

Α.Τ.Ε.Ι. ΠΑΤΡΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΜΠΑΓΚΡΟΖΗΣ ΑΝΔΡΕΑΣ  
ΚΑΠΠΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ  
ΚΑΛΟΓΗΡΟΥ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΑΥΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ  
ΠΡΟΗΓΜΕΝΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ  
ΝΕΖΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ  
ΘΕΩΝΑΣ ΓΙΩΡΓΟΣ  
ΚΑΣΤΑΝΙΩΤΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ ΜΑΙΟΣ 2004

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο ΒΑΣΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΥΣΗΣ

#### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

#### 1.2. ΜΟΡΦΕΣ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΥΣΗΣ

- Α) ΣΩΛΗΝΟΕΙΔΗΣ ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΑΥΣΗΣ
- Β) ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΗΣ ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΑΥΣΗΣ
- Γ) ΣΩΛΗΝΟΕΙΔΗΣ-ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΗΣ ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΑΥΣΗΣ

#### 1.3 ΔΙΑΧΥΤΕΣ

#### 1.4 ΠΡΩΤΟΓΕΝΗΣ ΖΩΝΗ

#### 1.5 ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΖΩΝΗ

#### 1.6 ΖΩΝΗ ΑΡΑΙΩΣΗΣ

#### 1.7 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

- Α) ΨΕΚΑΣΜΟΣ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΜΕ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ
- Β) ΨΕΚΑΣΜΟΣ ΔΙΑΦΥΓΗΣ-ΕΠΙΣΤΡΟΦΗΣ
- Γ) ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΨΕΚΑΣΜΟΣ
- Δ) ΨΕΚΑΣΤΕΣ ΤΥΠΟΥ "AIR BLAST"
- Ε) ΒΟΗΘΟΥΜΕΝΟΣ ΑΠΟ ΑΕΡΑ ΨΕΚΑΣΜΟΣ
- ΣΤ) ΕΞΑΕΡΩΤΕΣ
- Ζ) ΘΑΛΑΜΟΙ ΚΑΥΣΗΣ ΠΡΟΕΞΑΕΡΩΣΗΣ-ΠΡΟΑΝΑΜΕΙΞΗΣ
- Η) ΕΓΧΥΤΗΡΑΣ ΑΕΡΙΩΝ

#### 1.8 ΨΥΞΗ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ

- Α) ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΨΥΞΗΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΥΣΗΣ

#### 1.9 ΜΕΓΕΘΟΣ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΥΣΗΣ

#### 1.10 ΚΑΥΣΙΜΑ

#### 1.11 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΓΙΑ ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο ΑΡΧΕΣ ΚΑΥΣΗΣ

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Α) ΚΑΥΣΗ ΧΩΡΙΣ ΦΛΟΓΑ

Β) ΑΝΑΦΛΕΞΗ

Γ) ΑΥΤΑΝΑΦΛΕΞΗ

### 2.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΦΛΟΓΑΣ

Α) ΟΜΑΛΕΣ ΠΡΟΑΝΑΜΕΙΓΜΕΝΕΣ ΦΛΟΓΕΣ

Β) ΤΥΡΒΩΔΕΙΣ ΠΡΟΑΝΑΜΕΙΓΜΕΝΕΣ ΦΛΟΓΕΣ

Γ) ΟΜΑΛΕΣ ΦΛΟΓΕΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ

Δ) ΤΥΡΒΩΔΕΙΣ ΦΛΟΓΕΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ

### 2.3 ΟΡΙΑ ΕΥΦΛΕΚΤΟΤΗΤΑΣ

### 2.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ

Α) ΡΥΘΜΟΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ

### 2.5 ΕΞΑΕΡΩΣΗ

### 2.6 ΧΡΟΝΟΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΑΥΤΑΝΑΦΛΕΞΗΣ

### 2.7 ΕΠΙΣΤΡΟΦΗ ΦΛΟΓΑΣ

### 2.8 ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΑ

### 2.9 ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΦΛΟΓΑΣ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο ΚΑΥΣΙΜΑ ΑΕΡΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 3.2 ΠΡΟΣΘΕΤΑ

Α) ΠΡΟΛΗΨΗ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΕΩΝ

Β) ΑΝΑΣΤΟΛΗ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ

Γ) ΑΝΤΙΠΑΓΩΤΙΚΑ

Δ) ΑΝΤΙΣΤΑΤΙΚΑ

Ε) ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ

ΣΤ) ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΑΦΑΝΙΣΗ ΤΟΥ ΚΑΠΝΟΥ

### 3.3 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Α) ΣΧΕΤΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ

Β) ΕΥΡΟΣ ΑΠΟΣΤΑΞΕΩΣ

Γ) ΤΑΣΗ ΑΤΜΩΝ

Δ) ΣΗΜΕΙΟ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ

Ε) ΠΤΗΤΙΚΟΤΗΤΑ

ΣΤ) ΙΞΩΔΕΣ

- Ζ) ΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ
- Η) ΣΗΜΕΙΟ ΠΑΓΟΠΟΙΗΣΗΣ
- Θ) ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

### 3.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

- Α) ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΣ ΔΥΝΑΜΗ
- Β) ΕΝΘΑΛΠΙΑ
- Γ) ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΥΤΑΝΑΦΛΕΞΗΣ
- Δ) ΌΡΙΑ ΑΝΑΦΛΕΞΙΜΟΤΗΤΑΣ
- Ε) ΤΑΣΗ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΑΙΘΑΛΗΣ - ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΠΝΟΥ

### 3.5 ΚΑΥΣΙΜΑ ΣΕ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

- Α) ΈΓΧΥΣΗ ΑΕΡΑ
- Β) ΒΡΑΣΜΟΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ
- Γ) ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ
- Δ) ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ
- Ε) ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΑ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ
  1. ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ
  2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΥΣΙΜΟΥ
  3. ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΑΥΣΗΣ

ΣΤ) ΑΣΦΑΛΗ ΚΑΥΣΙΜΑ

### 3.6 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

- Α) ΠΙΣΣΩΔΗ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ
- Β) ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ (ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΙ)
- Γ) ΚΑΥΣΙΜΟ ΑΠΟ ΓΑΙΑΝΘΡΑΚΕΣ

### 3.7 ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

- Α) ΥΔΡΟΓΟΝΟ
- Β) ΜΕΘΑΝΙΟ
- Γ) ΠΡΟΠΑΝΙΟ
- Δ) ΑΜΜΩΝΙΑ
- Ε) ΑΛΚΟΟΛΕΣ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο ΕΓΧΥΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 4.2 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΕΓΧΥΤΗΡΩΝ

### 4.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

### 4.4 ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

- Α) ΜΕΣΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΣΤΑΓΟΝΑΣ

- Β) ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΣΤΑΓΟΝΩΝ
- Γ) ΜΟΡΦΗ ΨΕΚΑΣΜΟΥ
- Δ) ΓΩΝΙΑ ΤΟΥ ΚΩΝΟΥ
- Ε) ΔΙΑΣΠΟΡΑ
- ΣΤ) ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΟΤΗΤΑ

#### 4.5 ΕΠΙΠΕΔΟΙ ΨΕΚΑΣΤΕΣ

#### 4.6 ΨΕΚΑΣΤΕΣ ΤΥΠΟΥ SIMPLEX

- Α) ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ
- Β) ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ
- Γ) ΠΑΡΟΧΗ ΜΑΖΑΣ

#### 4.7 ΨΕΚΑΣΤΕΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΕΥΡΟΥΣ

- Α) ΔΙΠΛΟΣ (ΔΙΔΥΜΟΣ) ΨΕΚΑΣΤΗΣ
- Β) ΨΕΚΑΣΤΗΣ ΔΙΠΛΗΣ ΟΠΗΣ
- Γ) ΨΕΚΑΣΤΗΣ ΜΕ ΔΙΑΦΥΓΗ

#### 4.8 ΨΕΚΑΣΤΕΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ SPRAY

#### 4.9 ΔΙΝΟΨΕΚΑΣΤΕΣ

- Α) ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

#### 4.10 ΑΕΡΟΒΟΗΘΟΥΜΕΝΟΙ ΨΕΚΑΣΤΕΣ

#### 4.11 ΨΕΚΑΣΤΕΣ ΤΥΠΟΥ "AIR BLAST"

- Α) ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ

#### 4.12 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΞΑΕΡΩΣΗΣ

#### 4.13 ΕΓΧΥΣΗ ΑΕΡΙΩΝ

#### 4.14 ΣΧΕΤΙΚΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΓΧΥΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

#### 4.15 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ

#### 4.16 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΕΓΧΥΤΗΡΑ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΥΨΗΛΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΓΙΑ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΟ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

### *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο ΑΝΑΦΛΕΞΗ*

#### 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

#### 5.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ

#### 5.3 ΑΝΑΦΛΕΞΗ ΜΕ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ

- Α) Όριο ζώης σπινθηριστή
- Β) Επίδραση του σχεδιασμού του σπινθηριστή
- Γ) Διάρκεια σπινθηρισμού
- Δ) Ρυθμός σπινθηρισμού
- Ε) Σύστημα αναφλέξης υψηλής ενέργειας

- ΣΤ) ΘΕΣΗ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ
- Ζ) ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ
- Η) ΉΓΧΥΣΗ ΟΞΥΓΟΝΟΥ
- Θ) ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΦΛΕΞΗ

#### 5.4 ΑΛΛΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ

- Α) ΑΝΑΦΛΕΚΤΗΡΑΣ ΤΥΠΟΥ ΑΥΛΟΥ
- Β) ΠΥΡΑΚΤΩΜΕΝΟ ΒΥΣΜΑ (ΡΕΥΜΑΤΟΛΗΠΤΗΣ)
- Γ) ΑΝΑΦΛΕΞΗ ΘΕΡΜΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ
- Δ) ΉΓΧΥΣΗ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

#### 5.5 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ

- Α) ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΠΡΩΤΗ ΦΑΣΗ
- Β) ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΕΥΤΕΡΗ ΦΑΣΗ
- Γ) ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΤΡΙΤΗ ΦΑΣΗ

#### 5.6 ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ

- Α) ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ
- Β) ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΡΟΗΣ
  1. ΠΙΕΣΗ ΑΕΡΑ
  2. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ
  3. ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΕΡΑ
  4. ΤΥΡΒΗ
- Γ). ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΥΣΙΜΟΥ
  1. ΤΥΠΟΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ
  2. ΛΟΓΟΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ/ ΑΕΡΑ
  3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ
  4. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο ΕΥΠΑΘΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ

#### 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- Α) ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ
- Β) ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΓΧΥΣΗΣ ΝΕΡΟΥ

#### 6.2 ΣΥΓΚΡΑΤΗΤΗΣ ΦΛΟΓΑΣ ΤΡΑΧΙΟΥΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ

- Α) ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΦΛΟΓΑΣ
- Β) ΜΕΛΕΤΕΣ ΨΥΧΡΗΣ ΡΟΗΣ
- Γ) ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ
- Δ) ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΕΜΦΡΑΞΗΣ
- Ε) ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΥΡΒΗΣ
- ΣΤ) ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΕΥΡΗΜΑΤΑ ΣΕ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ

(ΣΥΓΚΡΑΤΗΤΕΣ ΤΡΑΧΙΟΥΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ)

1. ΤΥΠΟΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ
2. ΛΟΓΟΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ/ ΑΕΡΑ
3. ΤΑΧΥΤΗΤΑ
4. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ
5. ΠΙΕΣΗ
6. ΤΥΡΒΗ
7. ΜΕΓΕΘΟΣ ΣΥΓΚΡΑΤΗΤΗ
8. ΣΧΗΜΑ ΣΥΓΚΡΑΤΗΤΗ
9. ΨΕΚΑΣΤΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Ζ) ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΕΥΡΗΜΑΤΩΝ

6.3 ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ ΣΕ ΘΑΛΑΜΟ ΚΑΥΣΗΣ

Α) ΈΓΧΥΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

6.4 ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΔΗ ΣΥΓΚΡΑΤΗΤΩΝ ΦΛΟΓΑΣ

- Α) ΒΗΜΑΤΙΚΟΣ ΣΥΓΚΡΑΤΗΤΗΣ
- Β) ΔΙΑΤΡΗΤΑ ΕΛΑΣΜΑΤΑ
- Γ) ΚΙΝΗΤΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ
- Δ) ΑΝΑΒΛΥΣΤΗΡΕΣ ΥΓΡΟΥ

*ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ*

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

7.2 ΨΥΞΗ ΜΕ ΛΕΠΤΟ ΣΤΡΩΜΑ ΑΕΡΑ (ΦΙΛΜ)

- Α) ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΠΤΩΣΗΣ ΤΗΣ ΟΛΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ
- Β) ΔΑΚΤΥΛΙΟΙ ΨΥΞΗΣ ΔΙΑΣΚΟΡΠΙΣΜΟΥ
- Γ) ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΟΙ ΣΕ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΙ
- Δ) ΣΧΕΤΙΚΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΨΥΞΗΣ ΜΕ ΦΙΛΜ ΑΕΡΑ

7.3 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΨΥΞΗΣ ΤΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ

- Α) ΦΙΛΜ ΨΥΞΗΣ ΜΕ ΑΥΞΗΜΕΝΗ ΣΥΝΑΓΩΓΗ
- Β) ΨΥΞΗ ΜΕ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗ ΑΕΡΑ
- Γ) ΨΥΞΗ ΜΕ "ΑΝΑΠΝΟΗ"
  1. ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΨΥΞΗΣ ΜΕ "ΑΝΑΠΝΟΗ"
- Δ) ΨΥΞΗ ΜΕ ΕΚΡΟΗ ΑΕΡΑ
- Ε) ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΜΕ ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ
- ΣΤ) ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΜΕ ΠΤΕΡΥΓΙΑ
- Ζ) ΠΥΡΙΜΑΧΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ
- Η) ΥΛΙΚΑ ΥΨΗΛΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ
- Θ) ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8ο ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ

### 8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 8.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΡΥΠΩΝ

- Α) ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ (CO)
- Β) ΆΚΑΥΤΟΙ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ (UHC)
- Γ) ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ (NOx)

1. ΘΕΡΜΙΚΟ NO
2. "ΤΑΧΥ" NO
3. NO ΚΑΥΣΙΜΟΥ
4. ΕΚΠΟΜΠΕΣ NO<sub>2</sub>

#### Δ) ΕΚΠΟΜΠΗ ΚΑΠΝΟΥ

1. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ
2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΙΕΣΗΣ
3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ
4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ
5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΗΣ ΣΤΑΓΟΝΑΣ ΤΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

### 8.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΡΥΠΩΝ

- Α) ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ (CO)
- Β) ΆΚΑΥΤΟΙ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ (UHC)
- Γ) ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ (NOx)
- Δ) ΚΑΠΝΟΣ

### 8.4 ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΧΑΜΗΛΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

- Α) ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ
- Β) ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗ ΚΑΥΣΗ
- Γ) ΦΤΩΧΗ ΠΡΟΑΝΑΜΕΙΓΜΕΝΗ - ΠΡΟΞΑΕΡΩΜΕΝΗ ΚΑΥΣΗ
- Δ) ΚΑΥΣΗ ΣΕ ΣΤΑΔΙΑ

## ΕΠΙΛΟΓΟΣ

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εκτέλεση της αποστολής ενός αεροσκάφους αλλά ακόμα και η ίδια η επιβίωση του, κάτω από τις σκληρές συνθήκες που του επιφυλάσσει η πτήση, εξαρτώνται από την αρμονική και άριστη συνεργασία των εξαρτημάτων του είτε αυτά είναι το δομικά μέρη ή ο κινητήρας, τα ηλεκτρονικά ακόμα και ο ίδιος ο χειριστής. Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με το θερμό τμήμα του κινητήρα και συγκεκριμένα με το θάλαμο καύσης. Στις σελίδες που θα ακολουθήσουν θα προσπαθήσουμε να ανασκοπήσουμε την πρόοδο και να προβλέψουμε τις μελλοντικές εξελίξεις στην τεχνολογία της καύσης αλλά και σε αυτή των καυσίμων.

Η διαδικασία για τη βελτίωση της απόδοσης ενός κινητήρα και συγκεκριμένα στην περίπτωση μας του θαλάμου καύσης, είναι βασικά μια αναλυτική διεργασία, στην οποία αναλύουμε την απόδοση στα εξαρτήματα του θαλάμου καύσης και αναζητούμε το βέλτιστο συνδυασμό προηγμένης τεχνολογίας, η οποία αν ενσωματωθεί θα μας αποδώσει τη βέλτιστη κατασκευή συστήματος καύσης. Πρώτα όμως πρέπει να είναι γνωστές οι παράμετροι αποστολής, οι συνθήκες δηλαδή λειτουργίας του κινητήρα όπως το Mach, το ύψος, η εμβέλεια κ.τ.λ. Εφόσον το βασικό σχέδιο του κινητήρα είναι γνωστό και έχει αποφασισθεί, σε πρώτη προσέγγιση, ο συνδυασμός των εξαρτημάτων, γνωστοποιούνται οι παράμετροι επίδοσης των εξαρτημάτων όπως η πίεση, η θερμοκρασία, το ιξώδες και η ταχύτητα. Έπειτα τα χαρακτηριστικά των επιδόσεων των εξαρτημάτων, που ήδη αποτελούν το θάλαμο καύσης, συγκρίνονται με αυτά των τεχνολογικά πιο προηγμένων. Πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη ότι η βέλτιστη απόδοση ενός θαλάμου καύσης μπορεί να επιτευχθεί μόνο αν σε αυτόν ενσωματωθεί η νέα τεχνολογία, σε σωστή αναλογία. Τότε ο θάλαμος ξαναδοκιμάζεται, να προσδιορισθούν οι βελτιώσεις στην επίδοση του και να υπολογισθούν τα πλεονεκτήματα του στην εκπλήρωση της αποστολής.

Όπως θα φανεί και από τη διάρθρωση της εργασίας, η προσέγγιση στο θέμα των θαλαμών καύσης θα ακολουθήσει μια συγκεκριμένη σειρά. Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται τα γενικά περί θαλάμων καύσης, τα είδη τους και περιγράφονται τα κυριότερα εξαρτήματά τους. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσονται οι βασικότερες έννοιες που σχετίζονται με τη διαδικασία της καύσης. Από εκεί και πέρα, ξεχωριστά σε κάθε ενότητα θα ασχοληθούμε με τα καύσιμα των αεροκινητήρων και τις εκπομπές τους, την έγχυση του καυσίμου και την ανάφλεξη του, τους μηχανισμούς που εξασφαλίζουν την ευστάθεια της φλόγας καθώς και τους τρόπους επίτευξης της ψύξης των θαλαμών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1  
ΒΑΣΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΘΑΛΑΜΩΝ  
ΚΑΥΣΗΣ

## **1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Ένας θάλαμος καύσης ενός στροβιλοκινητήρα πρέπει να ικανοποιεί ένα ευρύ σύνολο από απαιτήσεις των οποίων η σχετική σημασία διαφέρει ανάλογα με τον τύπο. Όμως οι βασικές και πρωταρχικές απαιτήσεις που έχουμε από τους θαλάμους καύσης μπορούν να περιγραφούν ως εξής:

1. Μεγάλη απόδοση στην καύση (όλο το καύσιμο πρέπει να καεί πλήρως έτσι ώστε ν' απελευθερωθεί όλη η χημική ενέργεια με τη μορφή της θερμότητας).
2. Αξιοπίστη και ομαλή ανάφλεξη και στο έδαφος (ειδικά σε συνθήκες χαμηλής ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας) και στον αέρα σε περίπτωση που ο κινητήρας σβήσει σε πολύ μεγάλο ύψος.
3. Σταθερή λειτουργία ανεξάρτητα από τις συνθήκες λειτουργίας (η φλόγα πρέπει να διατηρείται αναμμένη για μεγάλες περιοχές μεταβολής της πίεσης, της ταχύτητας και του λόγου αέρα/ καυσίμου).
4. Αποφυγή κρουστικών κυμάτων και άλλων φαινομένων που διαταράσσουν την καύση.
5. Μικρές απώλειες πίεσης.
6. Μια κατανομή θερμοκρασίας στην έξοδο του θαλάμου καύσης που θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ορίου ζωής στα πτερύγια του στροβίλου και του ακροφύσιου.
7. Μικρές εκπομπές καπνού άκαυτου καυσίμου και ουσιών που μολύνουν το περιβάλλον.
8. Μέγεθος και σχήμα συμβατό με την σχεδίαση του κινητήρα.
9. Σχεδίαση για ελάχιστο κόστος και ευκολία στη συντήρηση.
10. Ανθεκτικότητα.
11. Δυνατότητα χρήσης διαφορετικών καυσίμων.

Για αεροπορικούς κινητήρες η απαίτηση για μικρό μέγεθος και ελάχιστο βάρος είναι σαφώς μείζονος σημασίας ενώ στους βιομηχανικούς κινητήρες το ενδιαφέρον κινείται σ' άλλους τομείς όπως η χρήση διαφορετικών καυσίμων και το μεγάλο όριο ζωής.

## **1.2 ΜΟΡΦΕΣ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΥΣΗΣ**

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι θαλάμων καύσης, ο σωληνοειδής και ο δακτυλιοειδής. Ένας ακόμα τύπος που χρησιμοποιείται πολύ συχνά είναι και ο σωληνοειδής-δακτυλιοειδής θάλαμος καύσης στον οποίο ένα πλήθος από σωληνοειδών θαλάμων καύσης τοποθετούνται σ' ένα δακτυλιοειδές κέλυφος.

### **1.2.α. ΣΩΛΗΝΟΕΙΔΗΣ ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΑΥΣΗΣ**

Ένας τέτοιος θάλαμος καύσης αποτελείται από ένα κυλινδρικό σωλήνα τοποθετημένο μέσα σ' ένα κυλινδρικό κέλυφος. Αρκετοί από τους πρώτους στροβιλοκινητήρες χρησιμοποιούσαν σωληνοειδείς θαλάμους καύσης συνήθως από 7 έως 16 στον κάθε κινητήρα ενώ ακόμη και σήμερα θάλαμος καύσης μ' ένα μόνο σωλήνα μπορεί να προτιμηθεί για έναν μικρών απαιτήσεων κινητήρα. Ωστόσο για την πλειονότητα των αεροπορικών εφαρμογών το σωληνοειδές σύστημα είναι πολύ μεγάλο και βαρύ με αποτέλεσμα μεγάλη μετωπική επιφάνεια και αυξημένη οπισθέλκουσα.

### **1.2.β. ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΗΣ ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΑΥΣΗΣ**

Σ' αυτόν τον τύπο ένας δακτυλιοειδής θάλαμος καύσης τοποθετείται μέσα σε μια δακτυλιοειδή θήκη. Είναι μια ιδανική μορφή θαλάμου καύσης αφού ο "καθαρός" αεροδυναμικός σχεδιασμός επιτρέπει ελάχιστες απώλειες πίεσης. Δυστυχώς όμως ένα σοβαρό μειονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι οποιοδήποτε μεταβολή στην κατανομή της ταχύτητας του εισερχομένου αέρα προκαλεί σημαντική αλλαγή στην κατανομή της θερμοκρασίας των καυσαερίων. Άλλο ένα πρόβλημα με τους μεγάλους δακτυλιοειδείς θαλάμους καύσης προέρχεται από την δυναμική επιβάρυνση του εξωτερικού θαλάμου καύσης. Παραμόρφωση του θαλάμου καύσης διακόπτει τη ροή του ψυχρού αέρα και αλλάζει την κατανομή θερμοκρασίας των καυσαερίων.

### **1.2.γ. ΣΩΛΗΝΟΕΙΔΗΣ-ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΗΣ ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΑΥΣΗΣ**

Σ' αυτό τον τύπο θαλάμου καύσης ένα σύνολο από κυλινδρικούς θαλάμους καύσης τοποθετείται μέσα σ' ένα μόνο δακτύλιο. Αυτός ο τύπος προσπαθεί να συνδυάσει το μικρό μέγεθος του δακτυλιοειδούς θαλάμου καύσης με τα καλύτερα χαρακτηριστικά του σωληνοειδούς συστήματος. Συγκρίνοντας τη κατασκευή αυτή με το δακτυλιοειδή θάλαμο καύσης διαπιστώνουμε ένα σημαντικό πλεονέκτημα ότι δηλαδή ο θάλαμος καύσης μπορεί να λειτουργήσει με μέτριες παροχές αέρα χρησιμοποιώντας ένα μέρος του θαλάμου καύσης που περιέχει ένα ή περισσότερους επιμέρους θαλάμους καύσης. Το πρόβλημα με αυτή τη διαμόρφωση εντοπίζεται στην επίτευξη μιας συνεχούς και ικανοποιητικής ροής και συγκεκριμένα στο σχεδιασμό του διάχυτη. Σωληνοειδείς-Δακτυλιοειδείς θάλαμοι καύσης χρησιμοποιούνται εκτεταμένα αν και η μεγάλη πλειοψηφία θαλάμων καύσης ανήκουν στο δακτυλιοειδή τύπο.

Στον πίνακα 1 περιγράφονται περιληπτικά τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάζουν τα παραπάνω είδη θαλάμων καύσης.

ΤΥΠΟΙ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΥΣΗΣ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
1. Σωληνοειδής	1. Μηχανική ανθεκτικότητα. 2. Εύκολη ανάμιξη αέρα - καυσίμου	1. Ογκώδης και βαριά κατασκευή 2. Μεγάλες απώλειες πίεσης 3. Απαιτεί σωλήνες σύνδεσης των παρακείμενων θαλάμων καύσης με το περίβλημα
2. Δακτυλιοειδής	1. Ελάχιστο μήκος και βάρος. 2. Ελάχιστη μετωπική επιφάνεια. 3. Ελάχιστες απώλειες πίεσης.	1. Μεγάλος όγκος εξωτερικού θαλάμου καύσης. 2. Δύσκολη ανάμιξη αέρα – καυσίμου. 3. Δύσκολη επίτευξη σταθερής θερμοκρασίας εξόδου.
3. Σωληνοειδής – δακτυλιοειδής	1. Μηχανική ανθεκτικότητα. 2. Εύκολη ανάμιξη αέρα – καυσίμου. 3. Μικρές απώλειες πίεσης. 4. Μικρότεροι και ελαφρότεροι από τους σωληνοειδούς.	1. Μεγαλύτεροι από τους δακτυλιοειδής. 2. Απαιτεί σωλήνες σύνδεσης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΥΣΗΣ

### 1.3. ΔΙΑΧΥΤΕΣ

Σημαντική είναι και η απαίτηση για ελαχιστοποίηση των πτώσεων πίεσης κατά μήκος του θαλάμου καύσης. Μέρος αυτής της απώλειας οφείλεται στο σχήμα του θαλάμου καύσης και η υπόλοιπη (το κύριο μέρος) οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας σε μια ροή. Άρα  $\Delta P_{34} = \Delta P_c + \Delta P_h$ . Η  $\Delta P_c$  παριστάνει την πτώση πίεσης στο διάχυτη και στο θάλαμο καύσης. Αν κοιτάξουμε το θέμα από την πλευρά της καύσης θα διαπιστώσουμε ότι: η πτώση πίεσης στο διάχυτη είναι πράγματι μια απώλεια αλλά η πτώση πίεσης κατά μήκος του θαλάμου καύσης μεταφράζεται σε τύρβη, η οποία ευνοεί την ανάμιξη και την καύση. Συνεπώς ο ιδεώδης θάλαμος καύσης θα εμφανίσει όλη τη  $\Delta P_c$  στο θάλαμο καύσης ενώ η πτώση πίεσης στο διάχυτη θα είναι μηδέν. Τυπικές τιμές της  $\Delta P_c = 2-6\%$  της  $P_{03}$ .

Για να μειώσουμε την ταχύτητα εξόδου του συμπιεστή σε μια τιμή όπου η  $\Delta P_h$  είναι ανεκτή χρησιμοποιούμε διάχυτη για την ανάκτηση της δυναμικής πίεσης αλλά και για τη σταθεροποίηση της ροής. Υπάρχουν δύο βασικές φιλοσοφίες στο σχεδιασμό διάχυτων. Η μία σχετίζεται με τη χρήση ενός μεγάλου αεροδυναμικού διάχυτη για να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ανάκτηση δυναμικής πίεσης. Η άλλη φιλοσοφία σχεδιάσεως έχει να κάνει με τη χρήση ενός δακτυλιοειδούς

διάχυτη αμέσως μετά το συμπιεστή ακολουθούμενου από μία απότομη αύξηση της επιφάνειας του διάχυτη. Συγκρινόμενος με τον αεροδυναμικό διάχυτη, ο διάχυτης αυτός είναι κοντύτερος και θεωρείται ότι είναι λιγότερο ευαίσθητος σε μεταβολές του προφίλ της ταχύτητας του αέρα. Ένα προφανές του μειονέκτημα είναι η μεγάλη απώλεια πίεσης. Άλλο πρόβλημα προκύπτει με τη μικρή πτώση στατικής πίεσης κατά μήκος του θόλου που προκαλείται από την απότομη επιτάχυνση της ροής κοντά στην επιφάνεια του θόλου. Σήμερα και οι δύο τύποι διάχυτων χρησιμοποιούνται ευρύτατα. Όμως οι διάχυτες "απότομης εκτόνωσης" κερδίζουν συνέχεια έδαφος εξαιτίας της δυσκολίας κατασκευής του αεροδυναμικού διάχυτη.

