραματικά. Έτσι, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χωρική μη-ομοιογένεια στην αναλογία ισοδυναμίας είχε ως αποτέλεσμα αυξημένες εκπομπές NOx για αναλογίες κάτω από 0,7 και μειωμένες εκπομπές NOx για σχεδόν στοιχειομετρία μίγματα. Επίσης ότι οι χρονικές διακυμάνσεις στην αναλογία ισοδυναμίας μπορούν να αυξήσουν τις εκπομπές NOx επιπρόσθετα με τις χωρικές μη-ομοιομορφίες. Για παράδειγμα, χρονικές διακυμάνσεις του 10% είχαν ως αποτέλεσμα στον διπλασιασμό του NOx.

Έτσι έγινε χρήση του φυσικού αερίου GE LM6000 καυστήρα για να εξεταστεί η επιρροή της προανάμιξης στον σχηματισμό NOx. Τα αποτελέσματα δίνονται στην εικόνα 2-35 και δείχνουν NOx ως συνάρτηση του μέσου όρου θερμοκρασίας της φλόγας για διαφόρους βαθμούς προανάμιξης. Η εικόνα 2-35 περιέχει πληροφορίες για ένα σχεδόν τέλειο προαναμικτή, ένα καλό προαναμικτή και ένα μη βελτιστοποιημένο προαναμικτή. Ξεκάθαρα δείχνει το τρομακτικό πλεονέκτημα που μπορεί να υπάρξει από την πλήρη μίξη καυσίμου-αέρα. Επίσης, η ποσότητα του NOx που σχηματίζεται σε ένα μη βελτιστοποιημένο προαναμικτή αυξανόταν με την αύξηση της πίεσης. Αυτό το αποτέλεσμα οφείλεται στο γεγονός ότι το NOx παράγεται στα θερμά σημεία (>2000K) ανεπαρκώς προαναμιγμένης φλόγας από τον θερμικό μηχανισμό που εξαρτάται από την πίεση.

Ένας αριθμός μελετών έγινε στη χρήση μηχανικών αναμικτών για να επιτευχθεί ένας ικανοποιητικός βαθμός μίξης καυσίμου-αέρα. Οι στατικοί αναμικτές χρησιμοποιούνται πολύ στη μηχανική διαδικασία για τη μίξη αερίων και υγρών, αλλά προκαλούν μικρό ενδιαφέρον για εφαρμογές καύσης. Ένα σύστημα στατικού μίκτη έχει καλές προϋποθέσεις για κινητήρες μετρίου αναλογίας συμπίεσης, αλλά περισσότερη δουλειά χρειάζεται για να μειωθεί το μήκος, ο χρόνος παραμονής και η απώλεια πίεσης, ενώ θα διατηρείται καλή απόδοση μίξης.

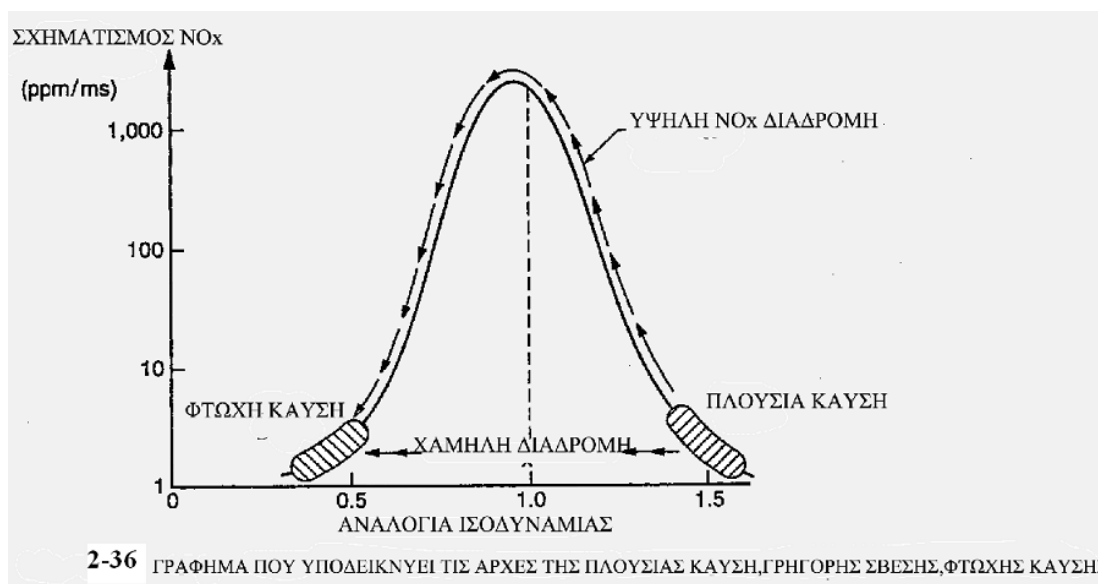


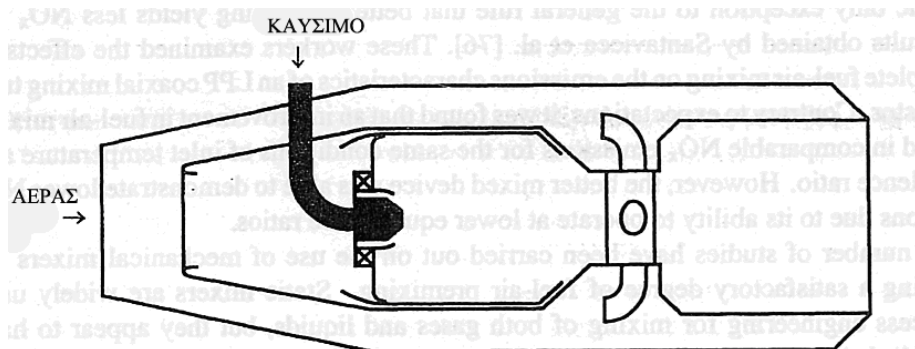
2-35 ΕΠΙΡΡΟΗ ΜΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗΣ ΠΡΟΜΙΞΗΣ ΑΕΡΑ-ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ NOx

2-9 ΠΛΟΥΣΙΑΣ ΚΑΥΣΗΣ- ΓΡΗΓΟΡΗΣ ΣΒΕΣΗΣ- ΠΤΩΧΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΚΑΥΣΤΗΡΑΣ

Η βασική αρχή της ιδέας του καυστήρα «πλούσιας καύσης-γρήγορης σβέσης-πτωχής (RQL) καύσης φαίνεται στην εικόνα 2-36. Η καύση ξεκινά στην πλούσια σε καύσιμο κύρια ζώνη και η αναλογία του σχηματισμού NOx είναι χαμηλή λόγω της συνδυασμένης επίδρασης της χαμηλής θερμοκρασίας και της εξάντλησης οξυγόνου. Μια σταδιακή και συνεχόμενη εισαγωγή αέρα μέσα στο προϊόντα καύσης που προέρχονται από την κύρια ζώνη αυξάνει και την θερμοκρασία και την περιεκτικότητα του οξυγόνου, και έτσι, η αναλογία σχηματισμού NOx επιτυγχάνεται, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2-36. Αν, όμως, ο επιπλέον αέρας που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί η διαδικασία καύσης και για να μειωθεί η θερμοκρασία του αερίου στο επιθυμητό προ-αραιώματος επίπεδο, μπορέσει να αναμιχτεί ομοιόμορφα και άμεσα με την εκροή από την κύρια ζώνη, η διαδικασία καύσης θα ακολουθήσει την χαμηλού NOx πορεία που δίνεται στην εικόνα 2-36. Αυτή η εικόνα δείχνει ότι ο σχεδιασμός ενός γρήγορου και αποτελεσματικού «γρήγορης σβέσης μίξης» τομέα, είναι μεγάλης σημασίας για την επιτυχία αυτού του καυστήρα.

Μια πρακτική μορφή αυτού του καυστήρα δείχνεται σχηματικά στην εικόνα 2-37. Η καύση ξεκινά στην πλούσια σε καύσιμο κύρια ζώνη που λειτουργεί σε μια αναλογία ισοδυναμίας μεταξύ του 1,2 και του 1,6. Μια μεγαλύτερη αναλογία ισοδυναμίας θα ήταν ποιο αποτελεσματική στο να μειώνει NOx αλλά θα μπορούσε να οδηγήσει σε υπερβολικό σχηματισμό αιθάλης και καπνού. Για να είναι αυτή η καύση ολοκληρωτικά αποδοτική, το καύσιμο πρέπει να κορνιτοποιηθεί καλά και ομοιόμορφα να μοιραστεί παντού στην πλούσια σε καύσιμο ζώνη. Επιπλέον, η αρχική μορφή του ζώνης αεροροής πρέπει να είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να αποτρέπει την ύπαρξη τοπικών ζωνών επανακυκλοφορίας που θα μπορούσαν να αυξήσουν τον χρόνο παραμονής και έως εκ τούτου τον σχηματισμό NOx.





2-37 ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ RQL ΚΑΥΣΤΗΡΑ

Πέρα από το να μειώνει θερμικό NO_x, αυτή η αρχική πλούσια σε καύσιμο διαδικασία αποθαρρύνει τον σχηματισμό NO_x από δεσμευμένο καυσίμου άζωτο με την μετατροπή ενός μεγάλου μέρους του σε μη αντιδρών N₂. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα του πλούσιου σε καύσιμο αρχικού σταδίου της διαδικασίας καύσης χαμηλής αξίας θερμοκρασίας καυσίμων που περιέχουν αμμωνία είναι ότι μπορεί να μειώσει σημαντικά την μετατροπή του NH₃ σε NO_x.