#### **1.4. ΠΡΩΤΟΓΕΝΗΣ ΖΩΝΗ**

Οι λειτουργίες της πρωτογενούς ζώνης είναι να διατηρεί τη φλόγα και να παρέχει τον απαραίτητο χρόνο, θερμοκρασία και τύρβη για την επίτευξη τέλει καύσης του καυσίμου. Μεγάλης κλίμακας κυκλοφορία της ροής επιτυγχάνει με τη χρήση ενός μικρού αριθμού από μεγάλους αναβλαστήρες. Με αυτή τη διαμόρφωση η ανάμειξη του νέου μείγματος και τα προϊόντα της καύσης εμφανίζονται σιγά-σιγά και σαν αποτέλεσμα ο μέγιστος ογκομετρικός ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας τείνει να είναι χαμηλός. Όμως η καύση μπορεί να πραγματοποιηθεί για μεγάλο εύρος ροών καυσίμων και κάτω από χαμηλές πιέσεις. Μικρής κλίμακας κυκλοφορία επιτυγχάνεται με τη χρήση μεγάλου αριθμού μικρών αναβλαστήρων. Έντονα και θεαματικά αποτελέσματα ανάμειξης για υψηλή ογκομετρική, απελευθέρωση θερμότητας σημειώνονται για στοιχειομετρικά μείγματα. Συγκεκριμένα όμως αυτή η διαμόρφωση με αυτή της μεγάλης κλίμακας κυκλοφορίας, το πεδίο καύσης είναι πολύ στενό και η απόδοση χαμηλής πίεσης πολύ μικρή. Αυτή η διαμόρφωση εμφανίζει μεγάλες δυνατότητες καύσης με χαμηλές εκπομπές ρύπων όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με μεταβλητές γεωμετρίας. Ο όγκος που καταλαμβάνει η πρωτογενής ζώνη μπορεί να μειωθεί στο ελάχιστο αν και η καύση περιοριζόταν αποκλειστικά από τις αναλογίες των χημικών αντιδράσεων. Έχει αποδειχθεί ότι μεγάλες αναλογίες απόδοσης θερμότητας είναι πιθανές αν το καύσιμο εξαερωθεί πρώτα, μετά αναμειχθεί με τον αέρα έξω από τον θάλαμο καύσης και επιτυγχάνοντας μια μεγάλη πτώση πίεσης για την επίτευξη μείξης των προϊόντων της καύσης και του μείγματος. Όμως στην πραγματικότητα κάτι τέτοιο είναι ανέφικτο. Αυτό που μπορεί πρακτικά να γίνει είναι η προ-εξαέρωση του καυσίμου και η προ-ανάμειξή του με τον αέρα. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η μείωση των τιμών του λόγου αέρα/ καυσίμου για τις οποίες είναι δυνατή η διατήρηση σταθερής της φλόγας εκτός και αν χρησιμοποιηθούν κάποιες μορφές μεταβλητής γεωμετρίας. Αφού ο σχεδιαστής καθορίσει τη διάμετρο ή το ύψος του θαλάμου καύσης καλείται να προσδιορίσει τις διαστάσεις της πρωτογενούς ζώνης. Εν γένει ένα ικανοποιητικό διάγραμμα ανακυκλοφορίας μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση αναβλαστήρων που κείτονται ο ένας απέναντι στον άλλο, οι οποίοι οδηγούν τη ροή προς τα μέσα, από τα τοιχώματα του θαλάμου καύσης ή με τη χρήση αεροδινών. Η πλέον διαδεδομένη μέθοδος σήμερα, είναι ο

συνδυασμός των παραπάνω δύο μεθόδων. Σ' όλες τις περιπτώσεις η πρωτογενής ζώνη έχει κυκλική μορφή γεγονός που εξασφαλίζει μικρό μήκος.

### **1.5. ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΖΩΝΗ**

Σε κάθε θάλαμο καύσης η ενδιάμεση ζώνη πρέπει να έχει το απαιτούμενο μήκος έτσι ώστε να πραγματοποιεί τις δύο λειτουργίες της. Σε χαμηλά ύψη χρησιμοποιείται ως η περιοχή στην οποία οι απώλειες από διάσπαση της ροής μπορούν να ανακτηθούν και ολοκληρώνεται η καύση των μερών αυτών του μείγματος, που είναι πλούσια σε καύσιμο. Οι απώλειες από διάσπαση είναι αποτέλεσμα της χημικής αστάθειας των προϊόντων της καύσης, διοξειδίου του άνθρακα και νερό σε υψηλές θερμοκρασίες. Ακόμα κι αν η καύση έχει ονομαστικώς ολοκληρωθεί στις θερμοκρασίες από 2200 έως 2400 K που επικρατούν στη πρωτογενή ζώνη παρατηρείται διάσπαση του διοξειδίου του άνθρακα σε μονοξείδιο οξυγόνου (παρατηρείται σε μικρότερο βαθμό διάσπαση του νερού). Για ένα ευσταθές στοιχειομετρικό μείγμα σε πίεση 2MPa (20 atm) και θερμοκρασία 2350 K θα εμφανιστεί περίπου 1.5% μονοξείδιο του άνθρακα. Αν τα ζεστά καυσαέρια περνούσαν κατευθείαν στη ζώνη αραίωσης και ψύχονταν γρήγορα με τη βοήθεια μεγάλων ποσοτήτων αέρα, το μονοξείδιο που αρχικά αποτελεί καύσιμο θα έφευγε από το θάλαμο καύσης άκαυτο. Ρίχνοντας τη θερμοκρασία σ' ένα ενδιάμεσο επίπεδο με τη βοήθεια μικρής ποσότητας αέρα γίνεται δυνατή η καύση του μονοξειδίου. Σε μεγάλα ύψη (όπου η πίεση είναι χαμηλή) ο ρυθμός αντίδρασης στη πρωτογενή ζώνη είναι αργότερος εξαιτίας της μικρότερης συγκέντρωσης καυσίμου και αέρα και έτσι με το πέρας της ζώνης αυτής η καύση δεν έχει ολοκληρωθεί. Κάτω απ' αυτές τις συνθήκες η ενδιάμεση ζώνη χρησιμοποιείται ως προέκταση της πρωτογενούς ζώνης παρέχοντας ένα αυξημένο χρόνο παραμονής σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας πριν από τη ψύξη στη ζώνη αραίωσης. Το μήκος επομένως της ενδιάμεσης ζώνης έχει να κάνει με το συμβιβασμό ανάμεσα στο μεγάλο μήκος του θαλάμου καύσης και στη μειωμένη απόδοση καύσης. Τυπικές τιμές μήκους είναι μεταξύ 0.5 και 0.7 της διαμέτρου του θαλάμου καύσης. Όμως για κινητήρες αεροσκαφών που σχεδιάστηκαν για μεγάλες πτήσεις σε μεγάλα ύψη η ενδιάμεση ζώνη μπορεί να ξεπεράσει σε μήκος τη διάμετρο του θαλάμου καύσης. Συμπερασματικά το μέγεθος (μήκος) της ενδιάμεσης ζώνης υπαγορεύεται κατά ένα μέρος από το ελάχιστο απαιτούμενο μήκος για την μείξη του αέρα με τα καυσαέρια και κατά ένα άλλο μέρος από τον ελάχιστο απαιτούμενο χρόνο παραμονής έτσι ώστε να ολοκληρωθούν οι αντιδράσεις καύσης.

## **1.6. ΖΩΝΗ ΑΡΑΙΩΣΗΣ**

Ο ρόλος της ζώνης αυτής είναι να υποδέχεται τον εναπομείναντα άκαυτο αέρα από την καύση και να αποδώσει ένα ρεύμα εξόδου με μία μέση θερμοκρασία και μία θερμοκρασιακή κατανομή αποδεχτές από την τουρμπίνα. Ο αέρας αραιώσης εισάγεται μέσα από σειρές οπών στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης. Το μέγεθος και το σχήμα των οπών διαλέγονται έτσι ώστε να βελτιστοποιείται η εισαγωγή του αέρα και να διευκολύνεται η μείξη του με τα καυσαέρια. Η διείσδυση του αέρα (που έχει τη μορφή πίδακα) σε σχέση με τη διάμετρο των πιδάκων αυτών, εξαρτάται από την σχετική ορμή του αέρα και των καυσαερίων. Έχει μετρηθεί ότι η μέγιστη δυνατή διείσδυση είναι ίση με πέντε διαμέτρους πιδάκων. Οι πίδακες αυτοί πρέπει να εισχωρήσουν κατά μήκος του θαλάμου καύσης, γι' αυτό και το ελάχιστο μέγεθος τους εξαρτάται από το βάθος του θαλάμου καύσης.

Το ποσό του αέρα που διατίθεται για αραιώση βρίσκεται ανάμεσα στα 20-40% της ολικής ροής του θαλάμου καύσης. Θεωρητικά καλή ποιότητα ανάμειξης μπορεί να επιτευχθεί είτε με τη χρήση μιας μεγάλης ζώνης αραιώσης είτε με την αποδοχή ενός μεγάλου συντελεστή πτώσης πίεσης. Πρακτικά όμως έχει βρεθεί ότι η ποιότητα ανάμειξης αρχικά βελτιώνεται με μεγάλους ρυθμούς, με το μήκος και μετά η αύξηση αυτή μειώνεται προοδευτικά. Γι' αυτό το μήκος της ζώνης αραιώσης εξαρτάται από τη διάμετρο των πιδάκων που με τη σειρά τους εξαρτώνται από το πάχος του θαλάμου καύσης, έτσι ο λόγος L/D της ζώνης αραιώσης τείνει να βρίσκεται ανάμεσα σε 1.5 και 1.8.

Στους σύγχρονους κινητήρες το ιδανικό είναι ελάχιστη θερμοκρασία εκροής στην εισαγωγή του στροβίλου όπου οι καταπονήσεις είναι μέγιστες. Η επίτευξη του επιθυμητού αυτού προφίλ της θερμοκρασίας είναι μείζονος σημασίας, εξαιτίας της επίδρασης της θερμοκρασίας εισόδου του στροβίλου στο όριο ζωής του θερμού τμήματος του κινητήρα. Αυτό δικαιολογεί και τα μεγάλα ποσά που διατίθενται σε έρευνα πάνω σ' αυτό τον τομέα.

## **1.7. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

Η διαδικασία εξάτμισης και ψεκασμού σε άτομα του καυσίμου είναι πολύ σημαντική στην συμπεριφορά του συστήματος καύσης. Τα συνήθη καύσιμα δεν είναι αρκετά πτητικά έτσι ώστε η παραγωγή ατμών να φτάσει στο απαιτούμενο επίπεδο για να επιτευχθεί η ανάφλεξη, εκτός εάν ψεκαστούν σε μεγάλο νούμερο από σταγονίδια, αυξάνοντας έτσι την μετωπική επιφάνεια. Όσο μικρότερα είναι τα σταγονίδια τόσο μεγαλύτερος ο ρυθμός εξαέρωσης. Η επιρροή του μεγέθους των σταγονιδίων στην απόδοση της ανάφλεξης είναι εξαιρετικά σημαντική αφού αν η διάλυση δεν γίνει σωστά χρειάζονται μεγάλα ποσά ενέργειας για την επίτευξη της ανάφλεξης. Η ποιότητα της εξαερώσεως του καυσίμου επηρεάζει τα όρια ευστάθειας του συστήματος, την απόδοση καύσης και τα επίπεδα εκπομπής των ρύπων, όπως μονοξειδίου και άκαυτοι υδρογονάνθρακες.



### **1.7.α. ΨΕΚΑΣΜΟΣ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΜΕ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ**

Μια κοινή μέθοδος για την επίτευξη του ψεκασμού είναι με την πίεση του καυσίμου πάνω σε οπές. Εξαιτίας της ανάγκης για μείωση μεγέθους του θαλάμου καύσης, ο πιο κατάλληλος ψεκασμός γίνεται σε γωνία 90 μοιρών. Αυτό είναι αδύνατο να επιτευχθεί με άνοιγμα απλά μιας οπής αλλά, επιτυγχάνεται με τη χρήση στροβίλου (δινών) που αναγκάζουν το καύσιμο ν' αναβληθεί υπ' αυτή τη γωνία. Το μεγάλο πρόβλημα είναι η επίτευξη καλού ψεκασμού για ένα μεγάλο πεδίο τιμών της ροής, για την οποία ισχύει ότι η μέγιστη ροή της είναι ίση με 40πλάσια της ελάχιστης. Αν η οπή κατασκευάστηκε μικρή έτσι ώστε να επιτευχθεί καλός ψεκασμός σε μικρή ροή καυσίμου τότε η απαιτούμενη πίεση για μεγάλες ροές είναι υπερβολική. Από την άλλη πλευρά αν η οπή γίνει μεγαλύτερη, το καύσιμο δε θα ψεκάζεται ικανοποιητικά σε μικρές ροές καυσίμου, που απαιτούνται σε πτήσεις σε μεγάλα ύψη (όπου η καύση είναι λιγότερο αποδοτική εξαιτίας της χαμηλής ατμοσφαιρικής πίεσης).

Μια λύση του προβλήματος μας δίνει η χρήση "δίδυμης οπής" ψεκασμού, η οποία περιλαμβάνει δύο οπές τοποθετημένες ομόκεντρα. Η εσωτερική οπή, "πιλότος" είναι μικρή ενώ η εξωτερική δακτυλιοειδής οπή είναι μεγαλύτερη. Σε μικρές παροχές μόνο η βοηθητική ροή είναι σε λειτουργία και ο ψεκασμός είναι καλός. Όσο η απαίτηση για καύσιμο αυξάνει, αυξάνει και η πίεση του καυσίμου και μια βαλβίδα σε προκαθορισμένη πίεση επιτρέπει τη διέλευση καυσίμου και από τη μεγάλη οπή. Αυτή η διαμόρφωση επιτρέπει τον καλό ψεκασμό για μεγάλη ή μικρή ποσότητα καυσίμου χωρίς την απαίτηση μεγάλης πίεσης. Η γωνία του κώνου της κύριας ροής είναι ελάχιστα μικρότερη από αυτή της ροής "πιλότου" έτσι ώστε να ενώνονται λίγο μετά την ανάφλεξη. Η χειρότερη περίπτωση ψεκασμού σ' αυτό το σύστημα παρατηρείται αμέσως μετά το άνοιγμα της βαλβίδας οπότε το μεγαλύτερο μέρος της κινητικής ενέργειας της βοηθητικής ροής καταναλώνεται στον ψεκασμό του κυρίου ρεύματος. Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η μηχανική αξιοπιστία και η ικανότητα διατήρησης της καύσης με πολύ φτωχά μείγματα. Στα μειονεκτήματα περιλαμβάνεται το κλείσιμο των μικρών περασμάτων και οπών από επικαθίσεις ουσιών του καυσίμου καθώς και η τάση για σχηματισμό αιθάλης σε μεγάλες πιέσεις.

### **1.7.β. ΨΕΚΑΣΜΟΣ ΔΙΑΦΥΓΗΣ-ΕΠΙΣΤΡΟΦΗΣ**

Μια ενδιαφέρουσα μορφή του ψεκασμού υπό πίεση με στρόβιλο είναι και ο ψεκασμός διαφυγής - επιστροφής στον οποίο το πίσω τοίχωμα του χώρου της δίνης έχει αντικατασταθεί από μια οπή διαφυγής. Με αυτή την κατασκευή όλο το καύσιμο που θα έπεφτε στη δίνη θα έφευγε μέσα στην οπή διαφυγής. Όμως μια μεταβλητή αντίσταση έχει εισαχθεί στο σωλήνα διαφυγής έτσι ώστε το καύσιμο που ψεκάζεται από την οπή να φεύγει με τον αναγκαίο ρυθμό για τη διατήρηση της καύσης ενώ το περισσευούμενο καύσιμο από την οπή διαφυγής ξαναγυρνά στις δεξαμενές καυσίμου. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι η πίεση ψεκασμού του καυσίμου είναι πάντα μεγάλη, ακόμα και για μικρή ροή καυσίμου, και γι' αυτό η ποσότητα ψεκασμού είναι πάντα άριστη.

Επίσης ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα είναι και η απουσία κινητών μερών, καθώς και το γεγονός ότι οι σωληνώσεις είναι σχεδιασμένες ώστε να ικανοποιούν μεγάλες ποσότητες καυσίμου πράγμα που δεν ευνοεί τις επικαθίσεις. Τα κυριότερα μειονεκτήματα της μεθόδου εντοπίζονται στην απαίτηση για ισχυρή αντλία καυσίμου και στην απαραίτητη μεταβολή της γωνίας του κώνου ψεκασμού ανάλογα με τις απαιτήσεις για καύσιμο.

### **1.7.γ. ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΨΕΚΑΣΜΟΣ**

Σ' αυτήν την περίπτωση το καύσιμο χορηγείται υπό χαμηλή πίεση μέσα από τον κύριο άξονα και εξέρχεται κανονικά μέσα από τις τρύπες του άξονα. Συνήθως οι τρύπες αυτές βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, στην ίδια ευθεία αλλά υπάρχουν και διαμορφώσεις με διπλές σειρές οπών έτσι ώστε αφενός να επιτευχθεί ομοιόμορφη κατανομή και αφετέρου ν' αποφευχθεί αδυναμία του άξονα. Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η απλότητα και το μικρό κόστος. Μόνο μια χαμηλής πίεσης αντλία καυσίμου απαιτείται και αρκετά καλός ψεκασμός εξασφαλίζεται σε ταχύτητες τόσο μικρές όσο το 10% της μέγιστης. Η επιρροή του ιξώδους καυσίμου είναι αμελητέα έτσι το σύστημα από μόνο του έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει και άλλα καύσιμα. Τα βασικά προβλήματα εντοπίζονται στη θέση του σπινθηριστή, στη δύσκολη επανεκκίνηση σε μεγάλα ύψη και εξαιτίας των μεγάλων σωληνώσεων έχουμε αργές αποκρίσεις του συστήματος. Η ψύξη των τοιχωμάτων επίσης αποτελεί μεγάλο ζήτημα αν το σύστημα αυτό εφαρμόζεται σε κινητήρες με μεγάλο λόγο συμπίεσης.

### **1.7.δ. ΨΕΚΑΣΤΕΣ ΤΥΠΟΥ "AIR BLAST"**

Αυτό το είδος ψεκασμού χρησιμοποιεί μια απλή διάταξη στην οποία το καύσιμο που βρίσκεται σε χαμηλή πίεση ρέει πάνω από ένα χείλος το οποίο με τη σειρά του είναι τοποθετημένο σ' ένα ρεύμα αέρα μεγάλης ταχύτητας. Όπως το καύσιμο ρέει πάνω από τον αέρα γίνεται σταγονίδια και έτσι το μείγμα οδηγείται στο θάλαμο καύσης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται το ελάχιστο μέγεθος σταγονιδίων χρησιμοποιώντας διατάξεις που παρέχουν τη μέγιστη φυσική επαφή ανάμεσα σε αέρα και υγρό. Συγκεκριμένα είναι απαραίτητο να εξασφαλίσουμε ότι το λεπτό στρώμα υγρού που σχηματίζεται στο χείλος ψεκασμού βρίσκεται επάνω στο ταχύ ρεύμα αέρα και από τις δυο πλευρές. Αυτό εξασφαλίζει επίσης ότι οι υγρές σταγόνες θα αιωρούνται στον αέρα και δε θα επικαθίσουν στις επιφάνειες.

Το είδος αυτό του ψεκασμού παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα όπως ότι η κατανομή καυσίμου καθορίζεται κυρίως από τη ροή του αέρα και συνεπώς η θερμοκρασία εξόδου είναι τελείως ανεξάρτητη στις αλλαγές στη ροή του καυσίμου. Επίσης η καύση χαρακτηρίζεται από την έλλειψη σχηματισμού αιθάλης εξαιτίας των σχετικά κρύων τοιχωμάτων του θαλάμου καύσης, και την ελάχιστη εκπομπή καπνού. Σαν ένα ακόμα πλεονέκτημα αναφέρουμε ότι τα διάφορα εξαρτήματα προστατεύονται με αέρα, ο οποίος τα διαρρέει (σε θερμοκρασία εξόδου

από το συμπιεστή) από την υπερθέρμανση.

Τα μεγαλύτερα πρακτικά μειονεκτήματα είναι τα σχετικά στενά όρια ευστάθειας του συστήματος, κακή ποιότητα ψεκασμού στην εκκίνηση εξαιτίας της χαμηλής ταχύτητας αέρα στο θάλαμο καύσης. Και τα δύο αυτά προβλήματα μπορούν ν' αντιμετωπισθούν συνδυάζοντας τον air blast ψεκασμό με βοηθητικό ψεκασμό υπό πίεση με στρόβιλο. Σε μικρές ροές καυσίμου όλο το καύσιμο θα παρέχεται από το βοηθητικό ακροφύσιο δίνοντας έτσι πολύ καλή ποιότητα ψεκασμού στην εκκίνηση και στις χαμηλές στροφές. Κάτω από κανονικές συνθήκες θα λειτουργεί και ο air blast ψεκασμός και ο βοηθητικός, με τον air blast ψεκασμό να παρέχει το μεγαλύτερο μέρος καυσίμου. Μ' αυτό το τρόπο συνδυάζονται τα πλεονεκτήματα του βοηθητικού ψεκασμού και στρόβιλου με τα προσόντα του air blast ψεκασμού σε μεγάλες ταχύτητες.

### **1.7.ε. ΒΟΗΘΟΥΜΕΝΟΣ ΑΠΟ ΑΕΡΑ ΨΕΚΑΣΜΟΣ**

Αυτός ο τύπος ψεκασμού είναι ουσιαστικά ένα ακροφύσιο πίεσης και δίνης, στο οποίο αέρας μεγάλης ταχύτητας χρησιμοποιείται για την βελτίωση της ποιότητας ψεκασμού σε χαμηλές ροές καυσίμου. Όταν λειτουργεί σαν βοηθούμενος από αέρα ψεκασμό είναι βασικά ακριβώς ίδιος όπως ο air blast ψεκασμός. Η βασική τους διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι κάνει χρήση του αέρα περιοδικά (συνήθως κατά την εκκίνηση) αντίθετα με τον air blast ψεκασμό που χρησιμοποιεί συνέχεια τον αέρα.

### **1.7.στ. ΕΞΑΕΡΩΤΗΣ**

Εκτός από τις μεθόδους ψεκασμού που ήδη συζητήσαμε ένας διαφορετικός τρόπος προετοιμασίας του υγρού καυσίμου για καύση είναι η θέρμανση του πάνω από το σημείο βρασμού του πιο "βαρίου" υδρογονάνθρακα που έχει ως συστατικό έτσι ώστε όλο το καύσιμο να μετατραπεί σε ατμό πριν από την καύση. Αυτή η μέθοδος φυσικά έχει εφαρμογή σε τέτοια καύσιμα τα οποία ολοκληρωτικά εξαερώνονται χωρίς να αφήνουν στέρεα κατάλοιπα. Όταν κάνουμε χρήση εξαερωτών σε καύσιμα που είναι κατά πολύ βαρύτερα της κηροζίνης είναι αναγκαίος ο καθαρισμός των μερών των εξαερωτών σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Ιστορικά οι εξαερωτές αναπτύχθηκαν πολύ πριν τους ψεκαστές. Έτσι το καύσιμο θερμαινόταν σε δεξαμενές τοποθετημένες στη περιοχή της φλόγας και ανέπτυσσε τέτοια πίεση ώστε να επιτυγχάνεται η εξάτμιση και στη συνέχεια επερχόταν η έγχυση του στο θάλαμο καύσης. Αυτή η μέθοδος στις μέρες μας εμφανίζεται πολύ σπάνια λόγω των θερμικών καταπονήσεων και των στερεών αποθέσεων που έχουμε αναφέρει. Ακόμα δυσκολίες εμφανίζονται στον έλεγχο της ροής του καυσίμου.

Μια άλλη εναλλακτική και απλούστερη μέθοδος είναι η εισαγωγή καυσίμου και αέρα σε δεξαμενές, οι οποίες είναι εμβαπτισμένες στη περιοχή της φλόγας. Το μείγμα αυτό ζεσταίνεται από τα τοιχώματα των δεξαμενών και κάτω από ιδανικές συνθήκες προκύπτει μείγμα εξαερωμένου

καυσίμου και αέρα. Ο εναπομένοντας άκαυτος αέρας εισέρχεται στο θόλο του θαλάμου καύσης μέσω οπών και αντιδρά με το εξερχόμενο από τις δεξαμενές μείγμα. Κατά τη διάρκεια της εκκίνησης όπου οι δεξαμενές είναι αρκετά κρύες και δεν επιτυγχάνεται εξαέρωση χρησιμοποιείται σπινθηριστής για την έναρξη της καύσης. Τα συστήματα εξαερώσεως έχουν πολύ μικρό κόστος, μικρές απαιτήσεις από την αντλία καυσίμου και δε βοηθούν στο σχηματισμό αιθάλης. Όμως εμφανίζονται θερμικές καταπονήσεις στις δεξαμενές θερμάνσεως του μείγματος και είναι φανερή η ευαισθησία του συστήματος στις αλλαγές καυσίμου.

Ο όρος εξαερωτής πλέον θεωρείται ατυχής αφού λιγότερη από την απαιτούμενη θερμότητα μπορεί να μεταδοθεί στις δεξαμενές για να εξαερώσει περισσότερο από ένα μικρό μέρος του καυσίμου. Ωστόσο μόνο σε μικρές ποσότητες καυσίμου το σύστημα θεωρείται ότι λειτουργεί ως πραγματικός εξαερωτής. Στους σύγχρονους κινητήρες η κύρια λειτουργία των εξαερωτών είναι η παροχή ικανοποιητικής κατανομής στη πρωτογενή ζώνη καυσίμου.

#### **1.7.ζ. ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΑΥΣΗΣ ΠΡΟ-ΕΞΑΕΡΩΣΗΣ & ΠΡΟ-ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ**

Αυτή η διαμόρφωση είναι ιδανική για κινητήρες που απαιτούν ελάχιστη εκπομπή ρύπων. Το καύσιμο εγχύεται με ψεκασμό σε αέρα υψηλής ταχύτητας και μετά εισέρχεται στο θάλαμο καύσης. Ο αντικειμενικός σκοπός είναι η τέλεια εξαέρωση του καυσίμου και η τέλεια ανάμειξη του μείγματος πριν την καύση. Αποφεύγοντας την καύση σταγονιδίων και λειτουργώντας τη ζώνη αντιδράσεως με φτωχή αναλογία καυσίμου/ αέρα της χαμηλής θερμοκρασίας και της έλλειψης στο θάλαμο καύσης "θερμών σημείων". Τα προβλήματα στο σύστημα αυτό έχουν να κάνουν με την ατελή εξαέρωση και μείξη του καυσίμου με τον αέρα, τον κίνδυνο ανάφλεξης, τη δυσκολία εκκίνησης και τον κίνδυνο αναστροφής της φλόγας μέσω των σωλήνων του προαναμεμιγμένου μείγματος. Μερικά απ' αυτά τα προβλήματα μπορούν να ξεπεραστούν με την εφαρμογή σταδιακής καύσης και μεταβλητών γεωμετρικών.

#### **1.7.η. ΕΓΧΥΤΗΡΑΣ ΑΕΡΙΩΝ**

Τα αέρια καύσιμα, ειδικά αυτά που εμφανίζουν μεγάλη θερμαντική αξία παρουσιάζουν ελάχιστα μειονεκτήματα στην καύση. Με αέρια με μικρή θερμαντική αξία το εγχέόμενο καύσιμο πρέπει να καταλαμβάνει το 1/5 της ροής του θαλάμου καύσης; Το γεγονός μπορεί να οδηγήσει σε κακή συνεργασία του στροβίλου και του συμπιεστή, ιδίως αν ο κινητήρας χρησιμοποιεί διάφορα είδη καυσίμων. Ένα ακόμα μειονέκτημα αυτών των αέριων καυσίμων είναι ο μικρός ρυθμός αντίδρασης που μπορεί να οδηγήσει στην απαίτηση για μεγαλύτερο όγκο καύσης. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί οπές, δίνες και σωλήνες Ventyri ενώ είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί ο βέλτιστος λόγος ανάμειξης στο θάλαμο καύσης.

## **1.8. ΨΥΞΗ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ**

Οι λειτουργίες του θαλάμου καύσης είναι να κάνει την καύση και να διευκολύνει την κατανομή του αέρα σ' όλες τις ζώνες καύσης στις κατάλληλες ποσότητες. Οι σύγχρονοι θάλαμοι καύσης είναι κατασκευασμένοι από θερμικά κατεργασμένα και συγκολλημένα φύλλα μετάλλου. Οι θάλαμοι καύσης πρέπει ν' αντέχουν τα καμπικά φορτία που δημιουργούνται εξαιτίας της διαφορετικής πίεσης κατά μήκος των τοιχωμάτων τους. Επίσης πρέπει να εξασφαλίζουν μεγάλη αντοχή στις θερμικές καταπονήσεις εξαιτίας της συνεχούς ή περιοδικής λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση υλικών με αντοχή στην οξειδωση και στη θερμική καταπόνηση αλλά και με τη ψύξη των τοιχωμάτων. Στις μέρες μας το 50% της ολικής μάζας αέρα του θαλάμου καύσης χρησιμοποιείται για ψύξη. Πρακτικά η θερμοκρασία των τοιχωμάτων καθορίζεται από την ισορροπία μεταξύ πρώτον της θερμότητας που δέχονται με ακτινοβολία και με συναγωγή από τα καυσαέρια και δεύτερον τη θερμότητα που μεταφέρει απ' αυτά με συναγωγή από τον αέρα του δακτυλίου και με ακτινοβολία από τον αέρα που βρίσκεται περιφερειακά.

Το πρόβλημα της ψύξης ζητούσε επιτακτικά λύση όσο ο λόγος συμπίεσης αύξανε. Όμως δεν οφείλεται στην αύξηση της πίεσης. Στην πραγματικότητα η αύξηση της πίεσης είναι ευεργετική στη μείωση της ειδικής επιφάνειας του θαλάμου καύσης. Τα προβλήματα εμφανίζονται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου, η οποία συνοδεύει το υψηλό λόγο συμπίεσης. Η υψηλότερη αυτή θερμοκρασία έχει ένα διπλό μειονέκτημα: (1) Αυξάνει τη θερμοκρασία της καύσης, η οποία με τη σειρά της αυξάνει τα ποσά θερμότητας που μεταδίδονται στα τοιχώματα και (2) μειώνει την επίδραση του αέρα ως ψυκτικού μέσου. Μεγαλύτερος λόγος συμπίεσης ακόμα σημαίνει ότι η οικονομία καυσίμου αυξάνει με τη λειτουργία σε μεγαλύτερη θερμοκρασία εισαγωγής στο στρόβιλο. Το γεγονός αυτό έχει τις συνέπειες του κυρίως στο πίσω μέρος του θαλάμου καύσης. Αύξηση στο ποσό του αέρα που χρησιμοποιείται για ψύξη (πάνω από το 50% που ήδη χρησιμοποιείται) δεν είναι τεχνικά εφικτή αφού ο επιπλέον αέρας θα χειροτέρευε την ακτινική κατανομή θερμοκρασίας, στην έξοδο του θαλάμου καύσης και κατά συνέπεια θα μειώνεται το όριο ζωής του στροβίλου. Έτσι η μόνη λύση είναι η βέλτιστη χρήση του διατεθειμένου αέρα.

### **1.8.α. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΨΥΞΗΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΥΣΗΣ**

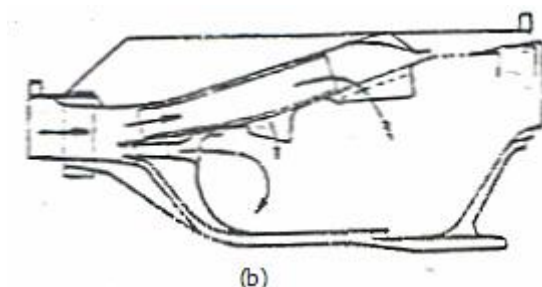
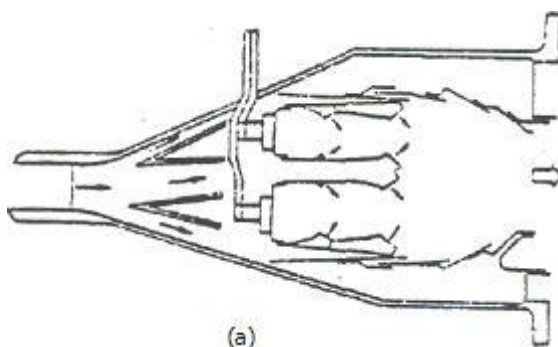
Στους πρώτους θαλάμους καύσης χρησιμοποιήθηκε μια τεχνική από κινούμενες γρίλιες, κατά το οποίο ο θάλαμος καύσης ήταν κατασκευασμένος στη μορφή κυλινδρικών κελυφών παρέχοντας μια σειρά από δακτυλιοειδή περάσματα στα σημεία ενώσεως των κελυφών. Αυτά τα περάσματα επιτρέπουν τη δημιουργία ενός στρώματος κρύου αέρα που αποτελεί ένα θερμικό φράγμα, στη θερμή πλευρά του θαλάμου καύσης. Η διανομή του αέρα αποτελεί το μέγιστο πρόβλημα σ' αυτή τη τεχνική. Η λύση δίνεται από μια σειρά οπών μικρής διαμέτρου που βρίσκεται

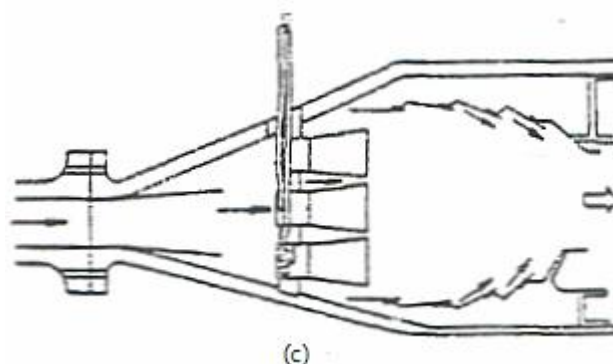
στην είσοδο του θαλάμου καύσης. Ο πίδακας αέρα προσκρούει σ' ένα ψυχρό τοίχωμα, το οποίο με τη σειρά του οδηγεί τη ροή έτσι ώστε να δημιουργήσει ένα φιλμ στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης. Η κατασκευαστική αυτή προσέγγιση των μόνιμων οπών αντί γριλλιών χρησιμοποιείται ευρύτατα σήμερα αφού συνδυάζει ακρίβεια στη διανομή του αέρα και καλή αντοχή.

Οι σύγχρονες τεχνικές ψύξεως περιλαμβάνουν την ψύξη με φιλμ, με συναγωγή η οποία χρησιμοποιεί απλή αλλά ελεγχόμενη μετάδοση θερμότητας βοηθούμενη από την τραχύτητα των τοιχωμάτων ενώ παρέχει ένα προστατευτικό οριακό στρώμα ψυχρού αέρα κατά μήκος της θερμής πλευράς των τοιχωμάτων. Η ψύξη πρόσκρουσης εφαρμόζεται με επιτυχία στους θαλάμους καύσης με μεγάλες θερμοκρασίες αλλά σε σχέση με τη ψύξη με συναγωγή παρουσιάζει δυσκολίες στην κατασκευή και τη συντήρηση.

Η πιο προηγμένη μέθοδος ψύξης είναι το σύστημα "αναπνοής" το οποίο εμφανίζει το πλεονέκτημα ότι μειώνει τον απαιτούμενο αέρα για ψύξη ως και 50%. Με αυτή τη διάταξη ο ψυχρός αέρας ρέει μέσα από τους πόρους των τοιχωμάτων του θαλάμου καύσης αφαιρώντας έτσι θερμότητα από τον ίδιο τον τοίχο πρώτα, και μετά παρέχοντας ένα θερμικό φράγμα ανάμεσα στον τοίχο και στα καυσαέρια.

Μια εναλλακτική λύση που αυξάνει την αποδοτικότητα των ψυκτικών τεχνικών είναι η χρήση προστατευτικών επικαλύψεων ή υλικών που απέχουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Οι επικαλύψεις χρησιμοποιούνται ως προεκτάσεις σε προβληματικές περιοχές στους ήδη υπάρχοντες θαλάμους καύσης. Υλικά που είναι ικανά ν' αντέξουν τις θερμικές καταπονήσεις θεωρούνται τα κεραμικά και τα κράματα υλικών υψηλής θερμοκρασίας όπως το Κολόμβιο. Οι τεχνικές κατεργασίας των υλικών είναι υπό έρευνα έτσι ακόμα κανένας θάλαμος καύσης από τέτοια υλικά δε βρίσκεται σε επιχειρησιακή λειτουργία.





ΣΧ 1.1. ΠΙΘΑΝΗ ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΚΟΝΤΟ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΗ ΘΑΛΑΜΟ ΚΑΥΣΗΣ

(a) ΜΕ ΔΙΠΛΟ ΘΑΛΑΜΟ ΚΑΥΣΗΣ, (b) ΕΙΣΟΔΟ ΜΟΝΗΣ ΠΛΕΥΡΑΣ & (c) ΜΕ ΔΟΧΕΙΟ ΣΤΡΩΒΙΛΙΣΜΟΥ

### **1.9. ΜΕΓΕΘΟΣ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΥΣΗΣ**

Η πρόοδος στην κατανόηση των ποιοτικών σχέσεων μεταξύ του μεγέθους του θαλάμου καύσης, της ολικής απώλειας πίεσης, της απόδοσης της καύσης, της θερμοκρασίας και πίεσης λειτουργίας καθώς και της ταχύτητας επιτρέπουν στο σχεδιαστή να σχεδιάσει θαλάμους καύσης που είναι φτιαγμένοι για ειδικές απαιτήσεις απόδοσης και κάνουν βέλτιστη χρήση του χώρου καύσης. Ορισμένες διαμορφώσεις φαίνονται στο σχ. 1.1. Στο πρώτο δείχνεται μια διάταξη που περιλαμβάνει δύο ομόκεντρους θαλάμους καύσης με κανονικό λόγο  $L/D$ . Το προφανές πλεονέκτημα είναι το κέρδος σε μήκος που ξεπερνά το 30%, αλλά το σύστημα παρουσιάζει και μειονεκτήματα όπως ότι υπάρχει η ανάγκη για τετραπλασιασμό των εγχυτήρων καυσίμου. Το δεύτερο σχήμα δείχνει θάλαμο καύσης "μονής πλευράς" ο οποίος προσφέρει μείωση στο μήκος (από τη πλευρά του διάχυτη) και δεν εμφανίζει μεγάλη ευαισθησία στην κατανομή της ροής στο χώρο εξαιτίας μεταβολών στην ταχύτητα εισαγωγής. Το τρίτο σχήμα δείχνει μια ενδιαφέρουσα πρόταση της NASA η οποία περιλαμβάνει 120 μονά δινοδοχεία τοποθετημένα σε 3 ομόκεντρες δακτυλιοειδείς σειρές. Η πρωτογενής ζώνη και η ζώνη αραιώσης δεν ορίζονται όπως στους συμβατικούς θαλάμους καύσης αλλά σχεδόν ολόκληρη η ροή (εκτός από αυτή που ψύχει το θάλαμο καύσης) περνά μέσα ή γύρω από τα δοχεία αυτά. Αναπόφευκτα λοιπόν ο θάλαμος καύσης μικραίνει, γιατί έχουμε μείξη και καύση σε κάθε δοχείο.

### **1.10. ΚΑΥΣΙΜΑ**

Όσο το κόστος των καυσίμων αυξάνει και η προμήθεια τους δυσκολεύει τόσο το ενδιαφέρον για την παραγωγή καυσίμων υδρογονανθράκων από άλλες πηγές εκτός από πετρέλαιο μεγαλώνει. Το υγρό υδρογόνο και το μεθάνιο μελετήθηκαν ως εναλλακτικές λύσεις αλλά η χρήση τους είναι συμφέρουσα μόνο σε μεγάλα αεροσκάφη. Προς το παρόν οι πλέον υποσχόμενες πηγές υγρών υδρογονανθράκων καυσίμων φαίνεται πως είναι ο γαιάνθρακας, οι σχιστόλιθοι και η πίσσα. Τα καύσιμα προερχόμενα απ' αυτά τα υλικά αναμένοντας ότι θα έχουν μειωμένη περιεκτικότητα σε υδρογόνο.

Ωστόσο τα διαθέσιμα αποθέματα καυσίμου για τα εμπορικά αεροσκάφη μπορούν να αυξηθούν αλλάζοντας τις προδιαγραφές καυσίμων έτσι ώστε να συμπεριλαμβάνονται και άλλα κλάσματα του πετρελαίου. Το αποτέλεσμα της κίνησης αυτής θα είναι η μείωση της περιεκτικότητας του υδρογόνου και η αύξηση των αρωματικών ενώσεων, γεγονός που αυξάνει την τάση σχηματισμού αιθάλης. Έτσι τα προβλήματα που εμφανίζονται έχουν να κάνουν με τη μεγάλη ακτινοβολία στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης, την αιθάλη, τη διάβρωση των πτερυγίων του στροβίλου και τον καπνό εξαγωγής.

### **1.11. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΓΙΑ ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ.**

Ανεξάρτητα από το πλήθος των απαιτήσεων που πρέπει να ικανοποιήσει ο σχεδιαστής στην σχεδίαση ενός θαλάμου καύσης υπάρχουν και οι κανονισμοί για τις εκπομπές των ρύπων που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Το βασικό πρόβλημα πάντα ήταν και εξακολουθεί να είναι, η επίτευξη εύκολης ανάφλεξης, τα ευρέα όρια καύσης, υψηλή απόδοση και ο ελάχιστος σχηματισμός αιθάλης σε μια μόνη και σταθερή ζώνη καύσης στην οποία θα παρέχεται καύσιμο από ένα και μοναδικό σημείο. Επειδή ορισμένες από αυτές τις απαιτήσεις έρχονται σε αντίθεση έτσι αναπόφευκτα το τελικό αποτέλεσμα να είναι ο συνδυασμός όλων των παραπάνω. Αν τώρα προσθέσουμε σε αυτήν την κατάσταση τα προβλήματα που τίθενται από τις εκπομπές στο ακροφύσιο, για τις οποίες γενικά τα χαρακτηριστικά της πρωτογενούς ζώνης που μειώνουν την εμφάνιση του καπνού και των οξειδίων του αζώτου είναι αντίθετα με αυτά που μειώνουν την εμφάνιση του μονοξειδίου του άνθρακα και των άκαυτων υδρογονανθράκων, θα διαπιστώσουμε ότι είναι επιτακτικές ορισμένες αλλαγές σε βασικά θέματα σχεδίασης.

Μία πιθανή λύση του προβλήματος είναι η χρήση μεταβλητής γεωμετρίας έτσι ώστε να ελέγχεται το ποσό του αέρα που εισάγεται στην πρωτογενή ζώνη. Σε υψηλές πιέσεις, μεγάλες ποσότητες αέρα χρησιμοποιούνται για την ελαχιστοποίηση του σχηματισμού της αιθάλης και των οξειδίων του αζώτου. Σε χαμηλές πιέσεις η βασική ροή είναι μερικώς "σβησμένη" γι' αυτό αυξάνουμε το λόγο καυσίμου/ αέρα και μειώνουμε την ταχύτητα προκειμένου να αυξήσουμε την απόδοση της καύσης στο idle (ρελαντί) και ταυτόχρονα να πετύχουμε μικρές εκπομπές μονοξειδίου καθώς και άκαυτων υδρογονανθράκων, αλλά και ικανοποιητικές ικανότητες επανεκκίνησης.

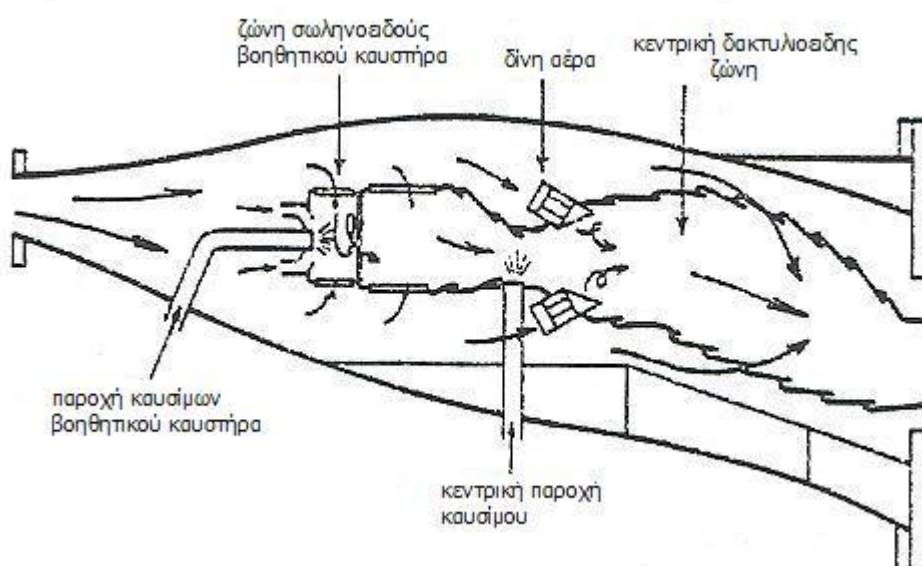
Άλλη λύση στην προσπάθεια να επιτευχθούν όλοι οι στόχοι σε μία ζώνη είναι η χρήση δύο ζωνών, όπου η καθεμιά είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να ικανοποιεί ορισμένους από τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της καύσης. Ένας τέτοιος θάλαμος καύσης θα έχει μια ελαφρώς "φορτωμένη" πρωτογενή ζώνη λειτουργώντας μ' ένα λόγο ισοδυναμίας περίπου ίσο με 0.8 για να επιτευχθεί ο ελάχιστος σχηματισμός μονοξειδίου και άκαυτων υδρογονανθράκων. Η πρωτογενής ζώνη θα παρέχει όλη την αύξηση της θερμοκρασίας που απαιτείται σε περιπτώσεις μικρού αριθμού



στροφών και θα συμπεριφέρεται ως η βοηθητική ροή θερμότητας για το κρύο ρεύμα καύσης, το οποίο θα εφοδιάζεται μ' ένα πλήρως προαναμιγμένο μείγμα. Για λειτουργία στο μέγιστο αριθμό στροφών και στις δύο ζώνες θα παρέχεται καύσιμο και ο λόγος ισοδυναμίας θα είναι περίπου 0.6 για να ελαχιστοποιηθούν οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου και του καπνού.

Στο σχ. 1.2 φαίνεται τέτοιος κινητήρας της Pratt & Whithney. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει ένα δακτυλιοειδή θάλαμο καύσης, στον οποίο 30 ψεκαστές πίεσης εγχύουν καύσιμο σε συμβατικούς με δίνες θαλάμων καύσης. Το καύσιμο για την κύρια ζώνη καύσης παρέχεται μαζί με τον αέρα που είναι απαραίτητος για καύση με χαμηλό λόγο ισοδυναμίας μέσα από 60 δινοεισόδους που βρίσκονται σε κάθε πλευρά του θαλάμου καύσης. Η τυρβώδης ροή εξασφαλίζει τη μείξη με τα καυσαέρια και την ολοκλήρωση της καύσης.

Τέλος μια άλλη ιδέα η οποία φαίνεται να είναι και η πιο αποτελεσματική για μικρές εκπομπές οξειδίων του αζώτου είναι η καύση με καταλύτη. Σ' αυτό το σύστημα το καύσιμο πρώτα εξαερώνεται και προαναμειγνύεται με αέρα με μικρό λόγο ισοδυναμίας και το ομογενές πλέον μείγμα από μια κλίνη καταλύτη. Η παρουσία καταλύτη επιτρέπει την καύση σε πολύ φτωχά μείγματα που διαφορετικά θα βρίσκονταν έξω από τα όρια αναφλεξιμότητας. Σαν αποτέλεσμα, η θερμοκρασία καύσης είναι πολύ μικρή έτσι δεν εμφανίζονται εύκολα τα οξείδια του αζώτου. Τα μειονεκτήματα που αντιμετωπίζει το σύστημα είναι το υψηλό κόστος η διάβρωση του καταλύτη και η μεγάλη πτώση πίεσης.



1.2. ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΑΥΣΗΣ VORBIX ( ΜΕ ΧΟΡΗΓΙΑ ΤΩΝ PRATT & WHITNEY AIRCRAFT GROUP)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΑΡΧΕΣ ΚΑΥΣΗΣ

## **2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Το αντικείμενο της καύσης περικλείει μια μεγάλη ποικιλία φαινομένων και διαδικασιών. Ακόμα και μια απλή αναφορά της τεχνολογίας και της επιστήμης που ασχολείται με το θέμα θα έπαιρνε τεράστιες διαστάσεις για αυτό και θα επικεντρώσουμε την προσοχή μας σε πολύ βασικά θέματα.

Η καύση περιγράφεται πολύ απλά ως μια εξώθερμη αντίδραση ενός καυσίμου με ένα οξειδωτικό. Στις εφαρμογές των αεροκινητήρων το καύσιμο μπορεί να είναι είτε υγρό είτε αέριο αλλά το οξειδωτικό είναι πάντα ο αέρας. Η καύση μπορεί να πάρει πολλές μορφές και δεν ακολουθείται απαραίτητα από φλόγα και φωτεινότητα. Μπορούν να διακριθούν οι παρακάτω μορφές καύσης :

### **2.1.α. ΚΑΥΣΗ ΧΩΡΙΣ ΦΛΟΓΑ**

Πρόκειται για αργή διαδικασία η οποία υπό κανονικές συνθήκες απαιτεί από 1 έως 100 sec για να επιτευχθεί το 80% της καύσης. Η αντίδραση συμβαίνει μέσα σε ένα ευρύ όγκο όπου οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από 600 έως 800 K. Τα προϊόντα της καύσης περιέχουν σε μεγάλες συγκεντρώσεις οξυγονωμένες οργανικές ενώσεις. Παραταύτα μόνο ένα μικρό μέρος της θερμότητας αποδίδεται στον περιβάλλοντα χώρο.

### **2.1.β. ΑΝΑΦΛΕΞΗ**

Είναι μια γρήγορη διαδικασία η οποία απαιτεί λιγότερο από 1 ms για να ολοκληρωθεί το 80 % της καύσης. Χαρακτηρίζεται από την παρουσία φλόγας ή οποία διαδίδεται μέσα στο άκαυτο μείγμα. Ως φλόγα μπορεί να ορισθεί η πολύ γρήγορη χημική μεταβολή, η οποία λαμβάνει χώρα σε ένα πολύ λεπτό στρώμα και συνοδεύεται από ταχείες μεταβολές της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης των ενώσεων αλλά και από φωτεινότητα. Με μακροσκοπική θεώρηση το μέτωπο της φλόγας μπορεί να προσδιορισθεί ως το όριο μεταξύ των καμένων αερίων και του άκαυτου μείγματος. Συγκρινόμενα με το άκαυτο μείγμα, τα καυσάερια καταλαμβάνουν πολύ περισσότερο όγκο και βρίσκονται σε πολύ υψηλότερη θερμοκρασία με αρκετά μικρή πυκνότητα. Τα κύματα συνήθως διαδίδονται με ταχύτητες κάτω από 1 m/sec. Όλες οι διαδικασίες καύσης, που λαμβάνουν χώρα στους θαλάμους καύσης των αεροκινητήρων, εμπίπτουν σε αυτή την κατηγορία καύσης των αεροκινητήρων, εμπίπτουν σε αυτή την κατηγορία.

### **2.1.γ. ΑΥΤΑΝΑΦΛΕΞΗ**

Το χαρακτηριστικό της αυτανάφλεξης είναι ένα κρουστικό κύμα το οποίο συνδέεται άμεσα και υποστηρίζεται από μία ζώνη χημικών αντιδράσεων. Τα κύματα αυτά διαδίδονται με υπερηχητικές ταχύτητες, που κυμαίνονται από 1 έως 4 Km/sec. Οι ταχύτητες διάδοσης μπορούν να υπολογισθούν από τις γενικές εξισώσεις της θερμοδυναμικής των αερίων, χωρίς να λαμβάνεται

υπόψη η κινητική των αντιδράσεων. Τα κρουστικά κύματα αυτανάφλεξης δεν μπορούν να εμφανιστούν στα συμβατικά μείγματα αέρα-καυσίμου που χρησιμοποιούνται στους αεροκινητήρες αλλά οι πιθανότητες εμφάνισης αυξάνουν στα συστήματα που κάνουν έγχυση οξυγόνου προκειμένου να διευκολύνουν την ανάφλεξη και την επιτάχυνση του κινητήρα.

## **2.2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΦΛΟΓΑΣ**

Οι περισσότερες μελέτες για την καύση έχουν γίνει με τη χρήση αερίων ή προεξαερωμένων καυσίμων. Επιπλέον, παρά το γεγονός ότι η φλόγα (δηλαδή το κύμα καύσης) μπορεί να μεταδοθεί μέσα σε ένα στατικό αέριο μείγμα, είναι πιο σύνηθες να σταθεροποιείται η φλόγα σε ένα σημείο και να παρέχεται σε αυτό συνεχής ροή καυσίμου μείγματος. Κάτω από αυτές τις συνθήκες οι φλόγες μπορούν να διακριθούν σε δύο βασικές κατηγορίες: α) φλόγες διάχυσης και β) φλόγες προανάμειξης, ανάλογα με το αν το καύσιμο και ο αέρας αναμειγνύονται πριν την καύση ή αναμειγνύονται με διάχυση στη ζώνη της φλόγας. Ανάλογα δε με τις ταχύτητες ροής οι δύο παραπάνω κατηγορίες μπορούν να διακριθούν είτε σε ομαλές είτε σε τυρβώδεις.

Σε συστήματα όμως που κάνουν χρήση υγρών καυσίμων υπάρχει μια περαιτέρω επιπλοκή στην περίπτωση που το καύσιμο εισάγεται στη ζώνη της φλόγας χωρίς να είναι πλήρως εξαερωμένο. Τότε η καύση που θα λάβει χώρα θα είναι ετερογενούς φύσης. Η διαδικασία που εμπλέκει καύση διάχυσης των σταγονιδίων που εξαερώνονται από μόνα τους μπορεί να συμβεί σε μια ζώνη προαναμειγμένης τυρβώδους φλόγας. Όμως σε περίπτωση που τα αντιδρώντα έχουν την ίδια φύση η διαδικασία της καύσης θεωρείται ομογενής.

Το κερί είναι το απλούστερο παράδειγμα φλόγας διάχυσης. Ο ατμός του καυσίμου βγαίνει από το κερί και μπορεί να καεί μόνο σε εκείνη την περιοχή που μπορεί να αναμειχθεί με το οξυγόνο του αέρα. Σε αυτόν τον τύπο της φλόγας ο ρυθμός ανάμειξης, μεταξύ του καυσίμου και του οξειδωτικού, συνήθως πλησιάζει τον ολικό ρυθμό καύσης. Μόνο στην περίπτωση των ομαλών προαναμειγμένων αερίων φλογών η διαδικασία της φλόγας καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη χημεία της, την τοπική μετάδοση μάζας και θερμότητας αλλά και από μακροσκοπικές παραμέτρους του συστήματος (πίεση, θερμοκρασία, λόγος καυσίμου/ αέρα) ενώ αντίθετα η αεροδυναμική δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου.

Με τη χρήση των προαναμειγμένων αερίων έχουμε το πλεονέκτημα της παροχής εξαρχής καυσίμου μείγματος. Όταν με κάποιο τρόπο γίνει η παροχή του σπινθήρα, σε κάποιο σημείο του μείγματος, αυτός θα διαδοθεί σε όλο τον όγκο του μείγματος. Η ταχύτητα διάδοσης και οι παράγοντες που την επηρεάζουν παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον για τους σχεδιαστές των θαλάμων καύσης. Η τύρβη είναι μείζονος σημασίας αφού τα περισσότερα μείγματα καυσίμου-αέρα είναι τυρβώδη.