Καθώς τα πλούσια σε καύσιμο καύσης προϊόντα ρέουν έξω από την κύρια ζώνη, συναντούν αναβλύζον αέρα που γρήγορα μειώνει την θερμοκρασία του σε ένα επίπεδο που ο σχηματισμός NO_x είναι μικρός. Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, αυτή η μετάβαση από μια πλούσια ζώνη σε μια πτωχή ζώνη πρέπει να γίνει γρήγορα για να αποτραπεί ο σχηματισμός σχεδόν στοιχειομετρικών, σχηματισμένων γραμμών υψηλού NO_x.

Αν η θερμοκρασία της ζώνης πτωχής καύσης είναι πολύ μεγάλη, η παραγωγή του θερμικού NO_x γίνεται υπερβολική. Από την άλλη, η θερμοκρασία πρέπει να είναι τόσο μεγάλη ώστε να απορροφήσει το υπόλοιπο των CO, UHC και της αιθάλης. Έτσι, η αναλογία ισοδυναμίας για την ζώνη πτωχής καύσης πρέπει να επιδεχθεί προσεκτικά για να ικανοποιεί όλες τις απαιτήσεις εκπομπών. Τυπικά, η πτωχή καύση συμβαίνει σε αναλογίες ισοδυναμίας ανάμεσα σε 0,5 και σε 0,7. Όταν οι απαιτήσεις της καύσης και της ψύξης των τοιχωμάτων του φλογοθαλάμου ικανοποιηθούν, όσος αέρας έχει μείνει μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν αέρας αραίωσης για να προσαρμόσει την θερμοκρασία εξόδου για μεγίστη αντοχή τουρμπίνας.

Σε μερικά σχέδια ο αέρας ψεκασμού είναι διαμορφωμένος να ρέει πάνω από το εξωτερικό του τοιχώματος του φλογοθαλάμου στην πλούσια ζώνη πριν μπει στο στόμιο καυσίμου. Αυτή η αναγεννητική πίσω πλευράς ψύξη συναγωγής είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό σχεδιασμού επειδή το συμβατικό φίλμ ψύξης στην πλούσια ζώνη θα δημιουργούσε τοπικά σχεδόν στοιχειομετρικά μίγματα που θα μπορούσαν να παράγουν μεγάλα επίπεδα NO_x.

Εργασία σε εξέλιξη σε αυτό το τύπο καυστήρων υπάρχει από τα τέλη του 1970. Σε πρώιμες πειραματικές μελέτες, οι εκπομπές NO_x έδειχναν να ελέγχονται μόνο από την εσωτερική θερμοκρασία και από την αναλογία ισοδυναμίας της πλούσιας περιοχής, όπου το μονοξείδιο του άνθρακα και οι εκπομπές καπνού επηρεάζονταν σημαντικά και από την πλούσια ζώνη και από την αναλογία ισοδυναμίας της πτωχής ζώνης καθώς και από την θερμοκρασία εισόδου καυστήρα. Μια ελάχιστη αναλογία ισοδυναμίας της πτωχής ζώνης του 0,6 χρειαζόταν για να επιτευχθούν ικανοποιητικά επίπεδα καπνού. Τεστ που έγιναν σε ατμοσφαιρική πίεση έδωσαν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά την σταθερότητα καύσης και χαμηλές εκπομπές NO_x (3 ppm για θερμοκρασίες εξόδου μέχρι 15000° C), με το αρνητικό των σχετικά υψηλών εκπομπών CO.

Ο GE RQL2 καυστήρας για LHV αέριο επίσης περιλαμβάνει μια σταθερού στροβιλισμού πλούσια σε καύσιμο κύρια ζώνη. Αυτή η ζώνη τελειώνει σε μια συγκλίνουσα περιοχή που εξυπηρετεί για να αποτρέψει την στροβιλισμένη ροή να οπισθοχωρήσει πίσω μέσα στην κύρια ζώνη, καθώς και να μειώσει την περιοχή ροής σε ένα λογικό μέγεθος για πρόβλεψη σβέση. Γρήγορη σβέση επιτυγχάνεται με την έγχυση αέρα μέσα από τρύπες διαφορετικών μεγεθών για να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη παροχή αέρα σβέσης κατά μήκος της θερμής ροής αερίου. Όταν λειτουργεί σε θερμοκρασία εξόδου καυστήρα των 1670 K, οι NO_x και CO εκπομπές ήταν 50 και 5 ppmv αντίστοιχα. Ίσως μεγαλύτερης σημασίας είναι ότι η μετατροπή του NH₃ σε NO_x ήταν μόνο 5%.

Αυτό το είδος καυστήρα εξετάζεται ενεργά για εφαρμογές αεροσκαφών από την εταιρία Pratt & Whitney στην Αμερική σαν μέρος του προγράμματος NASA'S HSTC (υψηλής ταχύτητας μεταφορά πολιτών). Ο στόχος αυτού του προγράμματος είναι να επιδείξει την σκοπιμότητα της επίτευξης επίπεδων NO_x από 3 έως 8 g/kg καύσιμου σε υπερηχητικές καταστάσεις ταξιδιού με καύσιμο κηροζίνη.

Συγκριτικά με συμβατικούς καυστήρες, αυτοί οι καυστήρες έχουν εγγενώς καλύτερη ανάφλεξη και απόδοση πτωχής αναφλεκτικότητας. Όμως, για να τα εκμεταλλευτούμε αυτά, χρειάζεται να γίνουν βελτιώσεις στο σχεδιασμό των ανάμικτων σβέσης. Με τα υγρά καύσιμα, αλλά πιθανά προβλήματα περιλαμβάνουν μεγάλο σχηματισμό αιθάλης στην κύρια ζώνη που μπορεί να αυξήσει την ακτινοβολία υψηλής φλόγας και του καπνού. Αυτά τα προβλήματα επιδεινώνονται με τους υψηλούς χρόνους παραμονής, των ασταθών μορφών ανακυκλοφορησης και της μη ομοιόμορφης μίξης.

2-10 ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗ ΚΑΥΣΗ

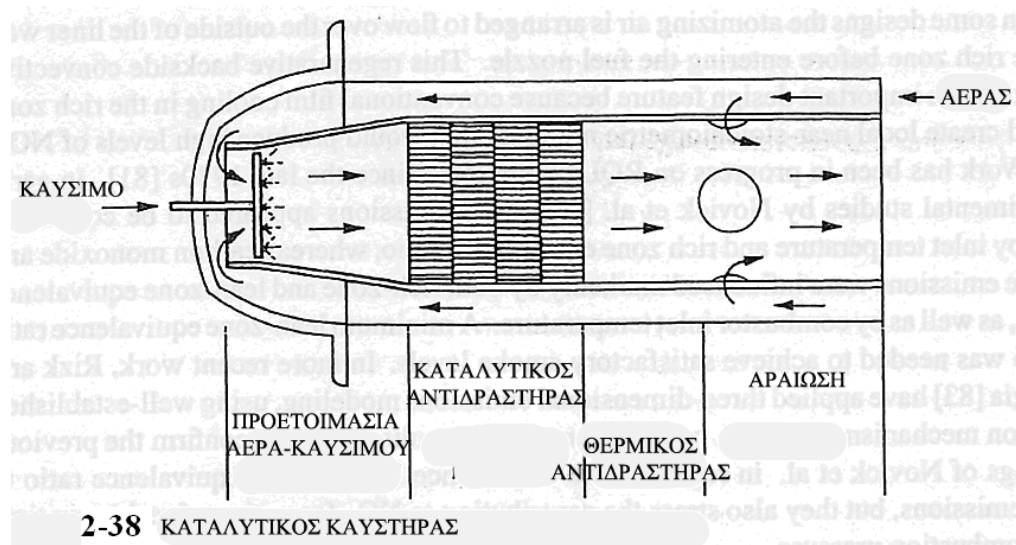
Η καταλυτική καύση είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει ένα καταλύτη για να ξεκινήσει και για να παροτρύνει χημικές αντιδράσεις σε ένα μίγμα καύσιμου-αέρα που ρέει σε ποιο πτωχές συνθήκες από ότι είναι πιθανές σε ομοιογενή αέριας φάσης καύσης. Αυτό επιτρέπει σταθερή καύση για να οδηγηθεί σε λόγους ισοδυναμίας που είναι χαμηλότερα από τα κανονικά χαμηλά όρια ευφλεκτότητας του μίγματος καυσίμου/αέρα. Καύση σε τέτοιες περιορισμένες θερμοκρασίες μπορεί να αναμένεται να μειώσουν δραματικά την παραγωγή θερμικού NO_x.