### **2.2.α. ΟΜΑΛΕΣ ΦΛΟΓΕΣ ΠΡΟΑΝΑΜΕΙΞΗΣ**

Η ταχύτητα της φλόγας, δηλαδή ο ρυθμός με τον οποίο ένα επίπεδο κύμα καύσης θα διαδοθεί μέσα σε ένα εύφλεκτο μείγμα, ορίζεται αφενός από το ρυθμό πραγματοποίησης των χημικών αντιδράσεων μέσα στη ζώνη της φλόγας αλλά και από τη μεταφορά μάζας και θερμότητας από τη φλόγα προς τα άκαυτα αέρια. Η θέρμανση από συναγωγή και ακτινοβολία των άκαυτων αερίων από τη ζώνη της φλόγας μπορεί να εκκινήσει την αντίδραση με ένα θερμικό μηχανισμό, όπως αντίστοιχα και οι εμπλεκόμενες ενώσεις μπορούν να εκκινήσουν τη διαδικασία με ένα χημικό μηχανισμό. Συνεπώς η ταχύτητα καύσης επηρεάζεται από την ακτινοβολία της φλόγας και αναπόφευκτα από τη θερμοκρασία της, από τις τοπικές ιδιότητες των αερίων, όπως η πυκνότητα, το ιξώδες αλλά και από τα χαρακτηριστικά της ροής όπως η πίεση, η θερμοκρασία και ο λόγος καυσίμου/ αέρα. Η ταχύτητα καύσης ορίζεται ως η ταχύτητα με την οποία κινείται το μέτωπο μιας επίπεδης φλόγας σε διεύθυνση παράλληλη με την επιφάνεια του, προς τα άκαυτα αέρια. Είναι πολύ βασική ιδιότητα ενός καυσίμου μείγματος, με πρακτική σημασία αφού έχει να κάνει με την ευστάθεια της φλόγας αλλά και με τους ρυθμούς έκλυσης θερμότητας.

Έχει βρεθεί εμπειρικά ότι για κάθε καύσιμο η ταχύτητα καύσης έχει σταθερή τιμή όταν οι μεταβλητές πίεση, θερμοκρασία και λόγος καυσίμου/ αέρα είναι σταθερές. Είναι επίσης ενδιαφέρον να σημειώσουμε ότι η ταχύτητα καύσης στοιχειομετρικών μειγμάτων πολλών καυσίμων με αέρα, πλησιάζει την τιμή 0.43 m/sec, υπό κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Αυτό συμβαίνει γιατί και τα πλέον σύνθετα καύσιμα πυρολύονται σε μεθάνιο ή σε H/C με ένα ή δύο άτομα άνθρακα και υδρογόνο, πριν την εισαγωγή στη ζώνη καύσης.

### **2.2.β. ΤΥΡΒΩΔΕΙΣ ΦΛΟΓΕΣ ΠΡΟΑΝΑΜΕΙΞΗΣ**

Παρά το γεγονός ότι είναι ευρέως γνωστό ότι η τύρβη αυξάνει σημαντικά την ταχύτητα διάδοσης της φλόγας, δεν είναι ακόμα πλήρως κατανοητός ο βαθμός και ο τρόπος της επίδρασης της στην όλη διαδικασία. Αρκετοί μελετητές προσπάθησαν να παρατηρήσουν τις τυρβώδεις φλόγες με τη χρήση διαφόρων μοντέλων. Προτάθηκε βασικά η χρήση της εξίσωσης:

$$S_T = S_L + u \text{ όπου}$$

$S_T$  η ταχύτητα της τυρβώδους φλόγας

$S_L$  η ταχύτητα της ομαλής φλόγας

$u$  η μέση τιμή της μεταβαλλόμενης ταχύτητας

Για τη δημιουργία των συνθηκών τύρβης χρησιμοποιούνται κατάλληλες διατάξεις, γεννήτριες τύρβης, οι οποίες διατηρούν την τύρβη σταθερή, σε όλες τις περιοχές του θαλάμου καύσης. Από φωτογραφίες της ροής, ταυτόχρονα με τις μετρήσεις της ταχύτητας της τυρβώδους φλόγας, βρέθηκε ότι η δομή της φλόγας εξαρτάται από την ένταση της τύρβης. Για την εξήγηση των φαινομένων υιοθετήθηκε ένα μοντέλο τριών περιοχών.

### ΠΡΩΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ

Στην περιοχή αυτή ισχύει ότι  $u' < 2S_L$ . Είναι εν γένει περιοχή χαμηλής τύρβης και μικρής ταχύτητας. Οι δίνες δεν οξύνουν το μέτωπο της φλόγας το οποίο έχει στρωτή μορφή. Όμως η ταχύτητα καύσης αυξάνεται εξαιτίας της τύρβης και το μέτωπο αυξάνει την επιφάνεια του.

### ΔΕΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ

Στη δεύτερη περιοχή ισχύει  $u = 2S_L$ . Η βασική διαφορά με τις άλλες δύο περιοχές έγκειται στο σχετικό μέγεθος των δινών, το οποίο σε σχέση με το πάχος της φλόγας, είναι μεγάλο στην  $\alpha'$  περιοχή και μικρό στη  $\gamma'$ . Μεταξύ των δύο αυτών άκρων υπάρχει μια αρκετά μεγάλη περιοχή στην οποία η κατανομή των δινών είναι τέτοια ώστε το άκαυτο μείγμα να περιέχει δίνες και μικρότερες και μεγαλύτερες από το πάχος της φλόγας

### ΤΡΙΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ

Εδώ ισχύει  $u > 2S_L$ . Μία αύξηση στην ένταση της τύρβης συνοδεύεται με μείωση της κλίμακας της. Για αυτό και για πολύ υψηλά επίπεδα τύρβης, οι δίνες είναι πολύ μικρές για να οξύνουν την επιφάνεια της φλόγας. Παρόλα αυτά επιτυγχάνονται υψηλοί ρυθμοί καύσης, εξαιτίας της πού μεγάλης μετωπικής επιφάνειας που δημιουργείται από την αλληλεπίδραση των δινών με τα προϊόντα της καύσης.

## **2.2.γ. ΟΜΑΛΕΣ ΦΛΟΓΕΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ**

Στις ομαλές φλόγες των προανεμιγμένων συστημάτων, οι ρυθμοί ανάπτυξης των χημικών αντιδράσεων καθώς και η θερμική αγωγιμότητα είναι ελεγχόμενοι. Ακόμα και στα μη προανεμιγμένα συστήματα, αν η ανάμειξη συμβεί αρκετά γρήγορα, συγκρινόμενη με το ρυθμό ανάπτυξης των αντιδράσεων, οι ρυθμοί καύσης μπορούν να θεωρηθούν ως τέτοιοι ομογενούς διαδικασίας. Όμως υπάρχουν συστήματα στα οποία η ανάμειξη είναι αργή, συγκρινόμενη με τους ρυθμούς των αντιδράσεων με αποτέλεσμα ο χρόνος ανάμειξης να ελέγχει το ρυθμό καύσης. Αυτό συμβαίνει με τις φλόγες διάχυσης στις οποίες το καύσιμο και το οξειδωτικό εισάγονται μαζί στη ζώνη αντιδράσεων, μετέχοντας σε μοριακή διάχυση και διάχυση τύρβης. Επειδή το καύσιμο μπορεί να είναι είτε αέριο είτε υγρό είτε στερεό, υπάρχουν δύο κατηγορίες καύσης διάχυσης, ανάλογα με την αρχική φάση του καυσίμου και/ή του οξειδωτικού. Αν και το καύσιμο και το οξειδωτικό είναι αέρια τότε πρόκειται για φλόγα διάχυσης ή φλόγα αερίων. Αν το καύσιμο και το οξειδωτικό έχουν διαφορετική φύση τότε η διαδικασία καλείται ετερογενής καύση.

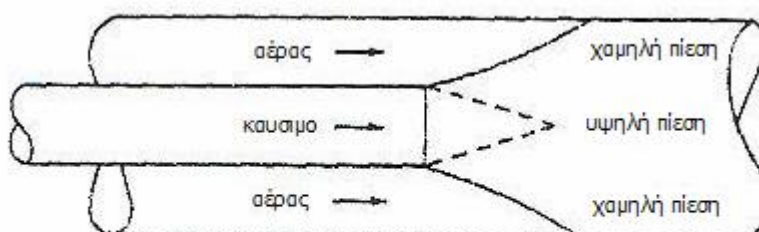
Αντίθετα με την καύση προανεμιγμένων αερίων, τα οποία έχουν στενή ζώνη

αντιδράσεων, η καύση διάχυσης διαθέτει μια μεγάλη περιοχή μέσα στην οποία αλλάζει η σύνθεση των αερίων. Η αλλαγή αυτή οφείλεται κυρίως στη διάχυση μεταξύ των αντιδρώντων και των προϊόντων, αφού οι αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα σε μια στενή ζώνη. Κάτω από αυτές τις συνθήκες η έννοια της ταχύτητας της φλόγας δεν έχει πλέον καμία σημασία, γιατί υπάρχουν δύο ταχύτητες διάχυσης.

Στη μελέτη των ομαλών φλογών διάχυσης μας απασχολούν δύο γεωμετρίες. Η πρώτη αφορά τη φλόγα του ελεύθερου πίδακα, η οποία είναι στην ουσία η ροή είτε αέρα είτε καυσίμου από ένα ακροφύσιο σε ακίνητο καύσιμο ή αέρα (σχ. 2.1). Η δεύτερη γεωμετρία αφορά δύο ομόκεντρους κυλινδρικούς αγωγούς. Ο ένας περιέχει αέρα ή οξειδωτικό και καύσιμο ο άλλος (σχ. 2.2).



## 2.1. ΔΙΑΧΥΣΗ ΦΛΟΓΑΣ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΠΙΔΑΚΑ



## 2.2. ΔΙΑΧΥΣΗ ΚΡΑΤΗΜΕΝΗΣ ΕΝΤΟΣ ΟΡΙΩΝ ΦΛΟΓΑ

Οι διάφορες μελέτες έχουν αποδείξει ότι η ζώνη της φλόγας είναι αρκετά λεπτή σε πάχος, γεγονός που αποδεικνύει ότι ο ρυθμός των χημικών αντιδράσεων είναι πολύ υψηλός, σε σχέση με το ρυθμό διάχυσης. Έχει δειχθεί επίσης ότι, ως αποτέλεσμα της διάχυσης, υπάρχουν προϊόντα της καύσης και στις δύο πλευρές της φλόγας.

### **2.2.δ. ΤΥΡΒΩΔΕΙΣ ΦΛΟΓΕΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ**

Στις ομαλές φλόγες διάχυσης το ύψος της φλόγας αυξάνει με την αύξηση της ογκομετρικής παροχής. Σε αριθμό  $Re = 8000$  εμφανίζεται τύρβη στο απάνω άκρο της φλόγας. Η μεταβατική αυτή τιμή εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από το καύσιμο που χρησιμοποιείται. Στις ροές με αριθμό  $Re$  κοντά στον κρίσιμο μόνο το υψηλότερο μέρος της φλόγας είναι τυρβώδες. Όσο η ογκομετρική παροχή μειώνεται το ύψος της φλόγας μειώνεται ελάχιστα ενώ το ομαλό ύψος της φλόγας μειώνεται σημαντικά. Τα δύο αυτά ύψη, της τυρβώδους και της ομαλής φλόγας, παίρνουν οριακές τιμές. Η ευθεία που χωρίζει τα δύο αυτά μέρη καλείται σημείο διαχωρισμού. Όταν το σημείο αυτό πλησιάζει το ακροφύσιο, περαιτέρω αύξηση στην ταχύτητα έχει μικρή επίδραση στο ύψος της φλόγας. Με παραπάνω αύξηση της Παροχής αυξάνει το ύψος της φλόγας αλλά μειώνεται η φωτεινότητά της. Τέλος για πολύ μεγάλες παροχές είναι αδύνατη η ευστάθεια της φλόγας.

### **2.3. ΟΡΙΑ ΕΥΦΛΕΚΤΟΤΗΤΑΣ**

Δεν εκρήγνυνται ούτε καίγονται όλα τα μείγματα καυσίμου-αέρα. Η φλόγα μπορεί να διαδοθεί μέσα σε ένα μείγμα μόνο όταν αυτό βρίσκεται αυστηρά μέσα σε κάποια όρια σύνθεσης. Αν μικρά ποσά καυσίμου αερίου προστεθούν βαθμιαία στον αέρα, θα υπάρξει ένα σημείο στο οποίο το μείγμα μόλις γίνεται εύφλεκτο. Το ποσοστό % του καυσίμου σε αυτό το σημείο καλείται χαμηλό (κάτω) όριο ευφλεκτότητας ή φτωχό όριο. Αν συνεχίσουμε να προσθέτουμε καύσιμο αναπόφευκτα θα φτάσουμε σε ένα σημείο πέρα από το οποίο το μείγμα πλέον δεν καίγεται. Το % ποσοστό του καυσίμου στο σημείο αυτό καλείται άνω ή πλούσιο όριο ευφλεκτότητας.

Επειδή ο προσδιορισμός αυτών των δύο σημείων είναι πού σημαντικός για τη λειτουργία του κινητήρα, έχει υιοθετηθεί μία συγκεκριμένη πειραματική διάταξη μέτρησης τους. Η ανάλυση και μελέτη των πληροφοριών από τα διάφορα πειράματα έδειξαν ότι και το φτωχό και το πλούσιο όριο, για ένα συγκεκριμένο καύσιμο, αντιστοιχούν σε μία κοινή, ελάχιστη θερμοκρασία φλόγας της τάξης των 2200 K. Επίσης για πολλά καύσιμα ισχύει: Χαμηλό όριο (% καυσίμου) \* θερμίδες (Kcal/mol) = 1100 Μια πιο εμπειρική παρατήρηση έδειξε ότι για πολλά καύσιμα το φτωχό όριο αντιστοιχεί σε λόγο ισοδυναμίας γύρω στο 0.5 ενώ το πλούσιο όριο σε λόγο περίπου ίσο με 3.

Μια αύξηση στην πίεση, πάνω από την ατμοσφαιρική, συνήθως διευρύνει τα όρια της ευφλεκτότητας των αερίων και των ατμών. Το ίδιο αποτέλεσμα παρατηρείται και με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Όσον αφορά τα υγρά καύσιμα, ο σχηματισμός καυσίμων μειγμάτων είναι μόνο δυνατός μέσα σε συγκεκριμένα όρια θερμοκρασίας. Το χαμηλότερο όριο συμπίπτει με την ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία η τάση ατμών είναι αρκετή να σχηματίσει όγκο συγκέντρωσης ατμών



στον αέρα ο με αυτό του χαμηλού ορίου. Με ψύξη κάτω από αυτή τη θερμοκρασία, το μείγμα είναι αδύνατο να αναφλέγει. Το υψηλότερο όριο θερμοκρασίας αντιστοιχεί στη συγκέντρωση του υψηλού ορίου και μια αύξηση στη θερμοκρασία οδηγεί σε μη αναφλέξιμο μείγμα.

Το χαμηλότερο θερμοκρασιακό όριο είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία ένα εύφλεκτο μείγμα μπορεί να δημιουργηθεί στην υγρή φάση. Καλείται σημείο ανάφλεξης, όταν αναφέρεται σε ατμοσφαιρική πίεση. Η ευκολία με τη οποία παράγεται ατμός για να σχηματισθεί εύφλεκτο μείγμα εξαρτάται από την τάση ατμών του καυσίμου. Τα πιο πτητικά καύσιμα έχουν υψηλή τάση ατμών, η οποία εξασφαλίζει χαμηλό σημείο ανάφλεξης.

Σε θερμοκρασίες σημαντικά υψηλότερες από το σημείο ανάφλεξης, μια περιοχή μέσα στα όρια ευφλεκτότητας, βρίσκεται στην περιοχή αυτανάφλεξης του καυσίμου. Το φαινόμενο αναφέρεται σαν απότομη ανάφλεξη, χωρίς την απαίτηση εξωτερικής πηγής ενέργειας για την εξασφάλιση της διάδοσης της φλόγας. Η χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία μπορεί να εμφανιστεί η απότομη ανάφλεξη καλείται ελάχιστη θερμοκρασία αυτανάφλεξης και συνήθως εμφανίζεται στο στοιχειομετρικό λόγο μείγματος.

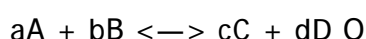
## **2.4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ**

Παρά το γεγονός ότι η διαδικασία της καύσης περιλαμβάνει πολλές φυσικές διεργασίες, όπως η έγχυση του καυσίμου, ο ψεκασμός, η εξαέρωση και η ανάμειξη καυσίμου-αέρα, βασικά πρόκειται για μια χημική διεργασία. Είναι πολύ σημαντικό για το σχεδιαστή του θαλάμου καύσης να γνωρίζει ανά πάσα στιγμή αν οι χημικές αντιδράσεις ή οι φυσικές διεργασίες μπορούν να ελεγχθούν όσον αφορά το ρυθμό εκδήλωσης και ανάπτυξης τους. Π αυτό είναι απαραίτητη η γνώση της ταχύτητας της χημικής αντίδρασης και ο τρόπος με το οποίο αυτή μεταβάλλεται με την πίεση, τη θερμοκρασία και τη σύνθεση του μείγματος αλλά και τις εξωτερικές πηγές ενέργειας που επιδρούν στο σύστημα.

Μια χημική αντίδραση χαρακτηρίζεται από την τάξη της. Οι αντιδράσεις πρώτης τάξης αφορούν αλλαγές ενός και μόνο μορίου σε προϊόντα. Αυτές της δεύτερης τάξης αφορούν την αντίδραση μεταξύ δύο μορίων ή μεταξύ ενός μορίου και ενός ατόμου, για την παραγωγή προϊόντων. Οι αντιδράσεις τρίτης τάξης αφορούν αλληλεπιδράσεις μεταξύ τριών ενώσεων ταυτόχρονα.

### **2.4.α. ΡΥΘΜΟΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ**

Η βασική έννοια για τον προσδιορισμό του ρυθμού μιας χημικής αντίδρασης είναι ο νόμος της δράσης των μαζών, ο οποίος συνδέει το ρυθμό της αντίδρασης με τις συγκεντρώσεις των αντιδρώντων. Αυτό φαίνεται ότι παρακάτω παράδειγμα :



ρυθμός αντίδρασης, της ευθείας αντίδρασης, ορίζεται ως

$$R_f = K_f [A]^a [B]^b \text{ ενώ}$$

της αμφίδρομης

$$R_r = K_r [C]^c [D]^d$$

## **2.5. ΕΞΑΕΡΩΣΗ**

Όταν τα σταγονίδια εγχύονται μέσα στη ζώνη καύσης, η θερμοκρασία και η συγκέντρωση του καυσίμου είναι χαμηλές και παρατηρείται ελάχιστη διάχυση μάζας από πλευράς των σταγονιδίων. Όσο όμως η θερμότητα μεταδίδεται από τα ζεστά αέρια στα σταγονίδια, η θερμοκρασία του υγρού αυξάνει και οι ρυθμοί μετάδοσης της μάζας αυξάνουν. Η θερμότητα των σταγονιδίων αυξάνει από μια ελάχιστη τιμή, στο κέντρο, έως μια μέγιστη, στην επιφάνεια. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας η θερμοκρασία παίρνει την ίδια τιμή σε όλον τον όγκο της σταγόνας. Φτάνει λοιπόν η θερμοκρασία σε ένα κρίσιμο σημείο όπου όλη η μεταδιδόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για την εξαέρωση.

## **2.6. ΧΡΟΝΟΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΥΤΑΝΑΦΛΕΞΗΣ**

Η αυτανάφλεξη είναι μια διαδικασία στην οποία το εύφλεκτο μείγμα υπόκειται σε μια χημική αντίδραση, η οποία οδηγεί σε ταχεία έκλυση ενέργειας, χωρίς την παρουσία κάποιας εξωτερικής πηγής ενέργειας, όπως π.χ. σπινθήρα ή φλόγα. Στους σύγχρονους θαλάμους καύσης, οι οποίοι χρησιμοποιούν φτωχά προεξαερωμένα - προαναμειγμένα μείγματα, αποφεύγεται η αυτανάφλεξη, άσχετα με το κόστος αυτής της επιδίωξης, αφού το γεννώμενο μπορεί να στοιχίσει την καταστροφή του θαλάμου αλλά και την αυξημένη εκπομπή των ρύπων.

Ο χρόνος καθυστέρησης της αυτανάφλεξης μπορεί να ορισθεί ως ο χρόνος που μεσολαβεί ανάμεσα στη δημιουργία του εύφλεκτου μείγματος και στην ανάφλεξη. Εξαιτίας της τεράστιας πρακτικής σημασίας του καθορισμού του χρόνου αυτού, έχουν γίνει πληθώρα μελετών για διάφορα καύσιμα, σε διάφορους κινητήρες με όλες τις πιθανές συνθήκες λειτουργίας.

Από τις μελέτες αυτές είναι γνωστό ότι η καθυστέρηση της αυτανάφλεξης καθορίζεται και από φυσικά και από χημικά αίτια. Για τα υγρά καύσιμα η καθυστέρηση λόγω "φύσης" έγκειται στο χρόνο που απαιτείται για εξαέρωση και μείξη του καυσίμου με το γύρω αέρα. Η καθυστέρηση λόγω "χημείας" αναφέρεται στο χρόνο μεταξύ της δημιουργίας του εύφλεκτου μείγματος και της εμφάνισης της φλόγας.

## **2.7. ΕΠΙΣΤΡΟΦΗ ΦΛΟΓΑΣ**

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό όλων των κινητήρων, που χρησιμοποιούν συστήματα προανάμειξης, είναι η επιστροφή φλόγας. Για τους συμβατικούς κινητήρες το φαινόμενο αυτό ορίζεται ως η γρήγορη χημική αντίδραση, συνοδευόμενη από -σημαντική έκλυση θερμότητας, σε μια περιοχή προανάμειξης του θαλάμου καύσης, εξαιτίας της πρόωρης διάδοσης της φλόγας από την κύρια ζώνη καύσης."

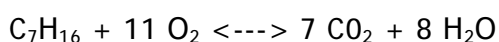
Έχουν προσδιορισθεί δύο βασικές μορφές επιστροφής φλόγας α) στο ελεύθερο ρεύμα και β) στις αργές ροές, στο οριακό στρώμα γύρω από την επιφάνεια του συγκρατητή φλόγας και των τοιχωμάτων, στην περιοχή προανάμειξης. Και οι δύο μορφές μπορεί να αφορούν και ομογενείς και ετερογενείς αντιδράσεις.

Η πιο συνήθης μορφή επιστροφής φλόγας στο κύριο ρεύμα οφείλεται σε αντιστροφή της ροής, Η αντιστροφή αυτή της ροής μπορεί να είναι αποτέλεσμα απώλειας στήριξης του συμπιεστή ή παρουσίας ξένου σώματος στο κινητήρα (F.O.D.) ή αστάθειας στον καύση. Επιστροφή φλόγας μπορεί να συμβεί επίσης όταν η ταχύτητα διάδοσης της φλόγας είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα εισαγωγής του προαναμειγμένου μείγματος.

Η επιστροφή φλόγας στο οριακό στρώμα συμβαίνει λόγω καθυστέρησης της ροής σε αυτό. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο είναι η θερμοκρασία των τοιχωμάτων καθώς και η δομή και το πάχος του οριακού στρώματος όπως και η τύρβη.

## **2.8 ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΑ**

Η πλήρης καύση ενός καυσίμου H/C απαιτεί την παρουσία αρκετού αέρα έτσι ώστε να μετατρέψει το καύσιμο σε CO<sub>2</sub> και υδρατμούς. Αφού 23% κ.β. του οξυγόνου του αέρα λαμβάνει μέρος στη διαδικασία της καύσης, ο στοιχειομετρικός λόγος αέρα/ καυσίμου (AFR) μπορεί να υπολογισθεί από την εξίσωση της αντίδρασης που ακολουθεί.



Προκύπτει ότι 1 mole C<sub>7</sub>H<sub>16</sub> απαιτεί 11 moles O<sub>2</sub> για την πλήρη καύση του. Γνωρίζοντας τα ατομικά βάρη των C, O, H έχουμε :

$$100gr + 352gr = 308gr + 144gr$$

Δηλαδή 19gr καυσίμου απαιτεί 3.52gr O<sub>2</sub> ή 3.52(100/23)gr =15.3gr αέρα. Αυτό δείχνει ότι ο AFR είναι ίσος με 15.3.0 λόγος αυτός μπορεί να εκφραστεί και ως λόγος καυσίμου/ αέρα οπότε είναι ίσος με 0.06535.

Τα στοιχειομετρικά μείγματα εξορισμού διαθέτουν την απαραίτητη ποσότητα του αέρα για την τέλεια καύση του καυσίμου. Αν η καύση γίνει σε μεγαλύτερο AFR, το μείγμα ονομάζεται φτωχό ή αδύνατο. Καύση σε μικρότερο AFR σημαίνει έλλειψη οξυγόνου και συνεπώς ατελή καύση.

Για τη σύγκριση των χαρακτηριστικών καύσης διαφόρων καυσίμων είναι πιο βολικό να εκφρασθεί η δύναμη του μείγματος με το λόγο ισοδυναμίας  $\phi$ . Ο λόγος αυτός είναι ουσιαστικά ο λόγος καυσίμου/ αέρα του μείγματος, που μελετούμε, διαιρεμένος με το στοιχειομετρικό λόγο καυσίμου/ αέρα. Για όλα τα καύσιμα  $\phi=1$  σημαίνει στοιχειομετρικό μείγμα,  $\phi < 1$  υποδεικνύει φτωχό μείγμα ενώ  $\phi > 1$  πλούσιο μείγμα.

## **2.9. ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΦΛΟΓΑΣ**

Η θερμοκρασία της φλόγας είναι ίσως το πιο σημαντικό στοιχείο της καύσης αφού αυτή καθορίζει το ρυθμό εκδήλωσης των χημικών αντιδράσεων. Ο όρος αδιαβατική θερμοκρασία είναι η υπολογισμένη θερμοκρασία. Είναι η θερμοκρασία που θα είχε η φλόγα εάν η ενέργεια, που απελευθερώνεται από τη χημική αντίδραση και μετατρέπεται το άκαυτο μείγμα σε προϊόντα της καύσης, χρησιμοποιηθεί εξολοκλήρου για τη θέρμανση των προϊόντων αυτών. Πρακτικά έχουμε απώλειες με ακτινοβολία και συναγωγή, κατά συνέπεια η αδιαβατική θερμοκρασία δεν επιτυγχάνεται σχεδόν ποτέ. Παρόλα αυτά παίζει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της αποτελεσματικότητας της καύσης και στους υπολογισμούς της μετάδοσης θερμότητας. Σε μεγάλες θερμοκρασίες φλόγας, πάνω από τους 1800 K, κάνει την εμφάνιση του το φαινόμενο της διάσπασης των προϊόντων της καύσης με ταυτόχρονη απορρόφηση σημαντική ποσότητας ενέργειας. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, καύση στοιχειομετρικού ή φτωχότερου μείγματος θα δώσει CO<sub>2</sub> και νερό, ενώ σε υψηλότερες θα εμφανιστούν και CO, H<sub>2</sub>, O, H και OH. Η ενέργεια που απορροφάται από τη διάσπαση των προϊόντων είναι πολύ μεγάλη με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας φλόγας.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

## ΚΑΥΣΙΜΑ ΑΕΡΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

### **3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στην αρχή της ανάπτυξης των αεροκινητήρων, πιστευόταν ευρύτατα ότι σε λ:γα χρόνια θα ήταν δυνατή η χρήση μιας ευρείας γκάμας φτηνών καυσίμων. Ακόμα και μετά την επιλογή της κηροζίνης ως βασικού καυσίμου, εξαιτίας του κόστους της, της εύκολης χρήσης της και δυνατότητας παραγωγής της, όλοι ανέμεναν τη χρήση νέων καυσίμων. Αυτή η αισιοδοξία όμως έλαβε τέλος όταν διαπιστώθηκε αρκετά γρήγορα η σημασία, στις απαιτήσεις του αεροσκάφους και του κινητήρα, των ιδιοτήτων του καυσίμου.

Εκτεταμένη έρευνα έγινε από τις εταιρείες κατασκευής κινητήρων και παραγωγής καυσίμων, που αποσκοπούσε στην κατανόηση των ιδιοτήτων των καυσίμων, που επιδρούν στις επιδόσεις, στην ασφάλεια και στην αξιοπιστία των αεροσκαφών. Αυτό βοήθησε στην επίλυση πολλών προβλημάτων, που είχαν εμφανιστεί στην αρχή, όμως οι συνεχόμενες απαιτήσεις για μεγαλύτερες ταχύτητες και επιχειρησιακά ύψη, δημιούργησαν καινούργια. Στα τέλη του 1960 η κοινή γνώμη ευαισθητοποιήθηκε σε θέματα μόλυνσης του περιβάλλοντος, με συνέπεια να απαιτηθεί η μείωση των εκπομπών των κινητήρων σε μονοξειδία του άνθρακα, άκαυτους υδρογονάνθρακες, καπνό και οξειδία του αζώτου.