Η αρχή της καταλυτικής καύσης δείχνεται σχηματικά στην εικόνα 2-38. Το καύσιμο εγχέεται πάνω από τον αντιδραστήρα για να εξατμιστεί και να αναμιχτεί με τον αέρα που εισέρχεται. Το μίγμα αέρα-καύσιμου μετά, ρέει μέσα στη επίστρωση του καταλύτη, η αντιδραστήρα, που μπορεί να αποτελείται από διάφορα στάδια, το καθένα φτιαγμένο από διαφορετικό είδος καταλύτη. Για το πρώτο στάδιο είναι επιθυμητό να χρησιμοποιηθεί ένα καταλύτης που είναι ενεργός σε χαμηλές θερμοκρασίες, όπου επακόλουθα στάδια είναι απαραίτητο να επιλεγούν για καλύτερη οξείδωση. Κατάντη της καταλυτικής επίστρωσης, μια θερμική ζώνη αντίδρασης συνήθως παρέχεται για να αύξηση την θερμοκρασία του αερίου στο επιθυμητό βαθμό εισόδου στην τουρμπίνα και για να μειώσει τις συγκεντρώσεις CO και UHC σε επιθυμητά επίπεδα.

Η ικανότητα των καταλυτικών αντιδραστήρων για πολύ χαμηλές εκπομπές ρύπων έχει αναγνωριστεί από το 1975, αλλά το σκληρό περιβάλλον σε ένα καυστήρα αεριοστροβίλου και το μεγάλο εύρος των συνθηκών λειτουργίας αποτελούν μεγάλα προβλήματα που πρέπει να ξεπεραστούν για να διασφαλιστεί η εφαρμογή των καταλυτικών καυστήρων σε λειτουργικούς αεριοστροβίλους. Είναι δύσκολο να σχεδιαστεί ένας καταλύτης που θα ανάβει ένα μίγμα αέρα-καύσιμου στις χαμηλές θερμοκρασίες της εξόδου του συμπιεστή που αντιστοιχούν στο στρόφαλο καύσης και λειτουργία του κινητήρα σε μικρό φορτίο. Επιπλέον, οι θερμοκρασίες εξόδου του καυστήρα είναι συνήθως από 1450 μέχρι 1770 K, τιμές που είναι

πολύ πιο πάνω από τα όρια σταθερότητας των περισσότερων υλικών του καταλύτη. Ακόμα και τα κεραμικά που μπορούν να αντέξουν μεγάλες θερμοκρασίες καύσης είναι ευπαθή σε αποτυχία θερμικού σοκ κατά τη διάρκεια των μεταβάσεων του κινητήρα. Οι αμφιβολίες που αφορούν την μακροπρόθεσμη σταθερότητα των υποστρωμάτων καταλύτη και η διαρκής υψηλή καταλυτική δραστηριότητα για περιόδους αρκετών χιλιάδων ωρών αποτελούν ένα σημαντικό φράγμα στην ανάπτυξη βιώσιμων καταλυτικών καυστήρων για αεριοστρόβιλους.

Οι τωρινές έρευνες για καταλυτική καύση για αεριοστρόβιλους περιορίζονται σε μικρά τεστ εργαστηρίου και σε τεστ στον εξοπλισμό του καυστήρα. Πολλά διαφορετικά σχέδια έχουν εξεταστεί. Μερικά από τα σχέδια είναι αρκετά πολύπλοκα και απαιτούν την χρήση ενός προ-καυστήρα μαζί με σταδιοποίηση καυσίμου και μεταβλητή γεωμετρία για να επιτύχει ένα ικανοποιητικό εύρος λειτουργίας. Όμως, τα αποτελέσματα από διαφορές μελέτες επιβεβαιώνουν την ικανότητα της καταλυτικής καύσης για πολύ χαμηλό NOx (<5 ppmv) και παρέχει το κίνητρο να ξεπεραστούν τα εμπόδια της σταθερότητας και του περιορισμένου εύρους θερμοκρασίας των καταλυτικών αντιδραστήρων.



- Σχεδιαστικές προσεγγίσεις

Οι διάφορες προσεγγίσεις στο σχεδιασμό καταλυτικών καυστήρων για αεριοστρόβιλους γενικά κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες :

1. Παραδοσιακά συστήματα, όπως φαίνονται στην εικόνα 2-38, στα οποία ο καταλύτης τροφοδοτείται με νέα μίγμα αέρα-καυσίμου του οποίου η αδιαβατική θερμοκρασία είναι όση με την ζητούμενη θερμοκρασία εξόδου του καυστήρα. Αυτή η προσέγγιση είναι ικανοποιητική για χαμηλές τιμές αλλά, σε μοντέρνους αεριοστρόβιλους όπου η θερμοκρασία μπορεί να είναι 1570 K, θα μπορούσε να προκαλέσει προβλήματα όπως συσσωμάτωση και εξάτμιση των ενεργών εξαρτημάτων καυστήρα και διάρρηξη των κεραμικών προϊόντων.

2. Συστήματα όπου μόνο ένα μέρος του καυσίμου εγχέεται πάνω από τον καταλύτη για να περιοριστούν οι θερμοκρασίες του καταλύτη κάτω από 1270K, και το υπόλοιπο του καυσίμου εγχέεται κατόπι του καταλύτη για να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία εξόδου καυστήρα.

3. Συστήματα όπου όλο το καύσιμο εγχέεται πάνω από τον καταλύτη αλλά αντιδρά μόνο κατά ένα μέρος μέσα στο επιστρώμα του καταλύτη. Μετά η καύση συνεχίζει μέσω ομογενών αντιδράσεων αέριας φάσης σε μια ζώνη καύσης.

Ο κύριος στόχος των προσεγγίσεων 2 και 3 είναι να κρατηθούν οι θερμοκρασίες του επιστρώματος για να αποτραπούν προβλήματα θερμικής συσσωμάτωσης και απενεργοποίησης του καταλύτη. Με το περιορισμό της μέγιστης θερμοκρασίας του καταλύτη με αυτό το τρόπο όχι μόνο επεκτείνει την διάρκεια ζωής του καταλύτη αλλά επίσης διευρύνει την επιλογή κατάλληλων εξαρτημάτων καταλύτη.

- Σχεδιαστικοί περιορισμοί

Τα προβλήματα που αντιμετωπίζει ο σχεδιαστής ενός καταλυτικού καυστήρα τείνουν να εστιάζουν στην θερμοκρασία και στην ανάγκη συμβιβαστεί το μεγάλο εύρος θερμοκρασιών που χρειάζονται από τον κινητήρα με το σχετικά μικρό εύρος θερμοκρασιών που μπορεί να ικανοποιήσει της αντικρουόμενες απαιτήσεις της υψηλής δραστηριότητας καταλύτη και μηχανικής ακεραιότητας.

Οποιοσδήποτε καταλυτικός καυστήρας έχει ένα συγκεκριμένο εύρος συνθηκών λειτουργίας μέσα στο οποίο μπορεί να επιτύχει σταθερή καύση και χαμηλά επίπεδα εκπομπών. Το εύρος αυτών των συνθηκών το οποίο αναφέρεται ως “παράθυρο λειτουργίας”, καθορίζεται κυρίως σε σχέση με τρεις σημαντικές θερμοκρασίες.

1. Την θερμοκρασία εισόδου του μίγματος που πρέπει να είναι τόσο υψηλή ώστε να ενεργοποιηθεί ο καταλύτης. Κάτω από μια συγκεκριμένη ελαχίστη θερμοκρασία, γνωστή ως “θερμοκρασία σβέσης”, οι εξώθερμες αντιδράσεις οξείδωσης που γίνονται στα τοιχώματα του αντιδραστήρα, είναι πολύ αργές για να δημιουργήσουν την θερμότητα που χρειάζεται για να διατηρηθούν οι αντιδράσεις. Γενικά, θερμοκρασίες που υπερβαίνουν τα 700 K είναι σημαντικές για τη “σβέση” του καταλύτη. Για παράδειγμα, ευγενή μέταλλα όπως η πλατίνα και το παλλάδιο απαιτούν 617 έως 783 K “θερμοκρασία σβέσης”, ενώ καταλύτες οξειδίου του μετάλλου με ενεργά στοιχεία όπως το νικέλιο και το κοβάλτιο χρειάζονται 866 έως 1367 K.
2. Η θερμοκρασία του αερίου που αφήνει τον καταλύτη πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη για να επιτρέπει στις αντιδράσεις που ξεκινούν από τον καταλύτη να προχωρήσουν στην ολοκλήρωσή τους στον διαθέσιμο χρόνο παραμονής ή αν επιπλέον καύσιμο εγχυθεί κατόπιν του καταλύτη, να προτρέψει γρήγορη καύση για αυτό το καύσιμο και επομένως να μειώσει τις εκπομπές CO και UHC σε αποδεκτά επίπεδα.
3. Οι θερμοκρασίες των τοιχωμάτων του καταλύτη πρέπει να είναι τόσο χαμηλές ώστε να παρέχουν την αντοχή που χρειάζεται για σταθερή μακροπρόθεσμη λειτουργία του αντιδραστήρα.

- ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Η επιτυχημένη λειτουργία του επιστρώματος του καταλύτη εξαρτάται παρά πολύ από τις συνθήκες εισαγωγής του της ροής που πρέπει να είναι ομοιόμορφη από την άποψη της δύναμης του μίγματος, ταχύτητας, και θερμοκρασία για να διαβεβαιώσει αποτελεσματική

χρήση όλης της περιοχής του καταλύτη και να αποτρέψει ζημιά στο επίστρωμα λόγω των μεγάλων τοπικών θερμοκρασιών.