Γενικά για δεδομένες αεροπορικές εφαρμογές, το βέλτιστο καύσιμο είναι αυτό που δίνει συμβιβαστικές λύσεις στα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι εταιρείες καυσίμων, οι κατασκευαστές κινητήρων αλλά και οι χρήστες. Για τα πολιτικά αεροσκάφη ,ο βασικές απαιτήσεις είναι η ασφάλεια, η αξιοπιστία, το χαμηλό κόστος και η εύκολη χρήση. Για τα στρατιωτικά αεροσκάφη το κόστος είναι δευτερεύουσας σημασίας σε σχέση με τη διαθεσιμότητα, την εφοδιαστική μέριμνα και την ανάγκη για ομαλή λειτουργία σε διαφορετικές συνθήκες πτήσης. Από τη μέχρι σήμερα εμπειρία γνωρίζουμε ότι τα αέρια δεν εμφανίζουν προβλήματα, όμως το παραμένον καύσιμο προκαλεί καταστροφική για το σύστημα στάχτη και συχνά μεγάλες ποσότητες καπνού. Αντίθετα οι προσπάθειες χρήσης κονιορτοποιημένων στερεών καυσίμων ήταν ανεπιτυχείς.

Τα βασικά ζητήματα σε σχέση με τα καύσιμα, στις μέρες μας, είναι το κόστος και η διαθεσιμότητα. Μετά το 1973 η τιμή του αργού πετρελαίου έχει τετραπλασιασθεί. Αυτή η αύξηση είχε αξιοσημείωτο αντίκτυπο στις οικονομίες των βιομηχανικών χωρών. Απέδειξε επίσης και την τρωτότητά τους στις "διαθέσεις" των πετρελαιοπαραγωγών χωρών αλλά και το δεδομένο της εξάντλησης των κοιτασμάτων του πετρελαίου.

Τα μέτρα που έχουν παρθεί για την εξασφάλιση της τροφοδοσίας με καύσιμα των αεροκινητήρων, σε συνδυασμό με τα διάφορα μέτρα οικονομίας σε καύσιμα, περιλαμβάνουν την εκμετάλλευση εναλλακτικών πηγών ενέργειας και την αποδοχή ευρύτερων προδιαγραφών όσον αφορά τα αεροπορικά καύσιμα. Τα εναλλακτικά καύσιμα που αφορούν τους καύσιμα εξάγονται κυρίως από άνθρακα, βαριά έλαια και πισσώδη κοπάσματα. Ακόμα το μεθάνιο και το υδρογόνο είναι ανάμεσα στα υποψήφια προς χρήση καύσιμα. Όλα αυτά θα πρέπει να είναι συμβατά με τις απαιτήσεις του κινητήρα αλλά και του συστήματος καυσίμου, ανάλογες με τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του

αεροσκάφους και την επιχειρησιακή χρήση του. Το μεγαλύτερο μέρος των αλλαγών, στο σχεδιασμό του θαλάμου καύσης, γίνεται στους εγχύτες καυσίμου έτσι ώστε να επιτυγχάνεται δυνατότητα χρήσης πολλών καυσίμων, αλλά και στο διακανονισμό του μείγματος έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο σχηματισμός αιθάλης.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε στις βασικές πρακτικές ιδιότητες των καυσίμων αλλά και στην επίδραση τους στην απόδοση και το σχεδιασμό του θαλάμου καύσης.

### **3.2. ΠΡΟΣΘΕΤΑ**

Μία συνηθισμένη τεχνική για τη βελτίωση ή τροποποίηση των προϊόντων του πετρελαίου, που χρησιμοποιούνται σε αεροπορικές εφαρμογές, είναι η προσθήκη μικρών ποσοτήτων ορισμένων υποκατάστατων, που καλούνται πρόσθετα. Σήμερα είναι διαθέσιμος μεγάλος αριθμός πρόσθετων, που συνεχώς βελτιώνονται. Μία, προφανής απαίτηση από τη χρήση ενός πρόσθετου είναι η απόδοση της βασικής λειτουργίας χωρίς την εμφάνιση οποιωνδήποτε παρενεργειών. Συνήθως αυτό σημαίνει ότι το πρόσθετο πρέπει να είναι τοξικό, ευδιάλυτο στο καύσιμο και θερμικά ευσταθές.

#### **3.2.α. ΠΡΟΛΗΨΗ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΕΩΝ**

Τα πρόσθετα που βελτιώνουν την ευστάθεια των καυσίμων είναι αντιοξειδωτικά, δεν αντιδρούν με μέταλλα και είναι αδρανείς καταλύτες. Ως αντιοξειδωτικά διακόπτουν τη βαθμιαία διαδικασία της οξειδωσης ή ανακόπτει το ρυθμό ανάπτυξης της. Επειδή δεν αντιδρούν με τα μέταλλα καταπνίγουν την καταλυτική δραστηριότητα των μετάλλων, μετατρέποντας τα σε οργανομεταλλικές, αδρανείς ενώσεις. Τέλος η καταλυτική τους αδράνεια μειώνει την καταλυτική δράση των μετάλλων, δημιουργώντας έναν επίπαγο πάνω τους.

#### **3.2.β. ΑΝΑΣΤΟΛΗ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ**

Οι διαλυτοί αναστολείς οξειδωσης εν γένει είναι υδρογονάνθρακες, των οποίων η διαλυτότητα, στο καύσιμο, συνδυάζεται με οργανική έλξη για μεταλλικές επιφάνειες. Πιστεύεται ότι προσκολλούνται στις επιφάνειες αυτές με σκοπό τη δημιουργία ενός μονομοριακού στρώματος πάνω τους. Τέτοιοι αναστολείς οξειδωσης είναι οι αμίνες, οι σουλφίνες και τα λιπώδη οξέα.

#### **3.2.γ. ΑΝΤΙΠΑΓΩΤΙΚΑ**

Τα αντιπαγωτικά πρόσθετα είναι διαλυτά στοιχεία με μια μη αντιστρεπτή υgroφιλία η οποία τους επιτρέπει την ένωση με την υγρασία, που βρίσκεται μέσα στο καύσιμο, αποφεύγοντας έτσι τη διάλυση της και τη δημιουργία κρυστάλλων πάγου. Γνωστό αντιπαγωτικό είναι η αιθυλική γλυκόλη μονομέθουλου αιθέρα.

### **3.2.δ. ΑΝΤΙΣΤΑΤΙΚΑ**

Κατά τη διάρκεια της πλήρωσης του αεροσκάφους με καύσιμα, τα φορτία στατικού ηλεκτρισμού μπορούν να πάρουν τέτοιες τιμές ώστε να είναι πιθανή μία εκκένωση, που θα προκαλέσει έκρηξη και πυρκαγιά. Οι ρυθμοί φορτίσεως είναι υψηλότεροι, όταν μικρής αγωγιμότητας καύσιμα εισάγονται με μεγάλες ταχύτητες στις δεξαμενές, για αυτό και οι εταιρείες καυσίμων πήραν για κάποιο καιρό μέτρα προφύλαξης, προκειμένου να μειωθεί η πιθανότητα ανάφλεξης, θέτοντας περιορισμούς στην ταχύτητα της ροής πλήρωσης.

Μία άλλη πρακτική λύση είναι η αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του καυσίμου έτσι ώστε τα φορτία να εκτονώνονται αμέσως μετά την εμφάνισή τους.

### **3.2.ε. ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ**

Για υψηλή θερμική ευστάθεια, τα καύσιμα υπόκεινται σε πολύπλοκες διαδικασίες, προκειμένου να αποβάλλουν ξένες ουσίες μικρών συγκεντρώσεων, που περιέχουν άζωτο και οξυγόνο. Αυτή η διαδικασία μπορεί να μειώσει σημαντικά τη λιπαντικότητα του καυσίμου με συνέπειες στην ομαλή λειτουργία της αντλίας. Μετά από πειράματα βρέθηκε ότι για αεροπορικά καύσιμα, που έχουν υποστεί συνεχείς επεξεργασίες, αρκετά ικανοποιητικά πρόσθετα, που αυξάνουν τη λιπαντικότητα του καυσίμου, είναι οι πολικές ενώσεις. Δεν ήταν δυνατό να προσδιοριστεί επακριβώς ποιών συστατικών η έλλειψη επηρέαζε τη λιπαντικότητα, αλλά ικανοποιητικά αποτελέσματα σημειώθηκαν με τους διαλυτούς αναστολείς διάβρωσης.

### **3.2.στ. ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΠΑ ΤΗΝ ΕΞΑΦΑΝΙΣΗ ΤΟΥ ΚΑΠΝΟΥ**

Σημαντικό ενδιαφέρον δείχθηκε για τη χρήση προσθέτων που θα μείωναν την εκπομπή του καπνού. Τα πιο διαδεδομένα είναι οι οργανομεταλλικές ενώσεις του βορίου, μαγγανίου και σιδήρου. Υπάρχει όμως ένα σημαντικό μειονέκτημα στη χρήση προσθέτων που βασίζονται σε μέταλλα. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της καύσης, μπορούν να σχηματίσουν οξείδια, τα οποία μπορούν να επικαθίσουν στις λεπίδες του στροβίλου. Ακόμα θα μπορούσε να παραχθεί, στην έξοδο του κινητήρα, ένα εξίσου μολυσματικό αέριο, το οποίο μπορεί να είναι λιγότερο αποδεκτό, περιβαλλοντολογικά, από τον καπνό. Για αυτό το λόγο οι ερευνητές πιστεύουν ότι η μόνη ικανοποιητική λύση στο πρόβλημα της εκπομπής του καπνού, έχει να κάνει με τη βελτίωση στη σχεδίαση του θαλάμου καύσης.

### **3.3. ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ**

Σε ένα θάλαμο καύσης το καύσιμο πρέπει να εγχυθεί, να εξαερωθεί και να αναμειχθεί με τον αέρα, πριν την εισαγωγή στη ζώνη καύσης. Το πόσο αυτές οι διαδικασίες είναι περιοριστικές για την καύση εξαρτάται από το πόσο είναι διευρυμένες οι φυσικές ιδιότητες



του καυσίμου. Αυτές οι ιδιότητες είναι σημαντικές και στην αξιολόγηση των αεροπορικών καυσίμων, στη διατήρηση της ακεραιότητας τους αλλά αποτελούν και μέτρο της δυνατότητας τους να αντλούνται, από την αντλία, καθ' όλο το ευρύ πεδίο μεταβολών των πιέσεων και θερμοκρασιών λειτουργίας.

### **3.3.α. ΣΧΕΤΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ**

Η σχετική πυκνότητα  $d_r$  (ή επισήμως αποκαλούμενη ως ειδικό βάρος) ενός καυσίμου σχετίζεται με το μέσο σημείο βρασμού του και τη χημική του σύνθεση. Γενικά είναι υψηλότερη για τις αρωματικές ενώσεις και χαμηλότερες για τις παραφίνες με ενδιάμεσες τιμές για τις ολεφίνες. Η σχετική πυκνότητα είναι σχετικά εύκολο να προσδιοριστεί και παρέχει χρήσιμες ενδείξεις για το λόγο  $H_2/C$ , τη θερμοδυναμική αξία και τη τάση για σχηματισμό C του καυσίμου. Τυπικές τιμές για υγρά καύσιμα προερχόμενα από το πετρέλαιο είναι 0.72 για τις βενζίνες και πάνω από 0.97 για τα βαρέα κλάσματα πετρελαίου.

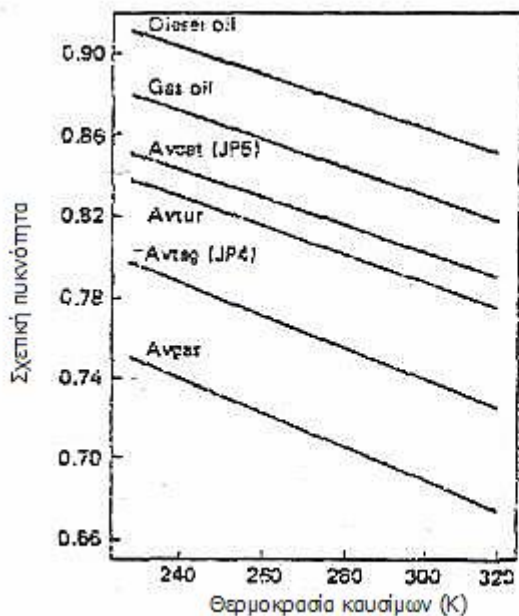
Η σχετική πυκνότητα στους  $T_1/T_2$  ενός καυσίμου, συνήθως ορίζεται ως ο λόγος της μάζας, δεδομένου όγκου καυσίμου σε θερμοκρασία  $T_1$  προς τη μάζα ενός ίσου όγκου καθαρού νερού σε θερμοκρασία  $T_2$ . Συνήθως ως θερμοκρασίες αναφοράς χρησιμοποιούνται  $T_1 = 289 \text{ K}$  και  $T_2 = 277 \text{ K}$ , όπου η πυκνότητα του νερού είναι μέγιστη.

Η σχέση μεταξύ της σχετικής πυκνότητας και της θερμοκρασίας του καυσίμου φαίνεται για ορισμένα αεροπορικά καύσιμα στο σχ. 3.1.

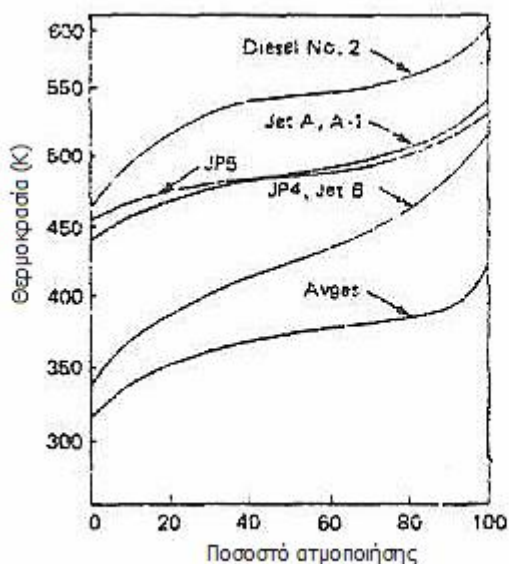
### **3.3.β. ΕΥΡΟΣ ΑΠΟΣΤΑΞΕΩΣ**

Τα κοινά υγρά όπως το νερό βράζουν σε μία σταθερή θερμοκρασία και μετατρέπονται σε ατμό. Τα προϊόντα όμως του πετρελαίου δεν είναι κοινά υγρά αλλά μείγματα πολλών ενώσεων με διαφορετικό σημείο βρασμού. Γι αυτό για το πετρέλαιο δεν υπάρχει ένα μοναδικό σημείο βρασμού αλλά εύρος αποστάξεως.

Τα πειράματα αποστάξεως κατά ASTM γίνονται με τη θέρμανση ενός δείγματος του καυσίμου σε γυάλινο δοχείο στο οποίο έχει τοποθετηθεί ένα θερμόμετρο. Η πιο πτητική ένωση βράζει πρώτη και ο ατμός της οδηγείται σε ένα σωλήνα που ψύχεται. Από εκεί τα ψυγμένα υγρά ρέουν σε βαθμονομημένο δοχείο. Με περαιτέρω αύξηση στη θερμοκρασία οι παραμένοντες ενώσεις αποστάζονται με τη σειρά τους ώσπου στο τέλος παραμένει ένα μικρό απόθεμα. Η θερμοκρασία στην οποία η πρώτη σταγόνα του υγρού πέφτει στο δοχείο-υποδοχή καταγράφεται ως το αρχικό σημείο βρασμού και η υψηλότερη θερμοκρασία στο τέλος της απόσταξης ως τελικό σημείο βρασμού. Συνήθως καταγράφονται οι θερμοκρασίες αποστάξεως του 10, 50 και 90%. Τα ευρύ απόσταξης κοινών αεροπορικών καυσίμων φαίνονται στο σχ. 3.2.



### 3.1. ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΕΣ ΑΠΟ ΤΥΠΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΤΟΥΡΜΠΙΝΩΝ



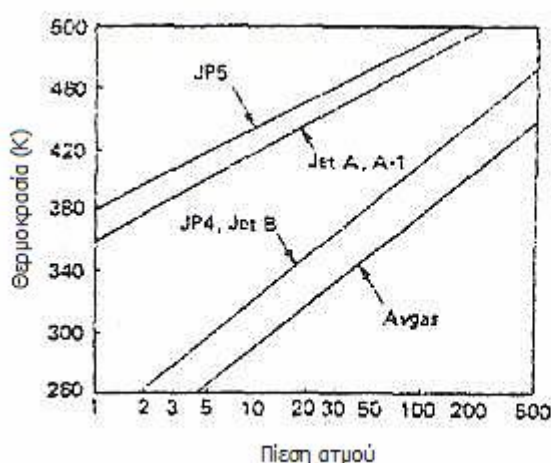
### 3.2. ASTM D-86 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΠΟΣΤΑΞΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

Το εύρος απόσταξης ενός καυσίμου είναι σημαντικό γιατί καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τα φυσικά του χαρακτηριστικά καθώς και τη συμπεριφορά του στην καύση, αλλά επηρεάζει και τη διαθεσιμότητα. Αυτή αυξάνεται με την αύξηση του εύρους απόσταξης είτε μειώνοντας το αρχικό σημείο βρασμού είτε αυξάνοντας το τελικό σημείο βρασμού είτε και τα δύο.

### **3.3.γ. ΤΑΣΗ ΑΤΜΩΝ**

Η τάση ατμών ενός υγρού είναι η ασκούμενη πίεση από τους ατμούς του στην επιφάνεια του, σε δεδομένη θερμοκρασία. Η υψηλή τάση ατμών είναι επιθυμητή από τη σκοπιά της καύσης, αφού εξασφαλίζει γρήγορη εξαέρωση στην πρωτογενή ζώνη καύσης. Από την άλλη πλευρά όμως η χαμηλή τάση ατμών έχει τα πλεονεκτήματα της όσον αφορά τη μειωμένη πίεση στις αεροστεγές δεξαμενές καυσίμων, μικρότερες απώλειες του καυσίμου, εξαιτίας της εξαέρωσης του στις αεριζόμενες δεξαμενές και μείωση της πιθανότητας φωτιάς.

Η τάση ατμών στις συνήθως χρησιμοποιούμενες κηροζίνες φαίνεται στο σχ. 3.3 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Σημειώνουμε στο σχήμα ότι η τάση ατμών αυξάνει σταδιακά με τη θερμοκρασία. Αυτό εξηγεί γιατί τα καύσιμα με χαμηλή τάση ατμών είναι ιδανικά για τις υψηλές υπερηχητικές ταχύτητες πτήσης.



### 3.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΠΙΕΣΗ ΑΕΡΙΩΝ ΑΤΜΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΑΕΡΟΠΟΡΙΑΣ

#### **3.3.δ. ΣΗΜΕΙΟ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ**

Το σημείο ανάφλεξης ορίζεται ως η χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία το καύσιμο έχει δημιουργήσει τον απαιτούμενο ατμό για το σχηματισμό εύφλεκτου μείγματος με τον αέρα. Όπως θα αναμενόταν το σημείο ανάφλεξης συνδέεται άμεσα με την τάση ατμών. Όσο υψηλότερη η τάση ατμών τόσο χαμηλότερο το σημείο ανάφλεξης. Γενικά το σημείο ανάφλεξης της κηροζίνης χρησιμοποιείται ως μέτρο της ευφλεκτότητας ενώ αντίθετα το σημείο αυτό για τα βαρέα πετρέλαια είναι ένδειξη της πτητικότητας τους. Είναι επίσης χρήσιμο για την αξιολόγηση του καυσίμου στον κίνδυνο της πυρκαγιάς.

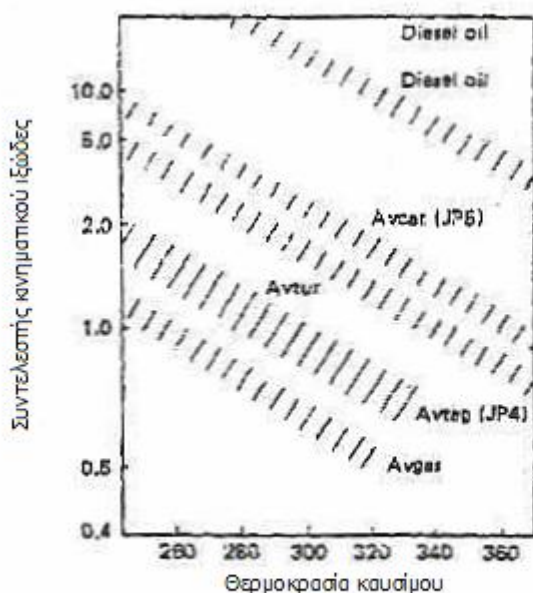
#### **3.3.ε. ΠΤΗΤΙΚΟΤΗΤΑ**

Η πτητικότητα ενός καυσίμου μπορεί να γίνει γνωστή με τη μελέτη του εύρους αποστάξεως του, την τάση ατμών και το σημείο ανάφλεξης. Αυξημένη πτητικότητα επηρέαζε την

απόδοση της καύσης, παρέχοντας εύκολη εκκίνηση και αυξημένη ευστάθεια. Αυτά τα πλεονεκτήματα είναι περισσότερο εμφανή όταν η απόδοση της καύσης περιορίζεται από το χαμηλό ψεκασμό του καυσίμου. Τα μειονεκτήματα της υψηλής πτητικότητας είναι οι υψηλές απώλειες καυσίμου λόγω εξαέρωσης του σε "μεγάλα ύψη και ο αυξημένος κίνδυνος πυρκαγιάς.

### 3.3.στ. ΙΞΩΔΕΣ

Το ιξώδες είναι μια φυσική ιδιότητα που εξαρτάται κυρίως από τη χημική σύνθεση των υδρογονανθράκων που περιέχει το καύσιμο. Εκτός από το γεγονός ότι επηρεάζει την απαιτούμενη ισχύ της αντλίας του συστήματος καυσίμου, το ιξώδες έχει αξιοσημείωτη επίδραση στον καλό ψεκασμό και συνεπώς στους ρυθμούς εξαέρωσης και καύσης. Όσο υψηλότερο το ιξώδες ενός καυσίμου τόσο χειρότερη είναι και η ποιότητα ψεκασμού. Τα σύγχρονα συστήματα ψεκασμού είναι ικανά να παρέχουν ικανοποιητική ποιότητα ψεκασμού με καύσιμα που έχουν ιξώδες γύρω στα  $15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ , ανάλογα με το σχεδιασμό του ψεκαστή αλλά και τη διαθέσιμη πίεση ψεκασμού. Οι ψεκαστές τύπου "air blast" δεν επηρεάζονται από το ιξώδες γεγονός που τους κάνει να υπερέρχουν από τους ψεκαστές πίεσης.



### 3.4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΟΥ ΙΞΩΔΕΣ – ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΤΥΠΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

Το ιξώδες των καυσίμων των αεροκινητήρων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία όπως φαίνεται στο σχ. 3.4. Γι' αυτό τα βαρέα πετρέλαια πρέπει να θερμαίνονται. Επίσης για τα αεροπορικά καύσιμα το αυξημένο ιξώδες σε χαμηλές θερμοκρασίες επιβάλλει τον ορισμό ελαχίστης θερμοκρασίας, στην οποία το επίπεδο ψεκασμού είναι ικανοποιητικό για την εκκίνηση του κινητήρα. Έτσι εμμέσως ορίζεται το ελάχιστο ιξώδες για συνθήκες περιβάλλοντος ( $12 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$  για εκκίνηση).

### **3.3.ζ. ΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ**

Συνήθως οι προδιαγραφές δεν αναφέρουν κάποιους περιορισμούς στις τιμές της τάσης επιφανείας, όσον αφορά τους αεροκινητήρες. Όμως είναι σημαντική η επίδραση της στον ψεκασμό του καυσίμου.

### **3.3.η. ΣΗΜΕΙΟ ΠΑΓΟΠΟΙΗΣΗΣ**

Τα αεροσκάφη που χρησιμοποιούν κινητήρες turbojet κάνουν την πιο οικονομική λειτουργία τους στα μεγάλα ύψη, όπου οι περιβαλλοντολογικές συνθήκες θερμοκρασίας είναι της τάξης 193 K. Ευτυχώς χρειάζεται αρκετός χρόνος ώστε η θερμοκρασία καυσίμου να πέσει αισθητά στη διάρκεια της πτήσης. Η κατάσταση δε, βελτιώνεται από την αύξηση της θερμοκρασίας εξαιτίας της κίνησης του αεροσκάφους. Ακόμη και έτσι έχουν σημειωθεί θερμοκρασίες καυσίμου της τάξης των 230 K για μεγάλης διάρκειας πτήσης σε μεγάλα ύψη. Σε τόσο χαμηλές θερμοκρασίες το καύσιμο αποκτά μεγάλο ιξώδες προκαλώντας προβλήματα στην άντληση του. Άλλο ένα πρόβλημα που προκύπτει στις χαμηλές θερμοκρασίες είναι η καθίζηση μορίων στερεών H/C ή πάγου, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει έμφραξη στα φίλτρα του καυσίμου.

Η θερμοκρασία στην οποία το καύσιμο παρουσιάζει για πρώτη φορά στερεές συσσωματώσεις καλείται σημείο παγοποίησης. Οι προδιαγραφές αεροπορικών καυσίμων ορίζουν μέγιστο σημείο παγοποίησης τους 227 K ή 215 K, ανάλογα με τη χρήση.

Η επίτευξη ενός ικανοποιητικού σημείου παγοποίησης δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα προβλήματα στα διυλιστήρια. Ωστόσο δυσκολίες μπορούν να εμφανιστούν πάνω στην προσπάθεια για αύξηση της διαθεσιμότητας με την αύξηση του τελικού σημείου βρασμού. Αυτό συνήθως σημαίνει τη συμπεριλάβει H/C με μεγάλο μοριακό βάρος, οι οποίοι έχουν υψηλό σημείο παγοποίησης.

### **3.3.θ. ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ**

Στα αεροσκάφη μεγάλων ταχυτήτων το καύσιμο πρέπει να χρησιμοποιείται ως δεξαμενή απορρόφησης της θερμότητας που αναπτύσσεται στη δομή και στο κινητήρα του αεροσκάφους. Επομένως η ειδική θερμότητα είναι μια πολύ σημαντική ιδιότητα. Τα παραφινικά

καύσιμα έχουν την καλύτερη συμπεριφορά όσον αφορά αυτή την ιδιότητα αφού έχουν μεγαλύτερες τιμές ειδικής θερμότητας και από τα ναφθανικά και τα αρωματικά καύσιμα. Για τα άλλα υγρά καύσιμα του πετρελαίου η τιμή της ειδικής θερμότητας υπολογίζεται με ακρίβεια από την έκφραση:  $C_p = 0.76 + 0.00335 T_f / d_r^{0.5}$  (KJ/Kgr\*K) όπου  $T_f$  σε K.

### **3.4. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ**

Οι ιδιότητες καύσης με μείζον ενδιαφέρον είναι αυτές που σχετίζονται με τη θερμοκρασία της φλόγας, το ρυθμό ανάπτυξης των χημικών αντιδράσεων, το εύρος της καύσης και την τάση σχηματισμού αιθάλης.

#### **3.4.α. ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΣ ΔΥΝΑΜΗ**

Η θερμογόνος δύναμη ενός καυσίμου μετριέται από τη θερμότητα που απελευθερώνεται όταν αυτό καίγεται πλήρως υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Για τα καύσιμα αεροκινητήρων η χαμηλότερη θερμογόνος δύναμη παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον αφού αναφέρεται στην πλήρη καύση σε ατμούς νερού και διοξειδίου του άνθρακα. Χρησιμοποιώντας βαρομετρική μέθοδο, η θερμογόνος δύναμη περιγράφεται ως ειδική ενέργεια ενώ με την ογκομετρική μέθοδο ως πυκνότητα ενέργειας. Για τα περισσότερα καύσιμα υδρογονανθράκων, η ειδική ενέργεια μπορεί να σχετισθεί με την σχετική πυκνότητα. Γενικά τα βαρύτερα καύσιμα έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας ενώ τα ελαφρύτερα έχουν μεγαλύτερη ειδική ενέργεια. Η επιλογή του καυσίμου για αεροπορικές εφαρμογές εξαρτάται από το αν ο διαθέσιμος χώρος για δεξαμενές καυσίμου είναι περιορισμένος, όπως π.χ. στα μαχητικά αεροσκάφη ή αν η εμβέλεια είναι περιορισμένη από το ολικό βάρος, όπως στα εμπορικά αεροσκάφη.

Η ειδική ενέργεια ενός καυσίμου εξαρτάται εξολοκλήρου από τη χημική του σύνθεση και συγκεκριμένα από το λόγο υδρογόνου/ άνθρακα και ορίζεται από εμπειρικούς κανόνες, όπως η παρακάτω έκφραση:  $LSE = 0.339 C + 1.03 H + 0.109 (O-S) + 0.025 W$  όπου  $1_{-5}E$  η χαμηλότερη ειδική ενέργεια του καυσίμου σε MJ/kg και C, H, O, S και W είναι το ποσοστό % των μαζών του άνθρακα, υδρογόνου, οξυγόνου, θείου και νερού αντίστοιχα στο καύσιμο.

Η πυκνότητα ενέργειας σε αέρια καύσιμα συνήθως εκφράζεται σε MJ/m<sup>3</sup>.