Αποτυχία στο να επιτευχθεί ένα ομοιόμορφο μίγμα θα μειώσει την απόδοση με πολλούς τρόπους που ακολουθούν το σχέδιο του “παράθυρου λειτουργίας” που συζητήθηκε παραπάνω. Για οποιαδήποτε θερμοκρασία εισόδου, μια χαμηλή αναλογία αέρα-καύσιμου μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα χαμηλές θερμοκρασίες καταλύτη και υψηλές εκπομπές CO και UHC. Από την άλλη, πολύ υψηλή αναλογία αέρα-καύσιμου μπορεί να οδηγήσει τον καταλύτη σε υπερθέρμανση. Ξεκάθαρα, αν υπάρχουν παραλλαγές στη θερμοκρασία και στην αναλογία αέρα-καύσιμου στο μίγμα που μπαίνει στον αντιδραστήρα, μερικές περιοχές του καταλύτη θα αντιμετωπίσουν καταστάσεις χαμηλής θερμοκρασίας, ενώ άλλες θα είναι ευάλωτες σε ζημιά λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας αερίων. Τεστ που έγιναν έδειξαν ότι ανομοιογένειες στην συγκέντρωση καύσιμου πάνω από 10% (κορυφή με κορυφή) μπορούν να οδηγήσουν σε ζημιά του καταλύτη και σε υψηλές εκπομπές CO και UHC. Μη ομοιομορφίες σε καταστάσεις εισόδου κάνουν ακόμα πιο δύσκολο να διατηρηθεί η θερμοκρασία του καταλύτη μέσα στο “λειτουργικό παράθυρο” που περιορίζει τον βαθμό της ευελιξίας στην ανταπόκριση των αλλαγών στις λειτουργικές συνθήκες του κινητήρα.

Μηχανικοί μείκτες χρησιμοποιούνται μερικές φορές για να προωθήσουν πιο ομοιόμορφες καταστάσεις ροής στην είσοδο στην επίστρωση του καταλύτη. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των μεικτών σε προαναμεμιγμένης καύσης εφαρμογές έχουν αναφερθεί. Το κύριο μειονέκτημα τους είναι το προφανές – η εμφάνιση επιπλέον απώλειας πίεσης που τιμωρεί την απόδοση του κινητήρα. Επίσης, ο χρόνος παραμονής στην ζώνη προετοιμασίας καύσιμου πρέπει να είναι μικρός για να αποφευχθεί το ρίσκο της αυθόρμητης ανάφλεξης.

- Μετα-κατάλυσης καύση

Η κύρια λειτουργία της μετά του καταλύτη ζώνης καύσης είναι, να μειώσει τις συγκεντρώσεις CO και UHC στα επιθυμητά επίπεδα και να επιτύχει την επιθυμητή θερμοκρασία εξόδου καυστήρα. Τοποθετώντας την ζώνη της μέγιστης θερμοκρασίας αερίου κατάντη του καταλύτη, επιτρέπει στο υπόστρωμα του καταλύτη να λειτουργεί σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία (<1270K) με επακόλουθα πλεονεκτήματα σε σχέση με τη σταθερότητα και την επεκταμένη διάρκεια ζωής. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η κλίση της θερμοκρασίας στον καταλυτικό καυστήρα είναι από την αντίθετη πλευρά από αυτή σε ένα συμβατικό καυστήρα αεριοστρόβιλου. Στον τελευταίο, οι μέγιστες θερμοκρασίες επιτυγχάνονται στην κύρια ζώνη καύσης και οι θερμοκρασίες αερίου μετά, εξασθενούν κατάντη καθώς περισσότερος αέρας εγχέεται μέσα στο ρεύμα θερμού αερίου για να μειώσει την θερμοκρασία του στην απαιτούμενη τιμή εξόδου του καυστήρα. Τα εξής είναι τα πλεονεκτήματα της μετα-καταλύσεως καύσης :

1. Επιτρέπει στον καταλύτη να λειτουργεί σε χαμηλές θερμοκρασίες που μπορούν να μειώσουν ή να εξολοθρεύσουν πολλούς από τους μηχανισμούς απενεργοποίησης που περιορίζουν την διάρκεια ζωής του καταλύτη.
2. Επιτρέπει την χρήση μεγάλου εύρους καταλυτών και υλικών επιστρωμάτων
3. Τα προβλήματα που σχετίζονται με κατάγματα θερμικού σοκ των επιστρωμάτων κατά την έναρξη, τερματισμό και λειτουργίες μετάβασης μετριάζονται.
4. Ο καυστήρας μπορεί να αναπτυχθεί σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες εξόδου χωρίς την αλλαγή του υλικού του καταλύτη.

- Σχεδιασμός και απόδοση

Δυο διαφορετικοί τύποι καταλυτικών καυστήρων για αεριοστρόβιλους περιγράφονται παρακάτω για να επισημάνουν τα κύρια χαρακτηριστικά αυτών των σχεδίων. Μια αρκετά συνηθισμένη προσέγγιση είναι το σύστημα που φαίνεται στην εικόνα 2-39 που περιέχει ένα δακτυλιοειδή προκαυστήρα, 6 σε σχήμα ανεμιστήρα τμήματα καταλύτη, 6 στόμια καυσίμου προαναμιξης και ένα τομέα καυστήρα προανάμιξης κατάντη του καταλύτη. Ο αέρας εισόδου θερμαίνεται στα 720 K από τον προκαυστήρα και διανέμεται και στα στόμια προανάμιξης και στα τμήματα του καταλύτη που είναι διαμορφωμένα σε κύκλο όπως φαίνεται και στην εικόνα 2-39. Το μεγαλύτερο ενεργό συστατικό των καταλυτών είναι το παλλάδιο που υποστηρίζεται από ένα σταθεροποιημένο με επίστρωση αλουμίνιας σε μια κηρήθρα μονόλιθου. Στο κάτω μέρος, κάθε στόμιο είναι σχηματισμένο να εγχέει το προαναμιγμένο μίγμα αερίου-αέρα που ρέει ανάμεσα στα τμήματα του καταλύτη μέσα στην εκροή του καταλύτη σε μια γωνία κοντά στις 90°. Το μίγμα αναφλέγεται από τα θερμά προϊόντα καυστήρα που προέρχονται από τα τμήματα καταλύτη, πτωχή προαναμιγμένη καύση παίρνει μέρος για να αυξήσει την θερμοκρασία εξόδου του καυστήρα μέχρι τα 1570 K.

Σε λειτουργία με φυσικό αέριο σε ένα εύρος πίεσης από 0.10 μέχρι 1.35 MPa, οι εκπομπές NOx ήταν πάντα κάτω από 10 ppmv, όπου ένα σημαντικό μέρος προερχόταν από τον προκαυστήρα. Η συνολική απώλεια πίεσης καυστήρα ήταν γύρω στο 2,5 % που είναι αρκετά κάτω από τις τιμές που συνήθως σχετίζονται με συμβατικούς καυστήρες.