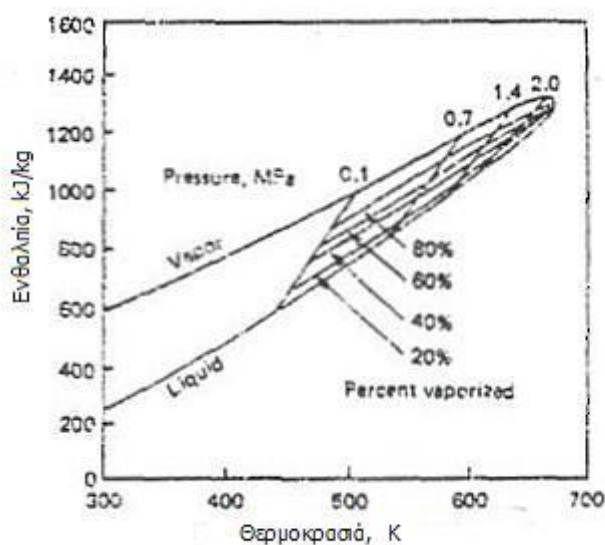
#### **3.4.β. ΕΝΘΑΛΠΙΑ**

Η ενθαλπία ενός καυσίμου είναι μέτρο της ικανότητας του να απορροφά την θερμότητα. Επίσης ορίζει το ποσό της θερμότητας που απαιτείται για την επίτευξη μιας δεδομένης αλλαγής στη θερμοκρασία ή στη φύση του καυσίμου. Διαγράμματα ενθαλπίας της μορφής του σχήματος 3.5 μπορούν να κατασκευαστούν για κάθε καύσιμο με τη γνώση των χαρακτηριστικών απόσταξης και της ειδικής θερμότητας τους. Το διάγραμμα 3.5 αναφέρεται στο καύσιμο Jet A. Η καμπύλη που

ορίζεται με τη λέξη "υγρό" αναπαριστά το ποσό της θερμότητας που μπορεί να απορροφηθεί το υγρό μόνο. Αντίστοιχα η καμπύλη με το χαρακτηριστικό "αέριο" αναφέρεται σε πλήρως εξαερωμένο καύσιμο. Η περιοχή μεταξύ των δύο καμπύλων αναπαριστούν μερική εξαέρωση ενώ η περιοχή πάνω από την καμπύλη "αερίου" αναφέρεται σε υπερθερμαινόμενο αέριο.

Ως παράδειγμα της χρήσης των διαγραμμάτων ενθαλπίας ας θεωρήσουμε το καύσιμο A στην υγρή φάση με αρχική θερμοκρασία 300 K. Η αρχική του ενθαλπία είναι 250 όπως φαίνεται στο σχήμα. Ας υποθέσουμε την προσθήκη 800 KJ/kg στο καύσιμο τότε έχουμε τελική ενθαλπία ίση με 1050 KJ/kg. Αυτή η θερμότητα μπορεί να προστεθεί με πολλούς τρόπους:

1. Το καύσιμο μπορεί να διατηρήσει την υγρή του φάση. Η τελική θερμοκρασία τότε θα είναι 600 K και όπως προκύπτει από τις καμπύλες, που αναφέρονται στο υγρό, αντιστοιχούν σε ενθαλπία ίση με 1050 KJ/kg: Μία πίεση μεγαλύτερη από 1.8 MPa θα απαιτηθεί για να διατηρηθεί η υγρή κατάσταση του καυσίμου.
2. Το καύσιμο μπορεί να εξαερωθεί πλήρως. Η τελική θερμοκρασία του αερίου θα είναι 522 K, αυτή δηλαδή που αντιστοιχεί στις καμπύλες αερίου για ενθαλπία ίση με 1050 KJ/kg.
3. Το καύσιμο μπορεί να εξαερωθεί μερικά σε μία θερμοκρασία μεταξύ 522 K και 600 K, ανάλογα με την πίεση. Για παράδειγμα πίεση 0.7 MPa θα είχε για αποτέλεσμα μείγμα υγρού/ αερίου καυσίμου, στη θερμοκρασία των 557 K, τέτοιο ώστε το 50% του ολικού καυσίμου να βρίσκεται στην αέρια μορφή.



### 3.5. ΕΝΘΑΛΠΙΑ ΤΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ JET A

### **3.4.γ. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΥΤΑΝΑΦΛΕΞΗΣ**

Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την εκδήλωση πυρκαγιάς στα αεροσκάφη αλλά και τον κίνδυνο έκρηξης είναι η τάση του καυσίμου για αυτανάφλεξη. Στην πτώση ενός αεροσκάφους, ένας συνήθης λόγος πρόκλησης πυρκαγιάς είναι η αυτανάφλεξη του καυσίμου όταν έρχεται σε επαφή με θερμές επιφάνειες, ειδικά αυτές του κινητήρα. Το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο στα αεροσκάφη μεγάλης ταχύτητας εξαιτίας της αεροδυναμικής θέρμανσης της δομής των αεροσκαφών. Σε ύψη πάνω από 11 km και ταχύτητα 2.7 Mach, το χείλος προσβολής ενός αεροσκάφους αποκτά, θερμοκρασία η οποία ξεπερνά τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης του καυσίμου.

Η θερμοκρασία αυτή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μοριακή δομή του καυσίμου, αφού οι αντιδράσεις οξειδωσης που οδηγούν στην αυτανάφλεξη μπορούν να πραγματοποιηθούν μόνο μετά το σπάσιμο των χημικών δεσμών του καυσίμου με την προσθήκη θερμότητας. "Συνεπώς η θερμοκρασία αυτανάφλεξης είναι χαμηλότερη για καύσιμα με μεγαλύτερη σχετική πυκνότητα, αφού τα μόρια είναι λιγότερο συμπαγή και πιο επιρρεπή σε διάσπαση. Οι κανονικές παραφίνες μπορούν να αναφλέγουν πιο εύκολα από τις παραφίνες με βρόγχους ή τις κυκλοπαραφίνες, που περιέχουν τον ίδιο αριθμό ατόμων άνθρακα.

Η θερμοκρασία αυτανάφλεξης συνήθως μετριέται με την έγχυση μικρής ποσότητας καυσίμου σε θερμαινόμενο δοχείο και σημειώνοντας την καθυστέρηση μέχρι την έναρξη της ανάφλεξης. Το πείραμα επαναλαμβάνεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (με μεγαλύτερες τις σημειούμενες καθυστερήσεις) μέχρι να βρεθεί η ελάχιστη θερμοκρασία ανάφλεξης.

Γενικά για καύσιμο υδρογονανθράκων η θερμοκρασία αυτανάφλεξης αυξάνει με τη μείωση της πίεσης. Πειράματα που έγιναν σε καύσιμο τύπου JP 4 έδειξε ότι μείωση της πίεσης στο 1/3 της αρχικής τιμής αυξάνει τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης στο διπλάσιο.

Κάποιοι ερευνητές ασχολήθηκαν με την επίδραση των πρόσθετων στη θερμοκρασία αυτανάφλεξης για τα αεροπορικά καύσιμα. Το πιο αποτελεσματικό ήταν ο τετρααιθυλικός μόλυβδος. Σε συγκέντρωση ίση με 3 ml ανά 5 lt αυξάνεται η ελάχιστη πίεση αυτανάφλεξης από 27.6 σε 40.7 KPa.

### **3.4.5. ΟΡΙΑ ΑΝΑΦΛΕΞΙΜΟΤΗΤΑΣ**

Τα εύφλεκτα αέρια και ατμοί είναι ικανά η φλόγα, αφού ξεκινήσει, μπορεί να διαδοθεί σε οποιαδήποτε απόσταση μακριά από την πηγή της ανάφλεξης. Είναι αναγκαίος ο ορισμός πλούσιων και φτωχών ορίων ευφλεκτότητας, τα οποία αντίστοιχα αντιπροσωπεύουν τις μέγιστες και ελάχιστες συγκεντρώσεις καυσίμου που επιτρέπουν τη συνέχιση της καύσης. Το φτωχό όριο ευφλεκτότητας είναι στενά συνδεδεμένο με το σημείο ανάφλεξης. Για καύσιμα του τύπου κηροζίνης σε θερμοκρασία δωματίου τα όρια αναφλεξιμότητας κυμαίνονται ανάμεσα σε τιμές του λόγου καυσίμου/ αέρα ίσου με 0.035 έως 0.28, ενώ οι ακριβείς τιμές εξαρτώνται από το μέγεθος και το



σχήμα του χώρου που καταλάμβαναν οι ατμοί στην δεξαμενή καυσίμου.

Τα όρια αναφλεξιμότητας δεν εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την πίεση εκτός από την περίπτωση που έχουμε χαμηλές πιέσεις. Γενικά τείνουν να διευρυνθούν ελαφρά με αύξηση της πίεσης. Αντίθετα μεγαλύτερες είναι οι επιδράσεις της θερμοκρασίας. Σε χαμηλές θερμοκρασίες το καύσιμο μπορεί να μην παράγει αρκετούς ατμούς με αποτέλεσμα ο λόγος του μείγματος να κείται χαμηλότερα από το ασθενές όριο αναφλεξιμότητας. Σε μεγάλες θερμοκρασίες η παραγωγή ατμών μπορεί να μετατοπίσει το λόγο του μείγματος σε τιμές πάνω από το πλούσιο όριο αναφλεξιμότητας. Γι αυτό και τα εύφλεκτα μείγματα παράγονται μόνο σε συγκεκριμένο πεδίο τιμών θερμοκρασιών. Για παράδειγμα για το JP 4 οι θερμοκρασίες αναφλεξιμότητας στο επίπεδο της θάλασσας έχουν τιμές από 316 έως 318 K.

Ο ρυθμός εξαέρωσης του καυσίμου αυξάνει με το ύψος. Γι αυτό και σε μεγάλα ύψη τα εύφλεκτα μείγματα σχηματίζονται σε πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες από ότι στο έδαφος.

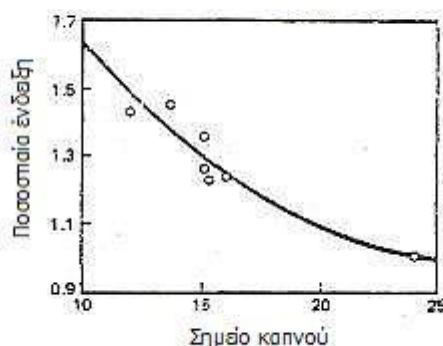
#### **3.4.ε. ΤΑΣΗ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΑΙΘΑΛΗΣ-ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΠΝΟΥ**

Πιθανώς η πιο διαδεδομένη ένδειξη για το σχηματισμό αιθάλης είναι το σημείο καπνού. Αυτό ορίζεται με την καύση του καυσίμου σε ειδικό διαφανές δοχείο, αυξάνοντας σιγά-σιγά το ύψος της φλόγας, μέχρι την εμφάνιση καπνού. Το μέγιστο ύψος της άκαπνης φλόγας σε mm είναι το σημείο καπνού. Όσο υψηλότερο είναι τόσο μικρότερη είναι και η τάση του καυσίμου στο σχηματισμό αιθάλης. Για πολλά αεροπορικά καύσιμα το ύψος της άκαπνης φλόγας απαιτείται να μην είναι μικρότερο από 20 mm.

Παρά το γεγονός ότι το σημείο καπνού δεν είναι βασική ιδιότητα του καυσίμου, μας δίνει ικανοποιητική ένδειξη για την πιθανότητα σχηματισμού αιθάλης. Διάφοροι ερευνητές χρησιμοποιώντας ένα θάλαμο καύσης υψηλής πίεσης, που λειτουργούσε υπό διάφορες συνθήκες εισόδου, προσπάθησαν να προσδιορίσουν την επίδραση της μοριακής δομής του καυσίμου στο σχηματισμό της αιθάλης. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν μία σχέση της ακτινοβολίας της φλόγας με το σημείο καπνού, όπως φαίνεται στο σχ. 3.6. Ο συντελεστής R ορίζεται ως :

$R = \text{ακτινοβολία φλόγας του εξεταζόμενου καυσίμου} / \text{ακτινοβολία φλόγας καυσίμου αναφοράς, όπου το καύσιμο αναφοράς είναι το Jet A.}$

Πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα καύσιμα του πειράματος είχαν τεχνητά την ίδια περιεκτικότητα σε υδρογόνο ατμοί στην δεξαμενή καυσίμου.



### 3.6. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΚΑΠΝΟΥ ΤΗΣ ΚΑΤΑ ΜΕΣΟ ΟΡΟ ΕΝΔΕΙΞΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΦΛΟΓΑΣ

### **3.5. ΚΑΥΣΙΜΑ ΣΕ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΟΥΣ ΑΕΡΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ**

Στην επιλογή των καυσίμων για τους αεροπορικούς αεροκινητήρες πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη οι μεγάλες μεταβολές θερμοκρασίας και πίεσης τις οποίες υπόκειται το καύσιμο. Σε ύψος 12 km η ατμοσφαιρική πίεση του αέρα είναι μόλις το 1 /4 της πίεσης στο επίπεδο της θάλασσας. Κάτω από ιδανικές συνθήκες οι θερμοκρασίες του αέρα, σε μεγάλα υψόμετρα, μπορεί να είναι κάτω από τους-193 K ενώ αντίθετα μπορεί να επιτευχθούν μεγάλες θερμοκρασίες όταν το αεροσκάφος εκτίθεται στο έδαφος σε τροπικό ήλιο ή πετά με υπερηχητικές ταχύτητες.

#### **3.5.α. ΕΚΛΥΣΗ ΑΕΡΑ**

Όλοι οι υδρογονάνθρακες περιέχουν διαλυμένο αέρα. Το ποσό του διαλυμένου αέρα στο καύσιμο είναι ανάλογο της μερικής πίεσης του αέρα, δηλαδή της ατμοσφαιρικής πίεσης μείον της πίεσης των ατμών του καυσίμου. Έτσι όταν ένα αεροσκάφος κερδίζει ύψος, ο διαλυμένος στο καύσιμο αέρας αρχίζει να απελευθερώνεται και μπορεί να διαφύγει από τις οδούς εξαέρωσης της δεξαμενής, μαζί με τους ατμούς του καυσίμου. Για την κηροζίνη το ποσό που χάνεται με αυτό τον τρόπο είναι πολύ μικρό και μπορεί να αμεληθεί. Ακόμη περισσότερο στα σύγχρονα συστήματα αεροσκαφών, οι αντλίες σχεδιάζονται έτσι ώστε να εξασφαλίζουν ότι ο αέρας παραμένει στις δεξαμενές και όχι στο σύστημα καυσίμου προκαλώντας "αποκλεισμό των ατμών του καυσίμου". Σε μερικές περιπτώσεις όμως το καύσιμο μπορεί να γίνει υπερκορεσμένο με αέρα και η περίσσεια του αέρα μπορεί να αποβληθεί ξαφνικά, όταν το καύσιμο βρεθεί σε τυρβώδεις συνθήκες όπως π.χ. όταν μπει σε λειτουργία η αντλία καυσίμου.

### **3.5.β. ΒΡΑΣΜΟΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

Εάν το ύψος του αεροσκάφους αυξάνεται διαρκώς, σε κάποιο σημείο η τάση ατμών του καυσίμου θα γίνει ίση με την ατμοσφαιρική και το καύσιμο θα αρχίζει να βράζει. Μέχρι αυτό το σημείο οι απώλειες του καυσίμου, εξαιτίας της εξαέρωσης, είναι αμελητέες αλλά μετά την εμφάνιση του Βρασμού οι απώλειες αυτές είναι υπολογίσιμες. Έτσι ένα αεροσκάφος χρησιμοποιεί βενζίνη σε ένα ύψος 12 km, μπορεί εύκολα να χάσει το 10% από το φορτίο καυσίμου εξαιτίας της εξαέρωσης. Άλλο ένα πρόβλημα, που προκύπτει από την εμφάνιση του βρασμού, είναι ότι οι σχηματιζόμενοι ατμοί στο σύστημα καυσίμου μπορεί να διακόψουν την παροχή του καυσίμου.

Είναι λοιπόν προφανές ότι για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες λόγω εξαέρωσης και για να αποφευχθεί ο αποκλεισμός των ατμών του καυσίμου, είναι επιθυμητό να χρησιμοποιηθούν καύσιμα με χαμηλή τάση ατμών. Η άλλη εναλλακτική λύση είναι η συμπίεση των δεξαμενών καυσίμου, όπως συμβαίνει στα περισσότερα πολιτικά αεροσκάφη.

### **3.5.γ. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ**

Έχουμε ήδη αναφέρει τον κίνδυνο παγοποίησης του καυσίμου σε θερμοκρασίες μικρότερες των 273 K και το σχηματισμό κερώνων κρυστάλλων στο σημείο παγοποίησης του καυσίμου. Το κύριο πρόβλημα που προκύπτει από το σχηματισμό αυτών των δύο μορφών κρυστάλλων είναι η έμφραξη των φίλτρων καυσίμου. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί σε κάποιο βαθμό με τη σωστή επιλογή των υλικών του φίλτρου. Μία άλλη προσέγγιση του προβλήματος της έμφραξης των φίλτρων από τον πάγο, είναι η πρόληψη του σχηματισμού των κρυστάλλων του πάγου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την εισαγωγή ενός αντιπαγωτικού πρόσθετου στο καύσιμο, έτσι ώστε το σημείο παγοποίησης του διαχωρισμένου νερού να πέσει κάτω από τη χαμηλότερη θερμοκρασία του καυσίμου, που επιτυγχάνεται στην πτήση.

### **3.5.δ. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ**

Κατά τη διάρκεια της πτήσης με υπερηχητική ταχύτητα, το υγρό καύσιμο στη δεξαμενή γίνεται αποδέκτης μιας σταθερής αύξησης της θερμοκρασίας, αφού η κινητική θερμότητα απάγεται από τη δομή του αεροσκάφους στο συνεχώς μειούμενο όγκο του καυσίμου. Στις άλλες πηγές θερμότητας περιλαμβάνονται οι εναλλάκτες θερμότητας για τη λίπανση του κινητήρα με υδραυλικό υγρό ή λάδι αλλά και η αντλία καυσίμου. Σαν συνέπεια η θερμοκρασία εισόδου στο θάλαμο καύσης του καυσίμου μπορεί να πλησιάζει τους 473 έως τους 533 K, με ταχύτητες πτήσης από 2.2 έως 3.0 Mach αντίστοιχα. Όταν η ροή του καυσίμου μειώνεται, στην αρχή της κατάβασης, μια σταθερή αύξηση στη θερμοκρασία του καυσίμου εμφανίζεται στο σύστημα καυσίμου ως αποτέλεσμα της μετάδοσης θερμότητας στους κινητήρες.

Το βασικό πρόβλημα με την αύξηση της θερμοκρασίας είναι η δημιουργία σταθερών, διαλυτών

ενώσεων στα φίλτρα και στα ακροφύσια του καυσίμου. Η παραφινική κηροζίνη, που αποστάζεται συνήθως για χρήση στα Jet, είναι σχετικά σταθερό υλικό αλλά τα ίχνη από τα μη υδρογονανθρακικά συστατικά, στο καύσιμο, μπορεί να είναι λιγότερο ευσταθή και να βοηθήσουν στη δημιουργία μικρών σωματιδίων. Επίσης κάποιες αρωματικές ενώσεις και ενώσεις με υψηλό σημείο βρασμού τείνουν να είναι λιγότερο ευσταθείς, με αποτέλεσμα η μελλοντική χρήση αρωματικών καυσίμων να φέρει στην επιφάνεια όλα τα αντίστοιχα προβλήματα. Εάν οι αρωματικές ενώσεις αυξηθούν πάνω από το 35%, θα πρέπει να γίνει επανασχεδιασμός του κινητήρα του αεροσκάφους καθώς και του συστήματος ελέγχου καυσίμου.

### **3.5.ε. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΠΑ ΤΑ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ**

Οι προδιαγραφές καυσίμων για τους αεροπορικούς κινητήρες είναι πολύ πιο αυστηρές από αυτές για τους άλλους τύπους αεροκινητήρων. Οι βασικές απαιτήσεις που οφείλονται στο αεροσκάφος, στο σύστημα καυσίμου και στο θάλαμο καύσης περιγράφονται παρακάτω:

#### **3.5.ε.1. ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ**

Για χρήση πάνω σε αεροσκάφη γενικά τα καύσιμα πρέπει να πληρούν τις παρακάτω προϋποθέσεις:

1. Χαμηλό κόστος και υψηλή διαθεσιμότητα.
2. Μικρό κίνδυνο πυρκαγιάς. Αυτό απαιτεί χαμηλή τάση ατμών, μικρή πτητικότητα, υψηλό σημείο ανάφλεξης και μεγάλη αγωγιμότητα προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η συγκέντρωση του στατικού ηλεκτρισμού κατά την πλήρωση με καύσιμο.
3. Μεγάλη δυνατότητα απορρόφησης θερμότητας για μέγιστη εμβέλεια ή/ και μέγιστο φορτίο.
4. Μεγάλη θερμική ευστάθεια έτσι ώστε να αποφευχθεί η έμφραξη των φίλτρων ή των βαλβίδων ελέγχου.
5. Χαμηλή τάση ατμών για την ελαχιστοποίηση απωλειών λόγω εξαέρωσης σε μεγάλα ύψη.
6. Μεγάλη ειδική θερμότητα για να παρέχει αποτελεσματική απορρόφηση θερμότητας στα αεροσκάφη μεγάλης ταχύτητας.

#### **3.5.ε.2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

Για καλή λειτουργία του συστήματος καυσίμου το καύσιμο θα πρέπει να πληροί τα παρακάτω:

1. Αντλησιμότητα. Αυτό σημαίνει ότι το καύσιμο πρέπει να παραμένει υγρό και να ρέει εύκολα προς τον ψεκαστή. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται μικρό ιξώδες.
2. Απουσία της έμφραξης των φίλτρων από κρυστάλλους πάγου είτε κηρώδης κρυστάλλους. Η απουσία σχηματισμού πάγου επιτυγχάνεται με τη χρήση πρόσθετων ή με τη θέρμανση του καυσίμου.
3. Απουσία του "περιορισμού των ατμών του καυσίμου". Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση καυσίμου με χαμηλή τάση ατμών.

Υψηλή λιπανσιμότητα για ελάχιστο φόρτο αντλίας. Αυτό επιτυγχάνεται με την παρουσία ή προσθήκη πολύ πολικών συστατικών.

### **3.5.ε.3. ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΑΥΣΗΣ**

Ο θάλαμος καύσης θέτει τις παρακάτω απαιτήσεις για τα αεροπορικά καύσιμα:

1. Απουσία ιζημάτων που προκαλούν έμφραξη των μικρών περασμάτων στους αναβλυστήρες καυσίμου.
2. Καλό ψεκασμό. Η ποιότητα ψεκασμού κατά κύριο λόγο επηρεάζεται από το ιξώδες.
3. Γρήγορη εξαέρωση. Οι ρυθμοί της εξαρτώνται από την πτητικότητα του καυσίμου και την ποιότητα ψεκασμού, οι οποίες ορίζουν την μετωπική επιφάνεια του ψεκασμένου καυσίμου. Μέγιστοι ρυθμοί εξαέρωσης επιτυγχάνονται με καύσιμα χαμηλού ιξώδους και υψηλής πτητικότητας.
4. Ελάχιστος σχηματισμός άνθρακα για χαμηλή ακτινοβολία φλόγας και απουσία ανθρακοειδών επικαθήσεων καθώς και εκπομπής καπνού.

Με τις σημερινές τεχνολογικές εξελίξεις και δυνατότητες οι σχεδιαζόμενοι θάλαμοι καύσης έχουν απόδοση και χαρακτηριστικά λειτουργίας που δεν εξαρτώνται από το είδος του καυσίμου. Πιθανόν η μοναδική κατάσταση πτήσης στην οποία παίζουν σημαντικό ρόλο οι ιδιότητες του καυσίμου είναι η επανεκκίνηση μετά από κράτηση κινητήρα σε μεγάλο ύψος. Σε αυτή την περίπτωση όπου η ποιότητα ψεκασμού είναι πολύ κακή, το χαμηλό ιξώδες σε συνδυασμό με την υψηλή πτητικότητα βοηθούν στην επίτευξη ανάφλεξης και στη βελτίωση του επιπέδου καύσης. Η σημερινή γενιά των κινητήρων turbojet είναι αποτέλεσμα 30 χρόνων έρευνας και ανάπτυξης κατά τη διάρκεια των οποίων οι σχεδιαστές είχαν την ευκαιρία να θέσουν αρκετά αυστηρές προδιαγραφές καυσίμων αλλά και οι βιομηχανίες παραγωγής πετρελαίου είχαν τη δυνατότητα να ανταποκριθούν σε αυτές. Όμως με τη σημερινή διακύμανση των τιμών αλλά και τη γρήγορη εξάντληση των αποθεμάτων πετρελαίου είναι σχεδόν βέβαιο ότι η αεροπορική βιομηχανία θα κληθεί να αποδεχτεί κάποια διεύρυνση των αυστηρών περιορισμών που έχει θέσει στη χρήση των καυσίμων.

### **3.5.στ. ΑΣΦΑΛΗ ΚΑΥΣΙΜΑ**

Ένα από τα ατυχέστερα συμβάντα στην αεροπορία είναι η πιθανότητα πυρκαγιάς μετά από ανώμαλη προσγείωση. Το καύσιμο που διαφεύγει από τις κατεστραμμένες δεξαμενές μπορεί να αναφλέγει από σπινθήρες τριβής, καυτές επιφάνειες ή φλόγες. Αφού πιάσει φωτιά θα διαδοθεί πολύ γρήγορα σε όλες τις περιοχές όπου ο λόγος καυσίμου/ αέρα έχει τιμές μέσα στα όρια αναφλεξιμότητας. Μια μέθοδος για τη μείωση της πιθανότητας εκδήλωσης πυρκαγιάς είναι η χρήση "παχών" καυσίμων, τα οποία έχουν μειωμένη ικανότητα ροής και μικρότερο βαθμό εξαέρωσης από τα υγρά καύσιμα. Αν μια δεξαμενή, που περιέχει τέτοιο καύσιμο καταστραφεί, η διασπορά του καυσίμου αλλά και ο ρυθμός σχηματισμού του εύφλεκτου μείγματος μειώνονται

δραματικά με συνέπεια περισσότερος χρόνος να είναι διαθέσιμος για την περισυλλογή και διάσωση των επιβατών.

"Παχέα" καύσιμα μπορούν να παραχθούν με γαλακτοποίηση. Ένα γαλάκτωμα σχηματίζεται όταν ένα υγρό διασκορπιστεί με τη μορφή μικρών σταγονιδίων μέσα σε ένα άλλο. Τα γαλακτικά καύσιμα συνήθως περιέχουν 97% υδρογονανθρακικά καύσιμα. Σε αυτά η συνεχής φάση αποτελείται από περίπου 1.5% νερό, γλυκόλη ή φορμαλδεΐδη με το γαλακτοποιητή να αποτελεί το υπόλοιπο.

Υπάρχουν ορισμένες αμφιβολίες γύρω από το γεγονός εάν ένα "παχύ" καύσιμο διατηρεί την κατάσταση του, σε συνθήκες κρούσης, τότε ο ρυθμός διάδοσης της φλόγας είναι πολύ μικρότερος από αυτόν για υγρά καύσιμα. Πειράματα έδειξαν ότι το σύστημα καυσίμου έκανε χρήση τέτοιων καυσίμων χωρίς υπερβολική δυσκολία αλλά αντιμετωπίστηκαν προβλήματα στην ευστάθεια αποθήκευσης, στην πλήρωση των δεξαμενών και στην κυκλοφορία του αέρα στα μεγάλα ύψη. Για αυτό και η χρήση στα αεροσκάφη δεν είναι τόσο πρακτική.

### **3.6. ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ**

Άλλα ορυκτά κοιτάσματα που μπορούν να επεξεργασθούν για να παραχθούν υγροί και αέριοι υδρογονάνθρακες είναι τα πησώδη, το σχιστολιθικό πετρέλαιο και οι γαιάνθρακες. Αυτά κυμαίνονται από υλικά υψηλής ποιότητας, τα οποία απαιτούν μόνο τυπική απόσταση, έως τα χαμηλά κλάσματα καυσίμου, που παράγονται μετά από συνεχή απόσταση.

#### **3.6.α. ΠΙΣΣΩΔΗ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ**

Η πίσσα συνήθως εμφανίζεται στο υπέδαφος της γης αλλά δεν είναι άμεσα και εύκολα προσβάσιμη λόγω της ανάμειξης της με πέτρες και χώμα. Από πειράματα όμως που έχουν γίνει, έχει διαπιστωθεί ότι μετά από κατάλληλη επεξεργασία, στα πησώδη κοιτάσματα, τα καύσιμα που προκύπτουν εμφανίζουν τα ίδια χαρακτηριστικά καύσης με το υψηλής ποιότητας καύσιμο JP 5.