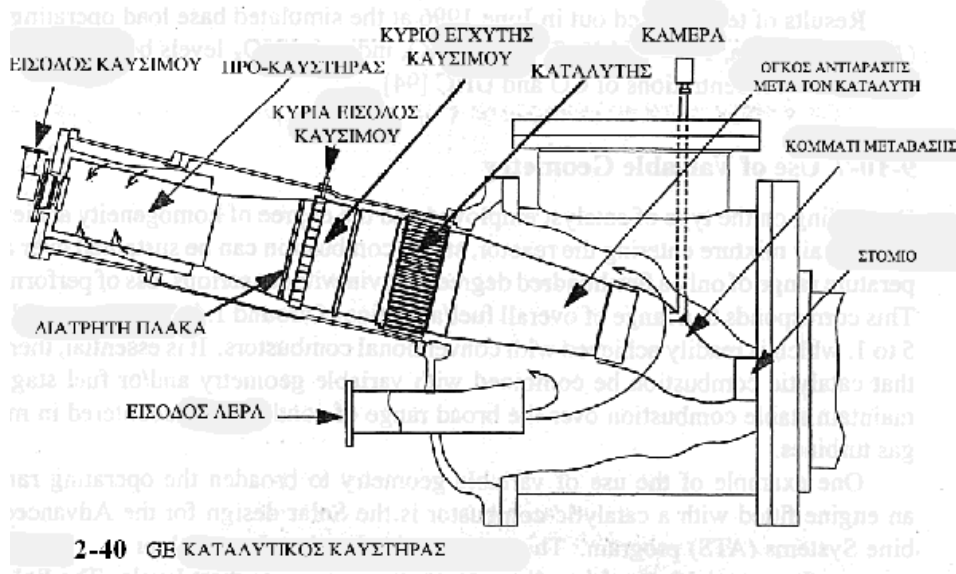
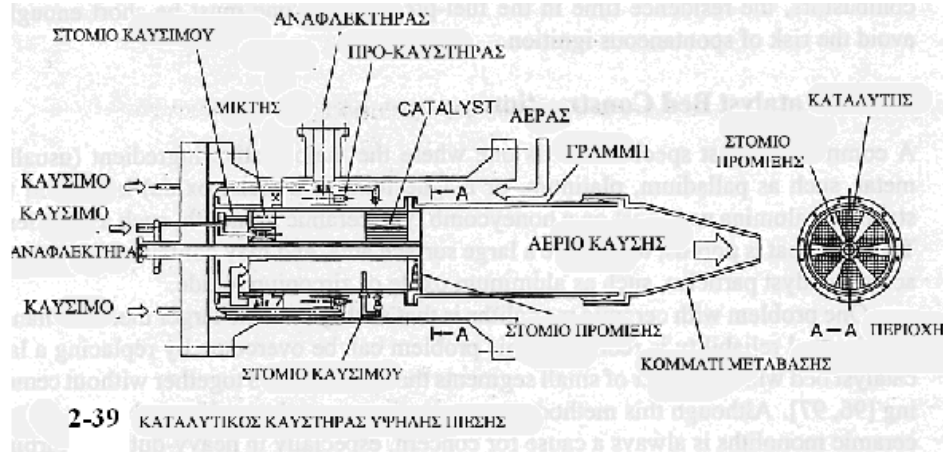
Η εναλλακτική μέθοδος για την αποφυγή έκθεσης του καταλύτη σε υπερβολικές θερμοκρασίες δείχνεται σχηματικά στην εικόνα 2-40 που δείχνει ένα καταλυτικό καυστήρα υπό ανάπτυξη από την εταιρία General Electric για τον φυσικού αερίου MS9001E αεριοστρόβιλο. Η τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό αυτού του καυστήρα έχει επιδεχθεί σε ένα αριθμό υπό κλίμακα και σε πλήρη κλίμακα τεστ. Ένα βασικό χαρακτηριστικό αυτού του σχεδίου είναι ότι όλο το καύσιμο που χρειάζεται για να επιτευχθεί η θερμοκρασία εξόδου καυστήρα των 1380 K παρέχεται στον καταλυτικό αντιδραστήρα που περιλαμβάνει 2 ή περισσότερα ξεχωριστά στάδια. Το πρώτο στάδιο λειτουργεί σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία που κάνει δυνατή την υψηλή καταλυτική δραστηριότητα που χρειάζεται για τη λειτουργία του καταλύτη στην θερμοκρασία εξόδου του αντιδραστήρα. Το τελευταίο στάδιο μπορεί να λειτουργήσει επιτυχημένα με λιγότερη καταλυτική δραστηριότητα επειδή η θερμοκρασία εισόδου είναι μεγαλύτερη αλλά η θερμοκρασία του επιστρώματος πρέπει επίσης να είναι μεγάλη για να παρέχει της θερμοκρασίες αερίου εξόδου που χρειάζονται για την εκκίνηση των ομοιογενών αντιδράσεων καύσης κατάντη του καταλύτη. Τυπικά, περίπου το μισό του καυσίμου αντιδρά μέσα στα καταλυτικά στάδια και το υπόλοιπο απορροφάται από την μετά του καταλύτη ζώνη καύσης.

Ο καταλυτικός αντιδραστήρας για τον GE MS9001E περιλαμβάνει τρία ξεχωριστά υποστηριζόμενα επίπεδα, το καθένα με διάμετρο 508mm. Τα επίπεδα του καταλύτη σχηματίζονται από λωρίδες πολύ λεπτών ανθεκτικών σε οξείδωση μεταλλικών φύλλων. Μετά γίνεται καθαίρεση των ενεργών καταλυτικών υλικών σαν επένδυση στις λωρίδες. Οι λωρίδες κουλουριάζονται έτσι ώστε να σχηματίσουν κανάλια μέσα από τα οποία το μίγμα αέρα-καύσιμου ρέει καθώς αντιδράει στα τοιχώματα του καναλιού. Το συνολικό μήκος του δοχείου του καταλύτη είναι 305 mm από τα οποία ο καταλύτης καταλαμβάνει τα 230 mm.

Το σύστημα έγχυσης καύσιμου περιλαμβάνει 93 ξεχωριστούς σωλήνες διαμορφωμένους κατά μήκος του μονοπατιού του ρεύματος, με τέσσερα στόμια έγχυσης καύσιμου στο λαιμό του κάθε venturi. Ο στόχος είναι να παραδοθεί στον καταλύτη ένα μίγμα αέρα-καύσιμου που είναι ομοιόμορφο στον σχηματισμό του, στην θερμοκρασία του και στην ταχύτητα του. Ο στόχος της ομοιομορφίας του μίγματος είναι ένα μέγιστο εύρος του 10% ανάμεσα στη μεγαλύτερη και στη μικρότερη συγκέντρωση. Με τη σωστή διαμόρφωση των

στομίων έγχυσης καύσιμου, ένα εύρος του 12% έχει επιτευχθεί μέχρι τώρα που είναι κοντά στην επιθυμητή τιμή.

Αποτελέσματα ερευνών που έγιναν σε εξομοίωση βασικού φορτίου ($P = 1,25 \text{ MPa}$, $T_{\text{εισ}} = 714 \text{ K}$, $T_{\text{εξ}} = 1465 \text{ K}$), έδειξαν επίπεδα NO_x κάτω από 5 ppm και ακόμα χαμηλότερες συγκεντρώσεις CO και UHC.



- Χρήση μεταβλητής γεωμετρίας

Ανάλογα με το τύπο καταλύτη που χρησιμοποιείται και το βαθμό της ομοιογενείας στο μίγμα αέρα-καύσιμου που εισέρχεται στον αντιδραστήρα, η σταθερή καύση μπορεί να διατηρηθεί σε ένα εύρος θερμοκρασίας μονό λίγων εκατοντάδων βαθμών Κέλβιν χωρίς σημαντική απώλεια απόδοσης. Αυτό ανταποκρίνεται σε ένα εύρος αναλογιών καύσιμου-αέρα της τάξεως 1.4 προς 1, σε αντίθεση με το 5 προς 1, που επιτυγχάνεται με συμβατικούς καυστήρες. Είναι σημαντικό όποτε, η καταλυτική καύση να συνδυαστεί με μεταβλητή γεωμετρία και σταδιοποίηση καυσίμου για να διατηρήσει σταθερή καύση στο μεγάλο εύρος συνθηκών που συναντάται στους μοντέρνους αεροστρόβιλους.

Ένα παράδειγμα της χρήσης της μεταβλητής γεωμετρίας για να επεκταθεί το λειτουργικό εύρος ενός κινητήρα εφοδιασμένου με καταλυτικό καυστήρα είναι το πρόγραμμα Solar Design for the Advanced Turbine systems (ATS). Αυτό το πρόγραμμα στοχεύει στην ανάπτυξη προηγμένων αεριοστρόβιλων με εκπομπές ρύπων σε μονοψήφια επίπεδα τιμών. Το σύστημα Solar καταλυτικής καύσης είναι σπονδυλωτό στο σχεδιασμό του και περιλαμβάνει ένα μίκτη αέρα-καύσιμου πάνω από τον αντιδραστήρα και μια μετά του καταλύτη ομογενούς αερίου ζώνη αντίδρασης κατόπιν του καταλυτικού επιστρώματος για να ολοκληρωθεί η διαδικασία καύσης. Η έναρξη επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός συμβατικού χαμηλών εκπομπών εγχυτήρα καύσιμου. Το σύστημα μεταβαίνει στην λειτουργία καταλύτη χρησιμοποιώντας μια μεταβλητή γεωμετρίας βαλβίδα που εκτρέπει το ρεύμα του αέρα μέσα στο καταλύτη σε φορτία πάνω από το 50% του μεγίστου φορτίου. Αυτή η διαμόρφωση υπερνικά τους περιορισμούς που δημιουργούνται από τη μικρή μείωση της αναλογίας του καταλύτη και επιτρέπει στη θερμοκρασία εξόδου του καταλύτη να παραμένει σχετικά σταθερή στο πάνω από 50% έως το 100% του εύρους φορτίου.

- Μελλοντικές εφαρμογές υπό μελέτη και έρευνα

Όλα τα εργαστηριακά τεστ που έγιναν σε καταλυτικούς καυστήρες για αεριοστρόβιλους έδειξαν τις δυνατότητες τους σε σχέση με τις πολύ χαμηλές εκπομπές ρύπων. Αξιόλογη πρόοδος έχει γίνει και στην αύξηση της διάρκειας ζωής των καταλυτών κάτω από τυπικές συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών. Παρόλο που τα περισσότερα τεστ μέχρι σήμερα περιλαμβάνουν μικρές περιόδους έλεγχου κάτω των 100 ωρών, ένα τεστ ανέφερε ότι ένα καταλυτικό σύστημα λειτουργούσε ικανοποιητικά για 4500 ώρες με καύσιμο φυσικού αερίου σε ατμοσφαιρική πίεση και σε θερμοκρασία των 1570K χωρίς καμία ζημία στο καταλύτη.

Η περισσότερη από την εργασία σε εξέλιξη της καταλυτικής καύσης για αεριοστρόβιλους κατευθύνεται προς στατικές εφαρμογές και στοχεύει να επιτύχει το λειτουργικό εύρος και τις επίπονες συνθήκες λειτουργίας των αεριοστρόβιλων. Η εργασία συνεχίζεται στην ανάπτυξη των καταλυτών για να μειωθεί η απαιτούμενη θερμοκρασία εισόδου του αντιδραστήρα καθώς και η ανάπτυξη του συστήματος για να μεγάλώσει το λειτουργικό «παράθυρο». Τεστ κινητήρα σε μεγάλες περιόδους καλούνται να επικυρώσουν αυτή την τεχνολογία.

2-11 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ NO_x ΚΑΙ CO

Πολλά εμπειρικά μοντέλα βρίσκονται τώρα σε ευρεία χρήση για συσχέτισμό των δεδομένων στις εκπομπές ρύπων και από την άποψη όλων των σχετικών παραμέτρων. Αυτό περιλαμβάνει διαστάσεις καυστήρα, σχεδιαστικά χαρακτηριστικά και λειτουργικές συνθήκες καθώς και τύπο καύσιμου. Τα εμπειρικά μοντέλα μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό και στην ανάπτυξη των καυστήρων χαμηλών ρύπων. Χρησιμεύουν για να μειώσουν τα πολύπλοκα προβλήματα που σχετίζονται με εκπομπές σε μορφές που είναι πιο σημαντικές για το μηχανικό καύσης.

Καθώς οι χημικές αντιδράσεις που αφορούν τον σχηματισμό άκαυστων υδρογονανθράκων και του καπνού είναι αρκετά πολύπλοκες, τα περισσότερα από τα εμπειρικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί έως τώρα περιορίζονται σε NO_x και CO. Οι περισσότερες μελέτες στηρίζουν ότι και για τα δυο αυτά είδη η συγκέντρωση των εξατμίσεων τους εξαρτώνται από τρία πράγματα: 1) Μέσος χρόνος παραμονής στην ζώνη καύσης, 2) ποσοστά χημικής αντίδρασης 3) και ποσοστά μίξης. Οι εξισώσεις για αυτές τις παραμέτρους προέρχονται από την άποψη του μεγέθους του καυστήρα, απώλεια πίεσης στο φλογοθάλαμο,

αναλογίες του αέρα, και συνθήκες λειτουργίας της πίεσης εισόδου, θερμοκρασία, και ρυθμός ροής μάζας αέρα. Αυτή η προσέγγιση οδήγησε στην ανάπτυξη των ημι-εμπειρικών εκφράσεων του NO_x και του CO που παρουσιάζονται παρακάτω.

- NO_x εκφράσεις υπολογισμού του:

Σύμφωνα με εκτενή βιβλιογραφία έχουμε :

$$NO_x = 9 \times 10^{-8} P^{1.25} V_c \exp(0.01 T_{st}) / m_A T_{pz} \text{ (g/kg) καυσίμου} \quad (2-7)$$

Οι τιμές των σταθερών και των έκθετων σε αυτή την εξίσωση πάρθηκαν από ανάλυση και πειραματικά δεδομένα πάνω σε εκπομπές NO_x από διάφορους καυστήρες αεροκινητήρων. Η εξίσωση αυτή, λαμβάνει υπόψη το γεγονός ότι στη καύση των ετερογενών μιγμάτων αέρα-καυσίμου είναι η στοιχειομετρική θερμοκρασία φλόγας που καθορίζει τον σχηματισμό NO_x και όχι ο μέσος όρος θερμοκρασίας φλόγας. Όμως, για τον χρόνο παραμονής στη ζώνη καύσης, που είναι επίσης σημαντική στο σχηματισμό NO_x, ο πρότερος όρος θερμοκρασίας είναι ο μέσος όρος T_{pz}, όπως υποδεικνύεται στο παρονομαστή της εξίσωσης 2-7.

Ο συσχετισμός των πειραματικών δεδομένων πάνω στο NO_x που παρέχεται από την εξίσωση 2-7 για τους καυστήρες GE J79-17A και F101 δείχνεται στις εικόνες 2-41 και 2-42 αντίστοιχα.

Η εξίσωση 2-7 είναι κατάλληλη για συμβατικούς καυστήρες ψεκασμού μόνο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για πτωχής προανάμιξης/προεξάτμισης καυστήρες όπου η μέγιστη επιφύκτη θερμοκρασία είναι T_{pz}, αρκεί το T_{pz} να αλλάξει και να γίνει T_{st}.

Πολλά αλλά εμπειρικά και ημι-εμπειρικά μοντέλα που προβλέπουν τις εκπομπές NO_x έχουν εμφανιστεί. Μερικές από τις πιο πρόσφατες εκφράσεις για τις εκπομπές NO_x περιλαμβάνουν τα παρακάτω :

A) Odgers and Kretschmer :

$$NO_x = 29 \exp - (21,670/T_C) P^{0.66} \times [1 - \exp - (250\tau)] \text{ g/kg καυσίμου} \quad (2-8)$$

Οι προτεινόμενοι χρόνοι σχηματισμού NO_x από τους Odgers and Kretschmer, για καυστήρες αεροσκαφών είναι 0.8 ms και 1.0 ms. Ο χρόνος σχηματισμού για βιομηχανικούς καυστήρες που καίνε υγρό καύσιμο κυμαίνονται από 1.5 μέχρι 2.0 ms.

B) Lewis :

$$NO_x = 3,32 \times 10^{-6} \exp(0,008T_c) P^{0.5} \text{ ppmv} \quad (2-9)$$

Αυτή η εξίσωση δείχνει το ποσοστό του NO_x που σχηματίζεται σε πτωχή ομογενή καύση. Υποδεικνύει ότι ο σχηματισμός NO_x εξαρτάται μονό από την μετά της καύσης θερμοκρασία και πίεση. Επίσης είναι εντελώς εξαρτωμένη από το χρόνο παραμονής των αερίων στο καυστήρα. Συμφωνά με τον Lewis αυτό γίνεται επειδή ο σχετικός χρόνος δεν είναι ο χρόνος παραμονής των προϊόντων καύσης αλλά περισσότερο ο χρόνος ηρεμίας των μορίων που εμπλέκονται και έτσι είναι το ίδιο σε όλα τα συστήματα καύσης που χρησιμοποιούν αέρα. Όμως, εκφράσεις για NO_x που δεν λαμβάνουν υπόψη το χρόνο παραμονής, μπορούν να παρέχουν μια καλή πρόβλεψη πειραματικών δεδομένων επειδή ο χρόνος παραμονής όλων των καυστήρων αεριοστροβίλων τείνει να γίνει ο ίδιος, μεριά ms. Είναι μόνο όταν οι εκφράσεις για βιομηχανικούς αεριοστροβίλους εφαρμόζονται σε αεριο-καυστήρες ή αντίστροφα όπου η έλλειψη του χρόνου παραμονής γίνεται σημαντικός.

Γ) Rokke:

$$\text{NO}_x = 18,1 P^{1,42} m^{0,3} q^{0,72} \text{ ppmv} \quad (2-10)$$

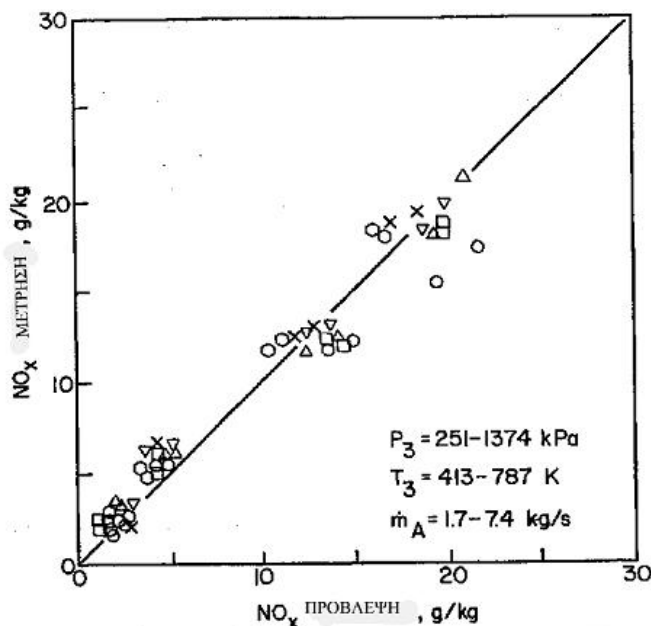
Αυτή η εξίσωση συσχετίζει πολύ ικανοποιητικά τις μετρήσεις NO_x από 5 διαφορετικές φυσικού αερίου βιομηχανικές μηχανές που λειτουργούσαν σε εύρος ισχύς από 1,5 μέχρι 34 MW. Παρόλο που η θερμοκρασία καύσης είναι εμφανής δια της απουσίας της στην εξίσωση 2-10, η επιρροή της στις εκπομπές NO_x αναγνωρίζεται από την συμπερίληψη του όρου αέρα/καύσιμου.