#### **3.6.8. ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ (ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΙ)**

Όταν οι σχιστόλιθοι αυτοί θερμανθούν τα ρητινώδη συστατικά τους μετατρέπονται σε ένα ελαιώδες υγρό από το οποίο μπορεί να εξαχθεί αργό πετρέλαιο. Η απόσταση που ακολουθεί, μειώνει την περιεκτικότητα σε άζωτο, οξυγόνο και θείο και μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή ενός προϊόντος πανομοιότυπου με το καύσιμο Jet A, αλλά με μεγάλη περιεκτικότητα σε αρωματικές ενώσεις. Τα πειράματα καύσης πάντως, που πραγματοποιήθηκαν με αυτά τα καύσιμα, έδειξαν αυξημένες εκπομπές οξειδίου του αζώτου εξαιτίας της μεγάλης περιεκτικότητας των σχιστόλιθων σε άζωτο.

### **3.6.γ. ΚΑΥΣΙΜΟ ΑΠΟ ΓΑΙΑΝΘΡΑΚΕΣ**

Πολλές διαδικασίες είναι ικανές και γνωστές σήμερα ώστε να παραχθούν υδρογονάνθρακες από γαιάνθρακες. Ο κοινός στόχος είναι η παραγωγή ενός αποδεκτού καυσίμου, με την προσθήκη υδρογόνου στο γαιάνθρακα και την αφαίρεση του αζώτου, του θείου και των άλλων ανεπιθύμητων στοιχείων. Όλες αυτές οι διεργασίες έχουν όμως μεγάλο κόστος.

Τα πειράματα που έγιναν για την πιστοποίηση των καυσίμων αυτών, δεν ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά αφού τα εναλλακτικά καύσιμα δεν κατόρθωσαν να πληρώσουν τις υπάρχουσες προδιαγραφές. Η θερμική ευστάθεια ήταν μικρή, η θερμότητα καύσης οριακή, η πυκνότητα υψηλή και το σημείο καπνού πολύ χαμηλό.

### **3.7. ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ**

Με τον όρο "συνθετικά" περιγράφουμε τα καύσιμα που παράγονται από πηγές άλλες εκτός πετρελαίου.

#### **3.7.α. ΥΔΡΟΓΟΝΟ**

Από την πλευρά της καύσης το υδρογόνο είναι η ιδανική λύση για τη χρήση. Χαρακτηρίζεται από μεγάλες ταχύτητες φλόγας, μεγάλα όρια καύσης, εύκολη ανάφλεξη και έλλειψη σχηματισμού αιθάλης. Επιπλέον το υγρό υδρογόνο έχει δυνατότητα ψύξης ανώτερη από κάθε άλλο καύσιμο. Τα κύρια μειονεκτήματα είναι η μικρή πυκνότητα και το χαμηλό σημείο βρασμού γεγονός που απαιτεί μειωμένες δεξαμενές καυσίμου στο αεροσκάφος.

#### **3.7.β. ΜΕΘΑΝΙΟ**

Το υγρό μεθάνιο έχει μια ειδική ενέργεια της τάξης 49 MJ/Kgr ενώ η κηροζίνη 42.8 MJ/kg. Η ικανότητα ψύξης δεν είναι τόσο καλή όσο του υδρογόνου αλλά αρκετά μεγάλη, εξαιτίας της πολύ χαμηλής θερμοκρασίας υγροποίησης του αερίου. Αυτή η χαμηλή θερμοκρασία επιτρέπει την ψύξη στα υπερηχητικά αεροσκάφη. Άλλα πλεονεκτήματα είναι η καλή θερμική ευστάθεια και η καθαρή καύση. Τα βασικά προβλήματα που προκύπτουν από τη χρήση του μεθανίου έχουν ως αιτία τη χαμηλή πυκνότητα και το χαμηλό σημείο βρασμού. Το μεθάνιο απαιτεί 70% περισσότερο χώρο αποθήκευσης από την κηροζίνη αλλά σημαντικά περισσότερο χώρο από το υδρογόνο. Άλλα προβλήματα εμφανίζονταν λόγω της υγρασίας της ατμόσφαιρας που οδηγεί στη δημιουργία πάγου και της απώλειας λόγω βρασμού του καυσίμου στην άνοδο

### **3.7.γ. ΠΡΟΠΑΝΙΟ**

Το προπάνιο έχει παρεμφερή χαρακτηριστικό με το μεθάνιο, και όπου χρησιμοποιείται το τελευταίο ερευνάται και η πιθανή χρήση του προπανίου. Συγκρινόμενο με το μεθάνιο έχει χαμηλότερη ειδική ενέργεια και μικρότερη ικανότητα ψύξης. Όμως το υψηλότερο σημείο βρασμού υπαγορεύει ευκολία χρήσης. Συγκεκριμένα μπορεί ν' αποθηκευθεί ως υγρό σε ατμοσφαιρική θερμοκρασία υπό πίεση στις δεξαμενές καυσίμου. Ωστόσο εντοπίζονται κάποια προβλήματα στην άμεση διαθεσιμότητα του.

### **3.7.5. ΑΜΜΩΝΙΑ**

Η αμμωνία έχει μικρή θερμότητα καύσης, μόνο 40% της κηροζίνης, και το ενδιαφέρον της εφαρμογής της εντοπίζεται μόνο στη χρήση της ως δεξαμενής απορρόφησης θερμότητας. Εξαιτίας της μικρής απόδοσης θερμότητας δεν χρησιμοποιείται στα αεροσκάφη ως το κύριο καύσιμο αλλά ως δευτερεύον, σε περιπτώσεις όπου μπορεί να εκμεταλλευθεί η μεγάλη ικανότητα ψύξης. Όπως το προπάνιο αποθηκεύεται στο έδαφος σαν πεπιεσμένο υγρό, σε ατμοσφαιρική θερμοκρασία.

### **3.7.5. ΑΛΚΟΟΛΕΣ**

Οι αλκοόλες δεν έχουν πρακτική χρήση στα αεροσκάφη μεγάλης εμβέλειας εξαιτίας της μεγάλης περιεκτικότητας σε οξυγόνο και κατά συνέπεια της μικρής θερμικής αξίας. Οι ελαφρές αλκοόλες θεωρούνται πιο ασφαλής στη χρήση από τη βενζίνη, εξαιτίας και του υψηλότερου σημείου ανάφλεξης και του γεγονότος ότι η καύση των αλκοολών μπορεί να σταματήσει με νερό. Όμως είναι διαβρωτικές, για ορισμένα μέταλλα, για αυτό πρέπει να παρθούν ειδικές προφυλάξεις.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

## ΕΓΧΥΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

#### **4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Σχεδόν όλα τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στους αεροκινητήρες είναι υγρά που πρέπει να ψεκαστούν πριν εγχυθούν στη ζώνη καύσης. Ψεκασμός είναι η διαδικασία στην οποία ένας όγκος υγρού μετατρέπεται σε πλήθος από μικρά σταγονίδια. Ο βασικός στόχος είναι η παραγωγή ενός μεγάλου λόγου επιφάνειας προς μάζα στην υγρή φάση, που θα έχει επίδραση στους ρυθμούς εξαέρωσης. Ευτυχώς ο ψεκασμός είναι αρκετά εύκολος να επιτευχθεί. Για τα περισσότερα υγρά αυτό που απαιτείται είναι μια υψηλή σχετικά ταχύτητα του υγρού που πρόκειται να ψεκασθεί και του αέρα ή αερίου που το περιβάλλει. Κάποιοι ψεκαστές το επιτυγχάνουν αυτό με την εκτόνωση υγρού με μεγάλη ταχύτητα μέσα σε μία σχετικά αργή ροή αέρα ή αερίου. Αξιοσημείωτα παραδείγματα είναι οι ψεκαστές πίεσης και οι περιστροφικοί ψεκαστές, οι οποίοι εγχύουν το υγρό από την περιφέρεια ενός περιστρεφόμενου δοχείου ή δίσκου. Μια εναλλακτική προσέγγιση στο θέμα γίνεται με την έκθεση ενός σχετικά αργά κινούμενου υγρού σε ταχέως κινούμενο ρεύμα αέρα. Αυτή η μέθοδος είναι γνωστή ως δίδυμη ροής ή αεροβοηθούμενη ή ψεκασμός με ριπή αέρα.

Η διαδικασία της έγχυσης παίζει μείζονα ρόλο σε πολλούς παράγοντες της απόδοσης καύσης. Ιδιαίτερη σημασία θα πρέπει να δοθεί και στο μέλλον αφού οι κινητήρες υπόκεινται συνεχώς σε αυστηρούς κανόνες για τις εκπομπές και καλούνται να κάψουν όλο μεγαλύτερο μέρος από συνθετικά καύσιμα αλλά και βαριά κλάσματα πετρελαίου. Η ζήτηση εγχυτήρων καυσίμου που θα έχουν τη δυνατότητα χρήσης πολλών καυσίμων θα αυξηθεί σημαντικά στο μέλλον.

Για να αντεπεξέλθουν σε αυτές τις μεταβαλλόμενες ανάγκες οι σχεδιαστές θαλάμων καύσης πρέπει να κατανοήσουν σε βάθος όλη τη διαδικασία του ψεκασμού και να δωρίζουν όλες τις δυνατότητες και τους περιορισμούς όλων των συνεργαζόμενων μερών.

#### **4.2. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΕΓΧΥΤΗΡΩΝ**

Ένας ιδανικός εγχυτήρας καυσίμου πρέπει να πληρεί τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

1. Καλό ψεκασμό για όλες τις ροές καυσίμου.
2. Γρήγορες αποκρίσεις στις μεταβολές της ισχύος.
3. Έλλειψη από αστάθειες ροής.
4. Μικρή πιθανότητα έμφραξης από επικαθίσεις και σχηματισμό άνθρακα στην επιφάνεια του ακροφυσίου του εγχυτήρα.
5. Μικρή πιθανότητα σχηματισμού κolloειδών ουσιών από τη μετάδοση θερμότητας.
6. Δυνατότητα μικρού μεγέθους.
7. Μικρό κόστος, ελαφρύς, εύκολος να επιδιορθωθεί και εύκολα να αφαιρείται για

συντήρηση.

8. Μικρή πιθανότητα αστοχίας κατά τη διάρκεια της επιδιόρθωσης και εγκατάστασης.

Επίσης θα πρέπει να παρέχει:

1. Εύκολα ανάφλεγομενο μείγμα.
2. Ένα λόγο μέγιστης προς ελάχιστης ροής καυσίμου ο οποίος θα υπερκαλύπτει το λόγο μέγιστης προς ελάχιστης ροής αέρα στο θάλαμο καύσης.
3. Ελεγχόμενη διασπορά του καυσίμου στο χώρο της πρωτογενούς ζώνης.
4. Μια κατανομή της θερμοκρασίας των καυσαερίων στην έξοδο η οποία να είναι ανεξάρτητη των μεταβολών της ροής του καυσίμου.

#### **4.3. Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ**

Στους θαλάμους καύσης των αεροκινητήρων ο ψεκασμός συνήθως επιτυγχάνεται με τη μετατροπή του καυσίμου μέσα σε ένα λεπτό στρώμα έτσι ώστε να επέλθει αστάθεια και να προαχθεί η διάλυση του στρώματος σε σταγονίδια. Τα λεπτά αυτά στρώματα μπορούν να κατασκευαστούν από την εκτόνωση του καυσίμου μέσα από οπές με ειδικά διαμορφωμένες οδούς πρόσβασης, με την εξαναγκασμένη δίοδο μέσα από στενές σχισμές, με τη διασπορά πάνω σε μεταλλικές επιφάνειες ή τέλος με την παροχή του καυσίμου στο κέντρο ενός περιστρεφόμενου δίσκου. Όμως ανεξάρτητα από τον τρόπο επίτευξης του ψεκασμού είτε δηλαδή γίνεται με υδραυλικά, πνευματικά ή μηχανικά μέσα, η λειτουργία του ψεκαστή είναι η μετατροπή του καυσίμου σε λεπτούς πίδακες ή λεπτά στρώματα από τα οποία με τη σειρά τους θα προκύψουν σταγονίδια και τέλος η διασπορά τους στη ζώνη καύσης με ελεγχόμενο τρόπο και κατεύθυνση.

#### **4.4. ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ**

Τα χαρακτηριστικά του ψεκασμού με σημασία στην απόδοση της καύσης είναι το μέσο μέγεθος σταγόνας, η κατανομή του μεγέθους των σταγόνων, η γωνία του κώνου και η διεισδυτικότητα. Ειδική σημασία δίνεται στο μέσο μέγεθος σταγόνας, στη κατανομή του μεγέθους των σταγόνων και στη μορφή του ψεκασμού γιατί εξαρτώνται αποκλειστικά από το σχεδιασμό του ψεκαστή. Η γωνία του κώνου και η διεισδυτικότητα, από την άλλη, εξαρτώνται μερικώς από τον ψεκαστή και μερικώς από τις αεροδυναμικές επιδράσεις στις οποίες υπόκειται το ψεκασμένο καύσιμο.

#### **4.4.α. ΜΕΣΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΣΤΑΓΟΝΑΣ**

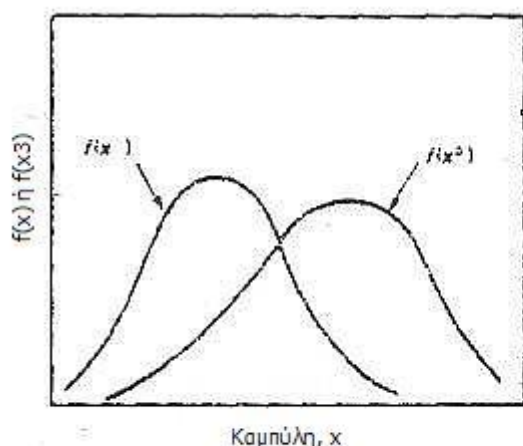
Για τη διευκόλυνση του υπολογισμού των ρυθμών εξαέρωσης και για τη σύγκριση των ποιοτήτων ψεκασμού εισάχθηκε ο όρος Μέση Διάμετρος. Ο ορισμός του διαφέρει ανάλογα με το σκοπό για το οποίο εισάχθηκε, η γενική ιδέα όμως είναι η αντικατάσταση του συγκεκριμένου spray από ένα φανταστικό στο οποίο όλες οι σταγόνες θα έχουν τη ίδια διάμετρο ενώ θα διατηρούν ορισμένα χαρακτηριστικά από το αρχικό spray. Η μέση διάμετρος (SMD) είναι ευρέως διαδεδομένη και ορίζεται ως η διάμετρος μιας σταγόνας που έχει τον ίδιο λόγο όγκου/επιφάνειας όσο το spray δηλαδή  $SMD = \frac{\sum nD^3}{\sum nD^2}$ .

Ακόμα αρκετά συχνά χρησιμοποιείται η Μέση Διάμετρος Μάζας (MMD) η οποία είναι η διάμετρος της σταγόνας κάτω ή πάνω από την οποία βρίσκεται το 50% της μάζας των σταγόνων.

#### **4.4.β. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΣΤΑΓΟΝΙΔΙΩΝ**

Εξαιτίας της ετερογενούς φύσης της διαδικασίας του ψεκασμού οι ψιλές ίνες του καυσίμου, που δημιουργούνται με διάφορους μηχανισμούς διαφορισμού των λεπτών στρωμάτων, καθώς και οι σταγόνες που προκύπτουν διαφέρουν αρκετά σε μέγεθος. Μόνο κάτω από ορισμένες ειδικές συνθήκες (π.χ. λειτουργία περιστρεφόμενου δίσκου- ψεκαστή με συγκεκριμένη ταχύτητα και ροή καυσίμου) μπορεί να παραχθεί ένα αρκετά ομοιογενές spray. Για αυτό συμπληρώνοντας το μέσο μέγεθος σταγόνας εισάγεται άλλη μία παράμετρος, η κατανομή του μεγέθους των σταγονιδίων έτσι ώστε να ορισθεί καλύτερα η μορφή του ψεκασμού. Τα τυπικά μεγέθη των σταγόνων στους σημερινούς αεροκινητήρες κυμαίνονται ανάμεσα σε 10 έως 400 μm.

Η κατανομή του μεγέθους των σταγόνων είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθεί θεωρητικά και να εξεταστεί πειραματικά. Μια αρκετά κατατοπιστική εικόνα μπορεί να παρθεί με το σχεδιασμό ενός ιστογράμματος του μεγέθους των σταγόνων, όπου κάθε τεταγμένη αντιπροσωπεύει τον αριθμό των σταγόνων που κείται ανάμεσα στις τιμές  $\chi - \Delta\chi/2$  και  $\chi + \Delta\chi/2$ . Όσο το  $\Delta\chi$  γίνεται μικρότερο το ιστογράμμο παίρνει τη μορφή καμπύλης συχνότητας η οποία μπορεί να αντικατοπτρίζει τα χαρακτηριστικά του ψεκασμού εφόσον τα δεδομένα προέρχονται από αρκετά μεγάλα δείγματα. Π.χ. η καμπύλη 4.1 αναφέρεται ως καμπύλη συχνότητας - κατανομής. Αν η μετωπική επιφάνεια ή ο όγκος, που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη διάμετρο, παρασταθούν σε σχέση με τη διάμετρο, η καμπύλη κατανομής θα είχε τέτοια κλίση όπως αυτή που φαίνεται στο σχήμα λόγω της επίδρασης του βάρους στις μεγαλύτερες διαμέτρους.

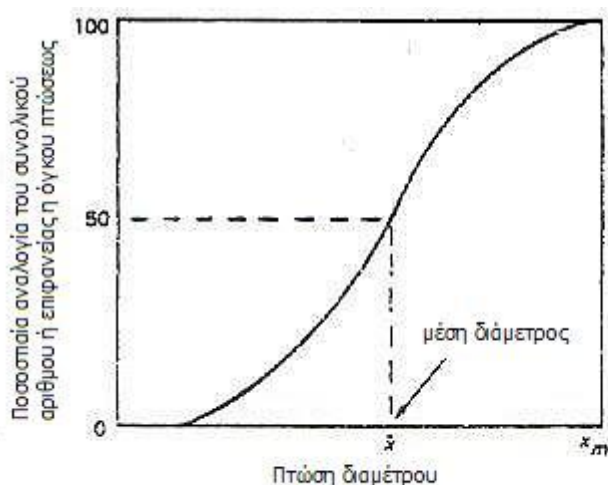


#### 4.1. ΚΑΜΠΥΛΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ – ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟ ΣΕ ΑΡΙΘΜΟΥΣ ΚΑΙ ΠΟΣΟΤΗΤΑ

Οι συντεταγμένες της καμπύλης συχνότητας - κατανομής μπορούν να παραστήσουν το πλήθος των σταγόνων με δεδομένη διάμετρο ή το σχετικό αριθμό ή το ποσοστό του ολικού πλήθους για κάθε τάξη μεγέθους. Αν η τεταγμένη εκφράζεται με το τελευταίο αυτό τρόπο η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη πρέπει να είναι ίση με τη μονάδα.

Ακόμα περισσότερο κατατοπιστική είναι η αναπαράσταση με τη μέθοδο της αθροιστικής κατανομής. Βασικά είναι η παράσταση του ολοκληρώματος της καμπύλης συχνότητας και μπορεί να αναπαρασταθεί με το % του πλήθους των σταγόνων κάτω από ορισμένο μέγεθος ή μπορεί να εκφραστεί με το % της ολικής επιφάνειας ή όγκου ενός spray που περιέχει σταγόνες μικρότερες από ένα συγκεκριμένο μέγεθος. Οι καμπύλες κατανομής αθροίσματος παριστάνονται σε αριθμητικές συντεταγμένες που έχουν γενικό σχήμα όπως αυτό που φαίνεται στο σχ. 4.2. Η τεταγμένη μπορεί να είναι το % των σταγόνων με πλήθος, επιφάνεια ή όγκο που αντιστοιχεί σε διάμετρο μικρότερη από μια δεδομένη διάμετρο  $\chi$ . Όπως αναμενόταν ένα spray έχει ένα πεπερασμένο μέγιστο μέγεθος σταγόνας και έτσι η καμπύλη 4.2 τέμνει την τεταγμένη του 100% στο μέγιστο μέγεθος  $\chi$ . Επιπλέον, διαμέτροι σταγόνων κάτω από το μηδέν είναι αδύνατο να επιτευχθούν έτσι η κατανομή δεν μπορεί να επεκταθεί κάτω από το μηδέν.

Επειδή οι γραφικές παραστάσεις της κατανομής του μεγέθους των σταγόνων είναι πολύ δύσκολο να γίνουν, έχουν γίνει προσπάθειες για διατύπωση μαθηματικών μοντέλων των οποίων οι παράμετροι μπορούν να προσδιορισθούν από ένα περιορισμένο αριθμό μετρήσεων του μεγέθους των σταγόνων. Για παράδειγμα  $dU/dx = ax^p \exp(-bx)^q$  όπου  $a, b, x, p$  είναι 4 ανεξάρτητες μεταβλητές και  $u$  το ποσοστό του όγκου του υγρού που περιέχει σταγόνες διαμέτρου μικρότερες του  $\chi$ .



#### 4.2. ΤΥΠΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΤΗΣ ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗΣ ΠΤΩΣΗΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Μετά από συλλογή και μελέτη των μαθηματικών προτύπων η βασική διατύπωση φαίνεται ότι ήταν ότι η κατανομή του μεγέθους των σταγόνων θα πρέπει να γίνεται σε κάθε περίπτωση από τη βέλτιστη διαθέσιμη εμπειρική μέθοδο. Μέχρι η διαδικασία του ψεκασμού προσδιοριστεί από μία ή περισσότερες εξισώσεις κατανομής δεν υπάρχει σωστή ή λάθος κατανομή. Πιθανόν οι καλύτεροι λόγοι για την επιλογή μιας συγκεκριμένης συνάρτησης να είναι:

1. Η μαθηματική απλότητα.
2. Ο εύκολος χειρισμός για υπολογισμούς.
3. Συνέπεια με τα εμπλεκόμενα φυσικά φαινόμενα.

#### **4.4.v. ΜΟΡΦΗ ΨΕΚΑΣΜΟΥ**

Η ομοιομορφία της κυκλικής κατανομής του καυσίμου στο κωνικό spray γενικά ορίζεται ως μορφή ψεκασμού. Κακή ποιότητα στη μορφή αυτή, επιδρά με πολλούς τρόπους αρνητικά στην απόδοση καύσης και συγκεκριμένα με αυξημένες εκπομπές ρύπων, με τη δημιουργία περιοχών μείγματος στην πρωτογενή ζώνη καύσης όπου αυτό άλλοτε είναι πολύ πλουσιότερο ή φτωχότερο από τον υπολογισμένο λόγο καυσίμου/ αέρα.

#### **4.4.δ. Η ΓΩΝΙΑ ΤΟΥ ΚΩΝΟΥ**

Η γωνία του κώνου έχει πολύ μεγάλη επιρροή στην ανάφλεξη, στα όρια ευστάθειας και στην εκπομπή του καπνού. Με τους ψεκαστές-οπές, η γωνία του κώνου είναι πολύ μικρή και οι σταγόνες είναι ομαλά διασκορπισμένες σε όλον τον όγκο του spray. Τα spray αυτού του τύπου συνήθως

περιγράφονται ως "στερεά". Είναι δυνατό να κατασκευάσουμε στερεούς κώνους με ψεκαστές δινών αλλά σε εφαρμογές αεροκινητήρων το spray έχει τη μορφή ενός κοίλου κώνου, μεγάλης γωνίας, με τις περισσότερες σταγόνες συγκεντρωμένες στην περιφέρεια.

Και στους δύο τύπους ψεκαστών ο πίδακας του καυσίμου ή το λεπτό στρώμα, γρήγορα μετασχηματίζονται σε σταγόνες οι οποίες τείνουν να πάρουν την ίδια κατεύθυνση της κίνησης της κύριας ροής. Ωστόσο εξαιτίας της αντίστασης του αέρα οι πρώτες σταγόνες και αυτές που σχηματίστηκαν στο εξωτερικό, γρήγορα χάνουν την ορμή τους και σχηματίζουν ένα νέφος από καλά ψεκασμένο καύσιμο, αιωρούμενο γύρω από το κύριο σώμα του spray. Η τυχαία αυτή κατανομή εξαρτάται κυρίως από την κίνηση του αέρα και των αερίων προϊόντων της καύσης στη ζώνη καύσης. Επειδή οι επίπεδοι ψεκαστές παράγουν ένα στενό και κοντό spray, στο οποίο μόνο ένα μικρό μέρος των σταγονιδίων υπόκειται στην επίδραση της αντίστασης του αέρα, η κατανομή του εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος και τη διεύθυνση της ταχύτητας εξόδου του καυσίμου από τους ψεκαστές. Με τους δανοψεκαστές, αντίθετα, η κωνική δομή του spray επιφέρει υπολογίσιμη έκθεση στην επίδραση του γύρω ρεύματος του αέρα. Υπό κανονικές συνθήκες αύξηση της γωνίας του κώνου του spray αυξάνει την έκταση της έκθεσης του, που έχει ως αποτέλεσμα καλύτερη ποιότητα ψεκασμού και αύξηση του ποσοστού των σταγόνων των οποίων η κατανομή επιβάλλεται από τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της πρωτογενούς ζώνης. Αυτό αποτελεί και το λόγο για τον οποίο η γωνία του κώνου είναι τόσο σημαντικό στοιχείο για τους δανοψεκαστές.

Όσον αφορά τους air blast ψεκαστές οι σταγόνες καυσίμου βρίσκονται στον αέρα εξαρχής. Για αυτό και η ακολουθούμενη από αυτό τροχιά καθορίζεται από τις κινήσεις του αέρα, που οφείλονται στην αλληλεπίδραση του ψεκαστή και της ροής του κυρίως ρεύματος αέρα.

#### **4.4.ε. ΔΙΑΣΠΟΡΑ**

Η διασπορά ενός καυσίμου μπορεί να εκφραστεί ποσοτικά αν για κάθε χρονική στιγμή ο όγκος του καυσίμου, που βρίσκεται στο χώρο καύσης, είναι γνωστός. Σύμφωνα με ένα ορισμό ο βαθμός διασποράς μπορεί να εκφραστεί ως ο λόγος του όγκου του spray προς τον όγκο του καυσίμου που περιέχεται μέσα σε αυτό.

Το πλεονέκτημα της καλής διασποράς είναι ότι το καύσιμο αναμειγνύεται ταχύτατα με τα γύρω αέρια και έτσι οι ρυθμοί εξαέρωσης και απόδοσης θερμότητας είναι αρκετά υψηλοί. Χρησιμοποιώντας επίπεδους ψεκαστές, με στενή γωνία ψεκασμού, η διασπορά είναι μικρή. Με τους δανοψεκαστές η διασπορά εξαρτάται κυρίως από τη γωνία του κώνου, το μέσο μέγεθος των σταγόνων και την κατανομή του μεγέθους των σταγόνων. Γενικά οι παράγοντες που αυξάνουν τη γωνία του κώνου του spray, τείνουν να βελτιώσουν και τη διασπορά του.

#### **4.4.στ. ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΟΤΗΤΑ**

Η διεισδυτικότητα ενός spray ορίζεται ως η μέγιστη απόσταση που διανύει όταν εγχύεται σε σταματημένο αέρα. Η διεισδυτικότητα εξαρτάται από τα σχετικά μεγέθη δύο αντιθέτων δυνάμεων: α) της κινητικής ενέργειας του αρχικού πίδακα του καυσίμου και β) την αεροδυναμική αντίσταση του περιβάλλοντος αερίου. Η αρχική ταχύτητα του καυσίμου είναι υψηλή αλλά όσο προχωρά ο ψεκασμός και η μετωπική επιφάνεια του spray αυξάνει, η κινητική ενεργεί σταδιακά μειώνεται εξαιτίας των τριβών. Όταν οι σταγόνες εξαντλήσουν την κινητική τους ενέργεια, η τροχιά τους θα προσδιοριστεί από τη βαρύτητα και την κίνηση του περιβάλλοντος αερίου.

Γενικά ένα κοντό και στενό spray θα έχει μεγάλη διεισδυτικότητα ενώ ένα καλής ποιότητας ψεκασμού spray, με μεγάλη γωνία κώνου, αντιμετωπίζει μεγάλη αντίσταση από τον αέρα, με συνέπεια μικρότερη διεισδυτικότητα. Σε όλες όμως τις περιπτώσεις η διεισδυτικότητα ενός spray είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή μιας μοναδικής σταγόνας. Αυτό συμβαίνει γιατί οι πρώτες σταγόνες, που σχηματίζονται μεταφέρουν την ενέργεια τους στο γύρω αέριο, το οποίο αρχίζει και κινείται στη διεύθυνση του spray. Το αέριο τότε εμφανίζει μικρότερη αντίσταση στις επόμενες σταγόνες οι οποίες διεισδύουν περισσότερο.