Δ) Rizk and Mongia:

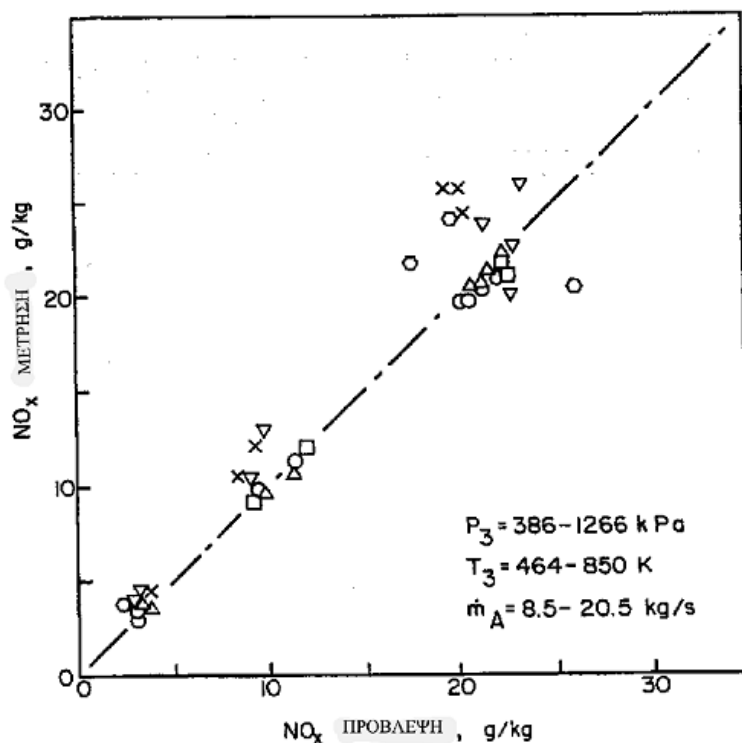
$$\text{NO}_x = 15,10^{14} (t - 0,5t_e)^{0,5} \exp - (71,100/T_{st})P^{-0,05} (\Delta P/P)^{-0,5} \text{ g/kg καυσίμου} \quad (2-11)$$

Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό αυτής της εξίσωσης είναι ότι περιλαμβάνει τον όρο t_e για να ληφθεί υπόψη η επιρροή της εξάτμισης του καυσίμου στις εκπομπές NO_x. Σύμφωνα με την εξίσωση 2-11, μια μείωση στο μέγεθος των σταγονιδίων μπορεί να αυξήσει τις εκπομπές NO_x με την μείωση του χρόνου που χρειάζεται για την εξάτμιση καυσίμου. Όμως, αν η καύση γίνει κάτω από συνθήκες όπου ο χρόνος εξάτμισης είναι σχετικά μικρός σε σχέση με το συνολικό χρόνο παραμονής καυστήρα, για παράδειγμα, σε υψηλές πίεσης καύσης, οι εκπομπές NO_x μπορούν να μειωθούν με τη μείωση του μεγέθους των σταγόνων.

Συγκρίσεις μεταξύ των διαφόρων εξισώσεων που έχουν εκδοθεί για την πρόβλεψη των εκπομπών NO_x από συμβατικούς καυστήρες απαγορεύονται λόγω του γεγονότος ότι σε μερικές περιπτώσεις οι μονάδες για το NO_x είναι σε ppmv και σε άλλες gr/Kg καυσίμου (EI). Η μετατροπή από το ένα σετ από μονάδες στο άλλο δε μπορεί να γίνει εκτός και αν η αναλογία της ισοδυναμίας είναι γνωστή αλλά, σαν πρόχειρο οδηγό, ένα EI είναι περίπου όσο με 12 ppmv. Γενικά, οι περισσότερες εκφράσεις για το NO_x παρέχουν ένα εξαιρετικό ταίριασμα με τα πειραματικά δεδομένα που περιλαμβάνονται σε αυτή τη πηγή. Αφού ο σχηματισμός NO_x σε συμβατικούς καυστήρες γίνεται κυρίως μέσω του θερμικού μηχανισμού, που εξαρτάται από την θερμοκρασία του αντιδραστήρα, αυτό δεν αποτελεί έκπληξη.



2-41 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ NO_x ΓΙΑ ΤΟΝ ΚΑΥΣΤΗΡΑ GE J79-17A



2-42 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ NO_x ΓΙΑ ΤΟΝ ΚΑΥΣΤΗΡΑ GE F101

- Εκφράσεις για το CO

Παρόμοιες συσχετίσεις με αυτές που συζητήσαμε πιο πάνω για το NO_x έχουν αναπτυχτεί και για το CO. Μια σημαντική διάφορα πηγάζει από το γεγονός ότι ο σχηματισμός CO στην κύρια ζώνη καύσης παίρνει περισσότερο χρόνο απότι με το NO_x. Συνεπώς, η σχετική θερμοκρασία δεν είναι η τιμή της τοπικής κορύφωσης των εξατμιζόμενων σταγονιδίων καύσιμου, αλλά η μέση τιμή (T_{pz}) μέσα στην κύρια ζώνη. Επίσης, επειδή η εκπομπές CO είναι περισσότερο σημαντικές σε καταστάσεις χαμηλής πίεσης όπου οι τιμές εξάτμισης είναι σχετικά αργές, είναι απαραίτητο να μειωθεί ο όγκος της καύσης V_c , από τον όγκο που απασχολείται κατά την εξάτμιση του καύσιμου V_e .

Μια προσέγγιση δίνει :

$$CO = 86m_A T_{PZ} \exp - (0,00345T_{PZ}/(V_C - V_e)(\Delta P/P)^{0,5} \text{ g/kg καυσίμου} \quad (2-12)$$

Όπου:

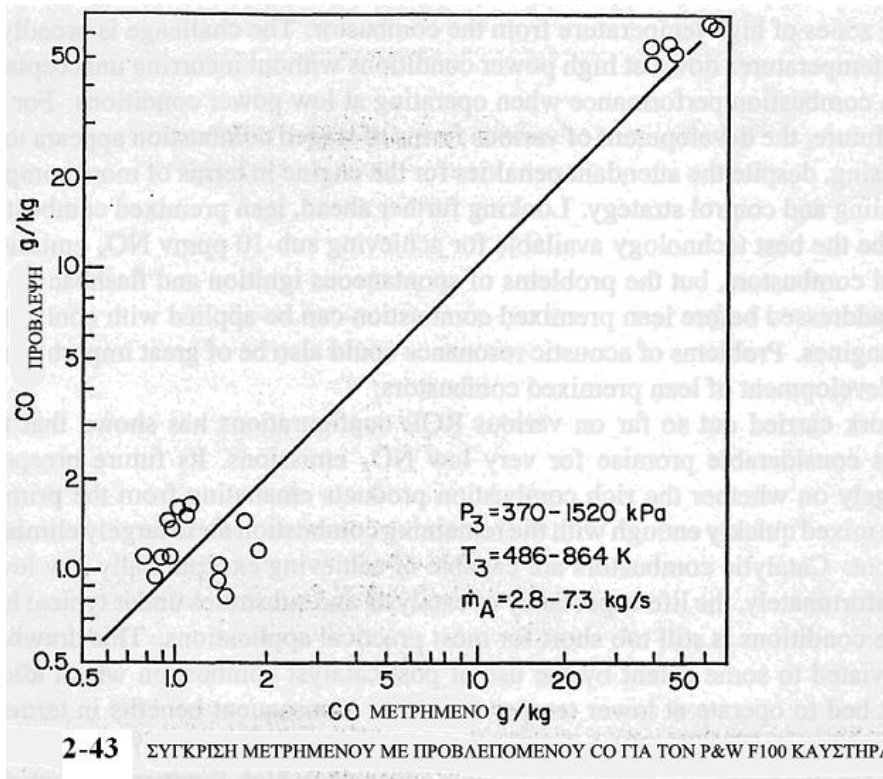
V_e , ο όγκος που καταλαμβάνεται κατά την εξάτμιση του καύσιμου, $V_e = 0,55m_{pz}D_o^2 / \rho_{pz}^{\lambda_{eff}}$
 Σε αυτή την εξίσωση είναι ενδιαφέρον ότι το V_e είναι ανάλογο με το τετράγωνο του αρχικού μεγέθους του σταγονιδίου. Αυτό, επισημαίνει την σημασία της καλής εξάτμισης στην επίτευξη χαμηλού CO. Η ικανότητα της εξίσωσης 2-12 να προβλέψει τις εκπομπές CO από τους καυστήρες P&W F100 και GE F101 φαίνεται στις εικόνες 2.43 και 2.44 αντίστοιχα.

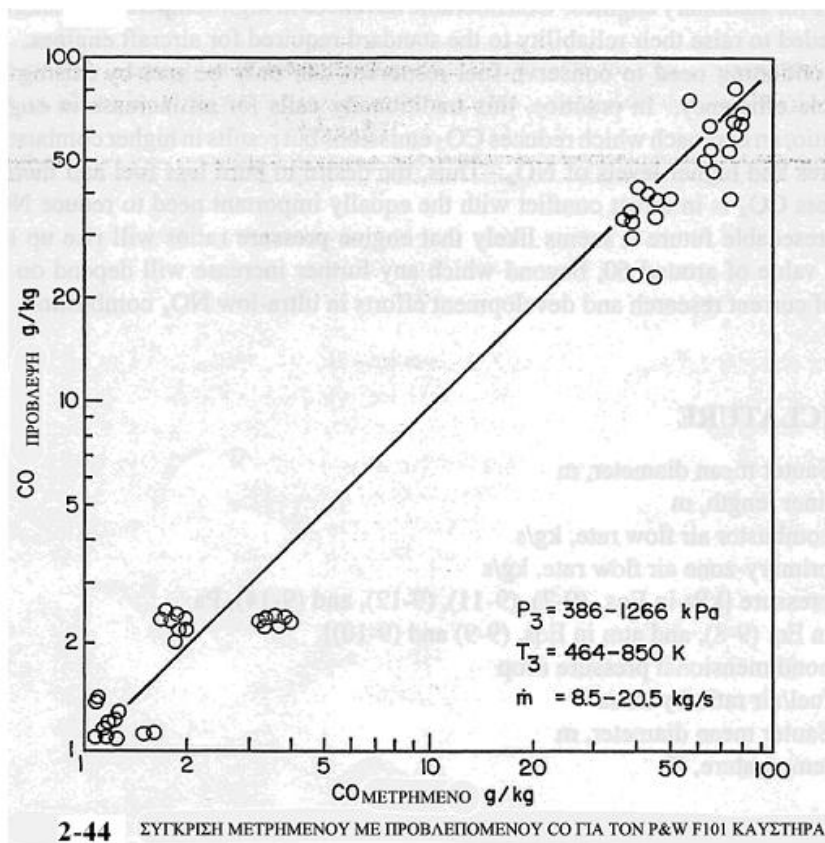
Μια παρόμοια μορφή έκφρασης της εξίσωσης (212) προέρχεται από τους Rizk and Mongia :

$$CO = 0.18 \times 10^9 \exp(7800/T_{pz}) / P^2 (t-0.4t_e)(\Delta P/P)^{0,5} \text{ g/kg καυσίμου} \quad (2-13)$$

Αυτή η εξίσωση αποδίδει μια σχετικά μικρότερη εξάρτηση στην θερμοκρασία καύσης και μια σχετικά μεγαλύτερη εξάρτηση στην πίεση απ' ό,τι στην εξίσωση 2-12.

Παράμετροι συσχέτισης έχουν επίσης αναπτυχτεί για UHC και καπνό, αλλά τείνουν να είναι λιγότερο αξιόπιστοι από αυτούς για NO_x και CO.





2-12 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μεγαλύτερη σημασία στους αυστηρούς ελέγχους εκπομπών ρύπων από αεριοστροβίλους, δίνεται στο NO_x . Χαμηλά επίπεδα NO_x επιτυγχάνονται με τον αποκλεισμό ζωνών υψηλής θερμοκρασίας από τον καυστήρα. Η πρόκληση είναι κυρίως να κρατηθούν οι θερμοκρασίες της φλόγας χαμηλά σε συνθήκες μεγάλης ισχύς χωρίς να υπάρχουν κυρώσεις στην απόδοση κατά τη λειτουργία σε συνθήκες χαμηλής ισχύς. Για το άμεσο μέλλον, η ανάπτυξη διαφόρων μορφών σταδιακής καύσης δείχνει να είναι η πιο ελπιδοφόρα, παρά τις κυρώσεις για τον κινητήρα από την άποψη του ποιο πολύπλοκου προγραμματισμού για το καύσιμο και τη στρατηγική έλεγχου. Κοιτώντας ακόμα παραπέρα, η πτωχή προαναμεμιγμένη καύση δείχνει να είναι η καλύτερη τεχνολογία για την επίτευξη εκπομπών NO_x κάτω από τα 10 ppmv σε βιομηχανικούς καυστήρες, αλλά τα προβλήματα της απότομης ανάφλεξης και του flashback πρέπει να αντιμετωπιστούν για να μπορεί αυτή η μέθοδος να εφαρμοστεί σε κινητήρες αεροσκαφών. Τα προβλήματα της ακουστικής συνήχησης είναι επίσης μεγάλης σημασίας.

Η εργασία που έχει γίνει μέχρι τώρα σε διαφορές RQL διαμορφώσεις, έδειξε ότι αυτό το σχέδιο έχει καλές προοπτικές για πολύ χαμηλές εκπομπές NO_x . Το μέλλον του εξαρτάται από το αν τα προϊόντα καύσης που βγαίνουν από την κύρια ζώνη μπορούν να αναμιχθούν με τον υπόλοιπο αέρα καύσης αρκετά γρήγορα ώστε να εξαλείφει το NO_x και η αιθάλη. Δυστυχώς, η διάρκεια ζωής των καταλυτών και των επιστρωμάτων κάτω από τυπική μεγάλη θερμοκρασία, είναι πολύ μικρή για πρακτικές εφαρμογές. Αυτό το μειονέκτημα μπορεί να αντιμετωπιστεί σε κάποιο βαθμό με την χρήση της μετά του καταλύτη καύσης που επιτρέπει στην επίστρωση του καταλύτη να λειτουργεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες που δίνουν πλεονέκτημα στην διάρκεια ζωής. Η εργασία που βρίσκεται σε εξέλιξη τώρα κατευθύνεται κυρίως προς τους καταλυτικούς καυστήρες και τους στάσιμους κινητήρες. Σημαντική

πρόοδος χρειάζεται να γίνει στα υλικά υψηλών θερμοκρασιών για να αυξηθεί η αξιοπιστία τους στο επίπεδο που χρειάζεται στους κινητήρες αεροσκαφών.

Η συνεχόμενη ανάγκη να διατηρηθούν οι πόροι καύσιμου μπορεί να επιτευχτεί με την αύξηση της αποδοτικότητας του κύκλου του κινητήρα. Στην πράξη, αυτό επιζητεί αύξηση στην αναλογία της πίεσης, μια προσέγγιση που μειώνει τις εκπομπές CO₂ αλλά έχει ως αποτέλεσμα σε υψηλότερες θερμοκρασίες καύσης και σε μεγαλύτερα επίπεδα NO_x. Έτσι, η επιθυμία να καεί λιγότερο καύσιμο έρχεται σε αντιπαράθεση με την εξίσου σημαντική ανάγκη να μειωθεί το NO_x. Για το μέλλον, φαίνεται πιθανό ότι οι αναλογίες της πίεσης των κινητήρων θα αυξηθούν με μια μέγιστη τιμή γύρω στο 60, περά από το οποίο, οποιαδήποτε άλλη αύξηση θα εξαρτάται από το αποτέλεσμα της τωρινής ερευνάς και ανάπτυξης της πολύ χαμηλής σε NO_x καύσης.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Bahr, D.W., "Aircraft Engine NOx emissions, Int. Symp. On Air Breathing Engines, ISABE 2005.
2. Angelo, L. and Lowe, P., "DLN Combustion Developments for electric utility gas turbine applications," ASME, 2007
3. Hung, W.S.Y., "CO emissions from Gas Turbines as influenced by ambient temperature and turbine load", Journal of engineering for gas turbines and power, Vol. 115, No. 3, 1993
4. Rink, K.K, "Influence of Fuel Drop Size and Combustor Operating Conditions on Pollutant emissions", Int. Journal of Turbo and Jet Engines, Vol. 6, No. 2, 1989.
5. Hawthorne, W.R., "Reflections on UK Aircraft Gas Turbine Industry", ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power.
6. Meher-Homji, C.B., "The development of Jumo 004", ASME paper GT-457.
7. Adkins, R.C. "Selection of Pre-Combustor Diffuser", Lecture Notes, Cranfield University, UK, 2009.
8. Pilidis, P., "Development of Gas Turbine Combustion Techniques", Lecture Notes, Cranfield University, UK, 2007.
9. Razdan, M.K., Bach, C.S., and Bautista P.J., "Field Experience of Dry Low Emissions Combustion Systems", ASME paper 97/AA/13.
10. Chin, J.S., "Influence of fuel Chemical properties on Soot Emissions from Gas Turbine Combustors", ASME paper GT-261.
11. Leonar, G. and Stegmaier, J., "Development of an Aeroderivative Gas Turbine DL Emissions Combustion System", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power.
12. Davis, L.B., and Washam, R.M., "Development of Dry Low Nox combustor", ASME paper GT-255.
13. Nicol, D., Marinov, N. and Pratt, D.T., "NOx Sensitivities for Gas Turbine Engines operated on Lean-Premixed Combustion and Conventional Diffusion Flames", ASME paper GT-115.
14. Fennimore, C.P., "Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames", Symposium on Combustion, The Combustion Institute
15. Heberling, P.V., "Prompt NO Measurements at High Pressures," Symposium on Combustion, The Combustion Institute.
16. Merryman, E.L., and Levy, A., "Nitric oxide formation in Flames: the role of NO₂ and fuel Nitrogen", Symposium on Combustion, The Combustion Institute.
17. Leonard, G., and Correa, S., "NOx Formation in Lean premixed High-pressure methane flames", ASME Fossil Combustion Symposium.
18. Steele, R.C., "Variables affecting NOx formation in Lean premixed combustion", ASME paper GT-107.
19. Hilt, M., and Waslo, J., "Evolution of NOx abatement techniques through combustor design for heavy-Duty Gas Turbines", Journal of Engineering Gas Turbines and Power.
20. McNight, D., "Development of a Compact Gas Turbine Combustor to give extended life and acceptable exhaust emissions", Journal of Engineering for Power.
21. Washam, R., "Dry Low NOx Combustion System for Utility Gas Turbine", ASME paper JPGC-GT-13.
22. Etheridge, G.J., "Lean premix combustion technology in production", ASME paper GT-255.
23. Koff, B., "Aircraft Gas Turbine Emissions Challenge", ASME paper GT-422.
24. Pfefferle, W., "Catalytically Supported Thermal Combustion", ASME paper GT-106.

25. Feitelberg, A.S., "The GE rich-quench-lean gas turbine combustor", ASME paper GT-127.
26. Rizk, N., and Mongia, C., "Low NOx Rich-lean Combustion", AIAA paper 91-1962.
27. Mosier, S. "Advanced Combustion Systems for Stationary gas Turbine Engines", EPA 68-02-2136.