#### **4.5. ΕΠΙΠΕΔΟΙ ΨΕΚΑΣΤΕΣ**

Ο ψεκασμός ενός υγρού καυσίμου είναι αρκετά εύκολος να επιτευχθεί. Για παράδειγμα εάν ανοίξουμε μια οπή στα τοιχώματα ενός σωλήνα που περιέχει κηροζίνη και εάν η πίεση του καυσίμου ξεπερνά την ατμοσφαιρική κατά 100 KPa τότε το καύσιμο θα διαφύγει από την οπή με τη μορφή ενός πολύ καλά ψεκασμένου spray. Οι εγχυτήρες καυσίμου που χρησιμοποιούν αυτή τη μέθοδο καλούνται επίπεδοι ψεκαστές. Όμως αυτό το είδος δε χρησιμοποιείται ευρέως στους αεροπορικούς θαλάμους καύσης. Ωστόσο χρησιμοποιούνται στα συστήματα μετάκαυσης όπου το σύστημα έγχυσης καυσίμου αποτελείται από μία ή περισσότερες σωλήνες συγκροτούμενους από στυλίδια, μέσα στον κύριο αγωγό αερίων. Το καύσιμο πληρώνει τις σωλήνες μέσω ειδικών Βαλβίδων και οδών, που βρίσκονται στα στυλίδια και ψεκάζεται στη ζώνη-της φλόγας μέσω οπών που είναι τοποθετημένες πάνω στις σωλήνες. Ο αντικειμενικός σκοπός αυτής της διάταξης είναι η επίτευξη καλής κατανομής ψεκασμένου καυσίμου, μέσα στο ποσοστό των αερίων που διέρχεται από τη ζώνη καύσης.

Για κάθε δεδομένη ροή, μεγάλο πλήθος από μικρές οπές παρέχει ξεκάθαρα πιο ομοιόμορφη κατανομή από τη διάταξη με μικρό πλήθος μεγάλων οπών. Όμως επειδή πάντα υπάρχει ο κίνδυνος έμφραξης, η διάμετρος οπής ίση με 0.5 mm συνήθως θεωρείται ως το ελάχιστο μέγεθος.

Η παροχή μάζας ενός επίπεδου ψεκαστή δίνεται από τη σχέση:



$$M_L = 35.1 C_D d_o^2 (SG \Delta P_L)^{0.5}$$

όπου  $C_D$  ο συντελεστής εκροής που εξαρτάται κυρίως από το λόγο μήκος/ διάμετρο ( $L/d_o$ )

$d_o$  η διάμετρος του ψεκαστή

SG το ειδικό βάρος καυσίμου

$\Delta P_L$  η πτώση πίεσης μέσα στον ψεκαστή

Τα spray που παράγονται από τους επίπεδους ψεκαστές έχουν συνήθως τιμές γωνιών κώνου από 5 έως 15. Η γωνία κώνου επηρεάζεται μόνο σε πολύ μικρό βαθμό από τη διάμετρο και το λόγο  $L/d_o$  της οπής αλλά κυρίως εξαρτάται από το ιξώδες και την επιφανειακή τάση του καυσίμου όπως και από την τύρβη του πίδακα εξαγωγής. Αύξηση στην τύρβη αυξάνει το λόγο της ακτινικής προς την αξονική συνιστώσα της ταχύτητας του πίδακα, αυξάνοντας συνεπώς και τη γωνία του κώνου.

Η διάλυση του υγρού καυσίμου σε σταγόνες διευκολύνεται με την αύξηση της ταχύτητας του καυσίμου, η οποία με τη σειρά της αυξάνει και το επίπεδο της τύρβης αλλά και τις επαγόμενες, από το γύρω αέριο, δυνάμεις οπισθέλκουσας. Αντίθετα αύξηση του ιξώδους εμποδίζει το σχηματισμό σταγόνων. Αυτές οι βασικές διαπιστώσεις εμπεριέχονται στην παρακάτω έκφραση, η οποία μας δίνει την τιμή του μεγέθους της μέσης σταγόνας:

$$SMD = 3.15 \cdot 10^4 v_L^{0.2} / U_L$$

όπου  $U_L$  η ταχύτητα υγρού ( $m/sec^2$ )

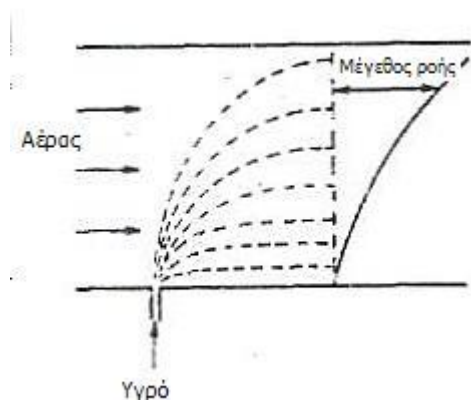
$v_L$  το κινηματικό ιξώδες ( $m^2/sec$ )

Πρέπει να σημειωθεί ότι η παραπάνω εξίσωση έχει εφαρμογή μόνο όταν το καύσιμο εγχύεται σε μη κινούμενο αέρα. Δύο άλλες περιπτώσεις με πρακτικό ενδιαφέρον είναι α) έγχυση σε αέρα με ίδια ή αντίθετη κατεύθυνση και β) εγκάρσια έγχυση καυσίμου.

Η επίδραση της ταχύτητας του αέρα ή του αερίου είναι πολύ σημαντική γιατί ο ψεκασμός δεν επιτυγχάνεται αμέσως μετά την έγχυση του καυσίμου από την οπή. Αντίθετα η διαδικασία συνεχίζεται στον περιβάλλοντα χώρο, μέχρι το μέγεθος των σταγόνων να φτάσει σε μία κρίσιμη τιμή, πέρα από την οποία περαιτέρω "διάλυση" του καυσίμου δεν μπορεί να επιτευχθεί. Για κάθε καύσιμο αυτό το κρίσιμο μέγεθος σταγόνας δεν εξαρτάται μόνο από την απόλυτη ταχύτητα του υγρού πίδακα αλλά από τη σχετική του ταχύτητα με το γύρω περιβάλλον. Αν και τα δύο κινούνται κατά την ίδια φορά η διείσδυση αυξάνει, ο ψεκασμός καθυστερεί και η μέση διάμετρος σταγόνας αυξάνει. Όταν οι κινήσεις έχουν αντίθετες κατευθύνσεις η διείσδυση μειώνεται, αυξάνει η γωνία κώνου και βελτιώνεται η ποιότητα ψεκασμού.

Όταν ο επίπεδος ψεκαστής τοποθετηθεί κάθετα στην κύρια ροή, οι μεγαλύτερες σταγόνες διεισδύουν βαθύτερα στη ροή και το φάσμα των μεγεθών των σταγόνων που δημιουργείται έχει

ακτινική μορφή, όπως φαίνεται στο σχ. 4.3. Αυτή η μορφή μπορεί να εμφανίζει πλεονεκτήματα, αν για παράδειγμα ο αναφλεκτήρας τοποθετηθεί σε περιοχή με σταγόνες.

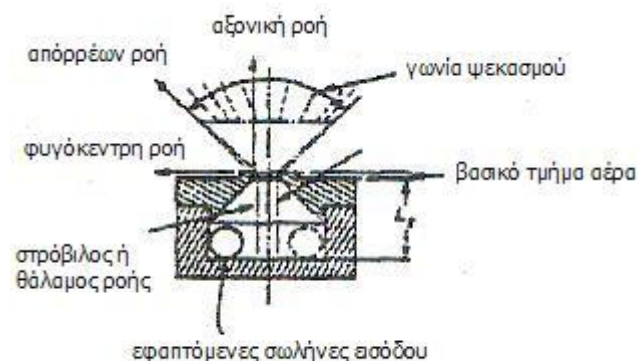


#### 4.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΕΧΗΣ ΡΟΗΣ ΑΕΡΑ ΣΤΗΝ ΔΙΑΝΟΜΗ ΣΤΑΓΟΝΩΝ

Τα παραπάνω συμπεράσματα που έγιναν για την επίδραση της κίνησης του αέρα στα χαρακτηριστικά του spray των επιπέδων ψεκαστών έχουν ενδιαφέρον μόνο όταν η ταχύτητα/ αέρα δεν είναι τόσο υψηλή ώστε από μόνη της να καθορίσει τη φύση της διαδικασίας/ ψεκασμού. Αν όμως το εγχυόμενο καύσιμο εισάγεται σε ροή αέρα μεγάλης ταχύτητας, μηχανισμός του ψεκασμού αλλάζει και έχει σχέση περισσότερο με τον ψεκασμό τύπου blast.

#### 4.6. ΨΕΚΑΣΤΗΣ ΤΥΠΟΥ SIMPLEX

Εξαιτίας της μικρής γωνίας κώνου των επίπεδων ψεκαστών, η χρήση τους δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στους αεροκινητήρες. Μεγαλύτερες γωνίες κώνου επιτυγχάνονται με τη χρήση δινοψεκαστών, στους οποίους δίνεται στο καύσιμο περιστροφική κίνηση έτσι ώστε κάτω από την επίδραση της φυγοκέντρου να καλύψει, με τη μορφή ενός κοίλου κώνου, την περιοχή της καύσης.



#### 4.4. ΨΕΚΑΣΤΗΡΑΣ SIMPLEX

Η απλούστερη μορφή των δινοψεκαστών ονομάζονται simplex και η διάταξη τους φαίνεται

στο σχ. 4.4. Το καύσιμο εισάγεται μέσα σε ένα θάλαμο στροβίλων, από εφαπτόμενες θυρίδες, οι οποίες δίνουν στο καύσιμο μεγάλη γωνιακή ταχύτητα, σχηματίζοντας δηλαδή δίνες. Η έξοδος από το θαλαμίσκο αυτόν είναι η τελική οπή, όπου το περιστρεφόμενο υγρό περνά, κάτω από την επίδραση και των αξονικών και των ακτινικών δυνάμεων, παίρνοντας τη μορφή ενός λεπτού κοίλου κωνικού στρώματος. Η γωνία του κώνου ορίζεται από τα σχετικά μεγέθη των αξονικών και ακτινικών συνιστωσών της ταχύτητας εξόδου.

Η διαδικασία του ψεκασμού πραγματοποιείται σε στάδια, όσο η πίεση έγχυσης αυξάνει από το μηδέν :

1. Το καύσιμο στάζει από την οπή.
2. Το καύσιμο εγκαταλείπει τον ψεκαστή με τη μορφή μιας λεπτής και αιχμηρής ακίδας.
3. Σχηματίζεται ένας κώνος, πάνω από την οπή αλλά εξαιτίας των δυνάμεων επιφανειακής τάσης μετατρέπεται σε μία φυσαλίδα.
4. Η φυσαλίδα ανοίγει και παίρνει τη μορφή μιας κοίλης τουλίπας, η οποία έχει τραχιά και ακανόνιστα άκρα, με συνέπεια το καύσιμο να μετατρέπεται σε μεγάλες σταγόνες.
5. Η καμπύλη επιφάνεια παίρνει τη μορφή ενός κωνικού λεπτού στρώματος. Όσο αυτό το στρώμα απλώνεται στο χώρο, μικραίνει το πάχος του, αν και σύντομα διαλύεται σε σταγόνες, οι οποίες έχουν τη μορφή ενός κοίλου κώνου.

Έχουν σχεδιαστεί αρκετοί τύποι ψεκαστών οι οποίοι βασικά διαφέρουν στον τρόπο με τον οποίο προκαλείται η δίνη στο καύσιμο.

#### **4.6.α. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΚΤΩΝΩΣΗΣ**

Ο συντελεστής εκτόνωσης στους δινοψεκαστές είναι μικρός και αυτό συμβαίνει εξαιτίας του αέρα που φράζει το μεγαλύτερο μέρος της οπής. Ύστερα από μελέτες που έχουν γίνει έχει διαπιστωθεί ότι ο συντελεστής εκτόνωσης προσδιορίζεται από τη γεωμετρία του θαλαμίσκου όπου παράγονται οι στρόβιλοι και αποτελεί συνάρτηση του λόγου  $A_p / D_s d_o$  δηλαδή του λόγου της επιφανείας εισόδου του καυσίμου στο θαλαμίσκο δινών προς τη διάμετρο του θαλαμίσκου αυτού επί τη διάμετρο της οπής.

#### **4.6.β. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ**

Πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη οι απώλειες λόγω τριβής, κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού. Αυτές οι απώλειες έχουν δύο αντίθετα αποτελέσματα, που αφορούν το συντελεστή εκτόνωσης. Πρώτον αυτές οι απώλειες σημαίνουν σπατάλη της ενέργειας ψεκασμού με αποτέλεσμα να μειώνεται ωφέλιμη πτώση πίεσης κατά μήκος του ψεκαστή και κατά

συνέπεια ο συντελεστής εκτόνωσης. Από την άλλη η περιστροφική κίνηση, που δίνεται στο καύσιμο, μειώνει την ποσότητα ροής του αέρα με αποτέλεσμα την αύξηση του συντελεστή εκτόνωσης. Η σχετική βαρύτητα αυτών των δύο αντιθέτων φαινομένων, εξαρτάται κυρίως από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ψεκαστή.

#### **4.6.γ. ΠΑΡΟΧΗ ΜΑΖΑΣ**

Η ροή της μάζας ενός δινοψεκαστή εξαρτάται από το μέγεθος των θυρίδων εισόδου, το μέγεθος της τελικής οπής, το ειδικό βάρος του καυσίμου και την πτώση πίεσης κατά μήκος του ψεκαστή, όπως φαίνεται στην παρακάτω έκφραση :

$$M_L = 9.20 d_o (A_p SG \Delta P_L)^{0.5} \quad [\text{kg}/\text{sec}]$$

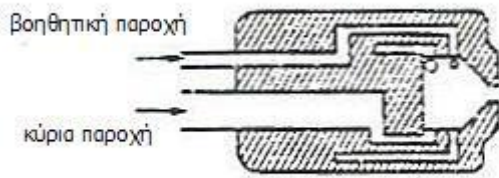
#### **4.7. ΨΕΚΑΣΤΕΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΕΥΡΟΥΣ**

Ένα μεγάλο μειονέκτημα των δινοψεκαστών είναι ότι η παροχή της ροής μεταβάλλεται με την τετραγωνική ρίζα της μεταβολής της πίεσης έγχυσης. Για την κηροζίνη η ελάχιστη πίεση για ικανοποιητική ποιότητα ψεκασμού είναι περίπου 100 KPa. Αυτό σημαίνει ότι 20πλασιασμός της ροής της μάζας από την ελάχιστη ροή απαιτεί πίεση έγχυσης της τάξης των 40000 KPa. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη άλλων μορφών ψεκαστών μεγάλου εύρους όπως ο δίδυμος, διπλής οπής και άλλοι στους οποίους λόγοι της μέγιστης προς την ελάχιστη παροχή καυσίμου της τάξης του 20 δεν απαιτούν πιέσεις μεγαλύτερες από τα 7000 KPa.

#### **4.7.α. ΔΙΠΛΟΣ (ΔΙΔΥΜΟΣ) ΨΕΚΑΣΤΗΣ**

Το βασικό χαρακτηριστικό το οποίο ξεχωρίζει το δίδυμο ψεκαστή από τους κοινούς δινοψεκαστές είναι η χρήση δυο εφαπτόμενων θυρίδων. Η μια είναι η βοηθητική θυρίδα και λειτουργεί όταν απαιτούνται μικρές παροχές π.χ. όταν ο κινητήρας λειτουργεί στο idle ή σε μεγάλο ύψος. Η άλλη είναι η κύρια δίοδος, για μεγάλες παροχές που απαιτούνται σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Η βοηθητική δίοδος είναι αυτή που θα τεθεί πρώτη σε λειτουργία από το Βοηθητικό αγωγό, ενώ ταυτόχρονα μία ελατηριωτή βαλβίδα ελέγχου δεν επιτρέπει την είσοδο καυσίμου στην κύρια οδό. Όταν η πίεση έγχυσης πάρει μια συγκεκριμένη και προκαθορισμένη τιμή ανοίγει η βαλβίδα έτσι ώστε και οι δύο εισοδοί να λειτουργούν ταυτόχρονα.

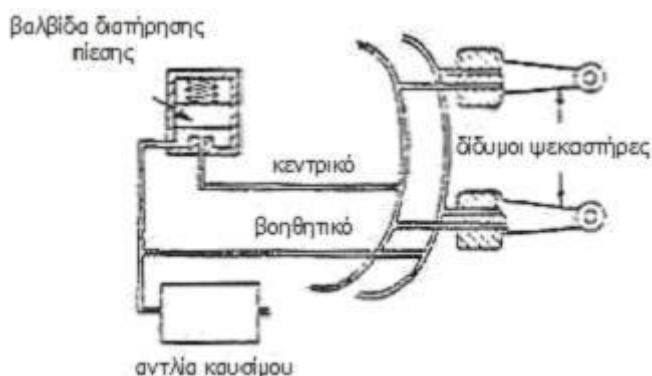
Τα βασικά χαρακτηριστικά του δίδυμου ψεκαστή φαίνονται στο σχ. 4.5. Έχει παρατηρηθεί άριστη λειτουργία του δίδυμου ψεκαστή στις μικρές παροχές καυσίμου. Επίσης διαπιστώθηκε ότι η πίεση εγχύσεως ενός δίδυμου ψεκαστή είναι 8 φορές μεγαλύτερη από αυτή για ένα ψεκαστή τύπου simplex. Αυτό σημαίνει περίπου 3 φορές καλύτερη ποιότητα ψεκασμού.



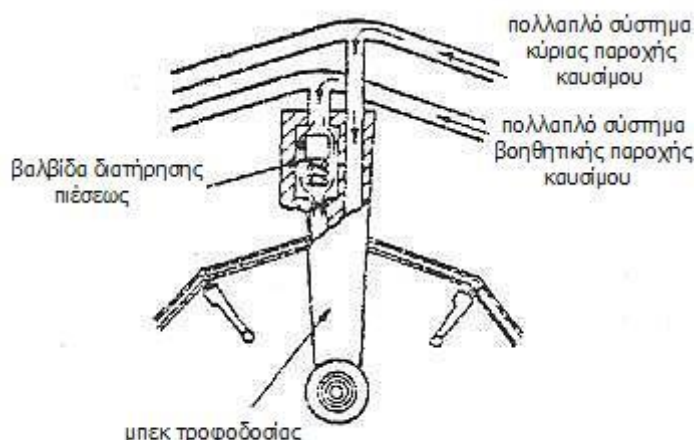
#### 4.5. ΔΙΔΥΜΟΣ ΨΕΚΑΣΤΗΡΑΣ

Ένα μειονέκτημα του δίδυμου ψεκαστή είναι η ελάττωση κατά  $20^\circ$  της γωνίας του κώνου γιατί ο λόγος  $A_p / D_s d_o$  αυξάνει όταν μπαίνει σε λειτουργία και η κύρια οδός, με αποτέλεσμα μείωση της γωνίας του κώνου.

Στο σχ. 4.6 υπάρχει μόνο μία βαλβίδα πίεσης, ανεξάρτητα με το πλήθος των χρησιμοποιούμενων ψεκαστών. Αυτή η βαλβίδα ελέγχει τη διανομή του καυσίμου στη βοηθητική και στη κύρια σωλήνωση. Κατά τη λειτουργία όμως αυτού του συστήματος με το βοηθητικό ψεκασμό, μπορεί να παραχθεί εσωτερική ροή στην κύρια οδό μεταξύ των δύο ψεκαστών. Για την εξάλειψη αυτού του προβλήματος χρησιμοποιείται διανεμητής ροής όπως του σχήματος 4.7.



#### 4.6. ΔΙΠΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΔΥΜΩΝ ΨΕΚΑΣΤΩΝ

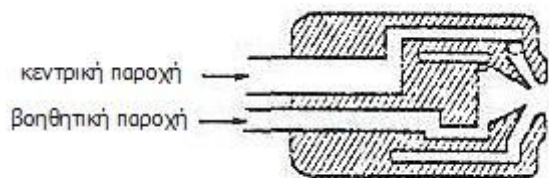


#### 4.7. ΔΙΑΝΟΜΕΑΣ ΡΟΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Μια άλλη διάταξη διπλού ψεκαστή χρησιμοποιεί κοινή σωλήνωση και για τη βοηθητική και για την κύρια παροχή, με μια βαλβίδα πίεσης ενσωματωμένη σε κάθε ψεκαστή. Όσο το έργο της αντλίας αυξάνει, για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του κινητήρα, η πίεση στις σωληνώσεις έχει τιμή μεγαλύτερη από αυτή της βαλβίδας πίεσης, με αποτέλεσμα αυτή να ανοίγει και η αυξανόμενη ροή εισάγεται στο δινοθάλαμο από την κύρια θυρίδα. Η βαλβίδα πίεσης καθορίζεται να ανοίγει στα 700 KPa περίπου, έτσι ώστε όταν ο κινητήρας λειτουργεί σε χαμηλές στροφές σε χαμηλά ύψη ή λειτουργεί σε μικρότερη από τη μέγιστη ταχύτητα σε μεγάλα ύψη, το καύσιμο να διέρχεται από τη βοηθητική οδό έτσι ώστε να εξασφαλισθεί ο καλύτερος δυνατός ψεκασμός.

#### **4.7.B. ΨΕΚΑΣΤΗΣ ΔΙΠΛΗΣ ΟΠΗΣ**

Ο ψεκαστής διπλής οπής φαίνεται στο σχ. 4.8. Ουσιαστικά αποτελείται από δύο ακροφύσια τύπου simplex τα οποία βρίσκονται ομόκεντρα το ένα μέσα στο άλλο. Το βοηθητικό ακροφύσιο είναι τοποθετημένο στο εσωτερικό, σε τέτοια θέση ώστε να μην υπάρχει αλληλοκάλυψη των δύο spray. Για μικρές παροχές καυσίμου χρησιμοποιείται μόνο το βοηθητικό ακροφύσιο. Όμως όταν η πίεση του καυσίμου φτάσει μια ορισμένη τιμή, η βαλβίδα πίεσης ανοίγει και διέρχεται καύσιμο στο κύριο ακροφύσιο. Η τιμή της κρίσιμης αυτής πίεσης διαφέρει από κινητήρα σε κινητήρα και κυμαίνεται συνήθως από 1400 έως 3000KPa.



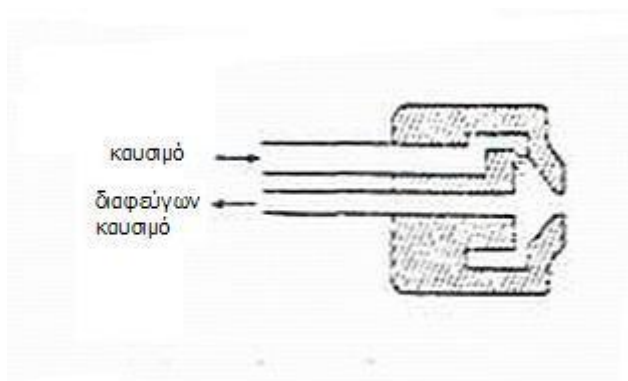
#### 4.8. ΨΕΚΑΣΤΗΡΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΟΠΗΣ

Για μικρές παροχές όπου όλο το καύσιμο ψεκάζεται από το βοηθητικό ακροφύσιο, η ποιότητα ψεκασμού είναι αρκετό: καλή γιατί η σχετικά μεγάλη πίεση του καυσίμου, σπρώχνει εύκολα το καύσιμο μέσω των μικρών θυρίδων στο βοηθητικό δινόθαλο. Με το άνοιγμα όμως της βαλβίδας πίεσης και τη λειτουργία του κυρίου ακροφυσίου, η ποιότητα ψεκασμού χειροτερεύει γιατί η πίεση είναι μικρή. Με αύξηση της όμως παροχής του καυσίμου, η πίεση του αυξάνει και η ποιότητα σταδιακά βελτιώνεται. Όμως είναι αναπόφευκτο για ένα ορισμένο εύρος παροχών, που ξεκινά από τη στιγμή που ανοίγει η βαλβίδα, η ποιότητα να μην είναι ιδιαίτερα καλή. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος φροντίζουμε ώστε η γωνία κώνου του βοηθητικού spray να είναι ελαφρά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη γωνία του κυρίου spray. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα ακροφύσια να "συνεργάζονται" και να ανταλλάσσουν ενέργεια μεταξύ τους. Αυτό βοηθά λίγο την κατάσταση αλλά η ποιότητα εξακολουθεί να μην είναι ικανοποιητική. Για αυτό και ο σχεδιαστής πρέπει να εξασφαλίσει ότι το άνοιγμα της βαλβίδας πίεσης δε θα συμπίπτει με μία κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα όπου η υψηλή απόδοση καύσης και οι ελάχιστες εκπομπές ρύπων θα αποτελούν τις κύριες απαιτήσεις.

#### **4.7.γ. ΨΕΚΑΣΤΗΣ ΜΕ ΔΙΑΦΥΓΗ**

Πρόκειται βασικά για ψεκαστή τύπου simplex με μια βασική διαφορά: το πίσω τοίχωμα του δινόθαλου αντί να είναι στερεό περιέχει ένα σωληνοειδές πέρασμα μέσα από το οποίο το καύσιμο μπορεί να διαφύγει όπως δείχνει το σχ. 4.9. Το καύσιμο εισάγεται στο θάλαμο στροβίλων με μεγάλη πίεση και μεγάλη παροχή. Το ποσοστό του καυσίμου που εγχύεται στην περιοχή καύσης μεταβάλλεται και καθορίζεται από μια βαλβίδα που είναι τοποθετημένη στην οδό διαφυγής. Όσο η απαίτηση για καύσιμο μειώνεται με την αύξηση του ύψους ή με τη μείωση των στροφών του κινητήρα, όλο και περισσότερο καύσιμο διαφεύγει από το θάλαμο στροβίλων, αφήνοντας όλο και λιγότερο να περάσει από την οπή ψεκασμού. Η συνεχής λειτουργία του ψεκαστή με διαφυγή σε σχετικά υψηλή πίεση σημαίνει ότι και ακόμα σε απαίτηση για μεγάλη παροχή καυσίμου, υπάρχει επαρκής περιστροφική κίνηση που θα εξασφαλίσει τον καλό ψεκασμό. Σύμφωνα με μελέτες που έγιναν έχει διαπιστωθεί ότι

ικανοποιητικός ψεκασμός μπορεί να επιτευχθεί ακόμα και όταν η παροχή του καυσίμου είναι ίση με το 1% της μέγιστης. Γενικά είναι φανερό η τάση του συστήματος να βελτιώνει τον ψεκασμό όσο μειώνεται η ροή του καυσίμου. Σημαντικό πλεονέκτημα της διάταξης των ψεκαστών με διαφυγή είναι η έλλειψη κινητών μερών και ότι ο σχεδιασμός γίνεται για λειτουργία με διάφορες παροχές έτσι ώστε η πιθανότητα έμφραξης από διάφορες επικαθίσεις να είναι αρκετά μικρή.



#### 4.9. ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΨΕΚΑΣΤΗΡΑ ΜΕ ΔΙΑΦΥΓΗ

Μειονέκτημα όμως αποτελεί η μεγάλη μεταβολή της γωνίας του κώνου με τη μεταβολή της παροχής του καυσίμου. Η επίδραση της μείωσης της παροχής είναι η ελάττωση της αξονικής συνιστώσας της ταχύτητας χωρίς να επηρεάζεται η ακτινική συνιστώσα. Συνεπώς η γωνία του κώνου μεγαλώνει. Έτσι η γωνία κώνου για ελάχιστη παροχή μπορεί να είναι κατά 50 μεγαλύτερη από αυτή για τη μέγιστη παροχή. Από πλευράς καύσης αυτό είναι μεγάλο πρόβλημα γιατί επιθυμητή θα ήταν η μείωση της γωνίας κώνου με τη μείωση της παροχής.

Άλλα μειονεκτήματα αυτής της διαμόρφωσης είναι α) το πρόβλημα της ρύθμισης της ροής του καυσίμου, που είναι πιο πολύπλοκο από ότι στα άλλα συστήματα και β) απαιτείται αντλία που να παράγει αρκετό έργο για να ανταποκριθεί στις μεγάλες απαιτήσεις ανακυκλοφορίας. Για αυτούς τους λόγους τα τελευταία χρόνια οι ψεκαστές με διαφυγή δε χρησιμοποιούνται ευρέως. Εάν όμως συνεχισθεί η αύξηση της περιεκτικότητας των καυσίμων σε αρωματικές ενώσεις, θα υπάρξουν μεγάλα προβλήματα έμφραξης στους συμβατικούς ψεκαστές πίεσης. Εφόσον στους ψεκαστές με διαφυγή δεν υπάρχουν μικρά περάσματα το πρόβλημα αυτό δεν υφίσταται". Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την πολύ καλή παρεχόμενη ποιότητα ψεκασμού κάνει τη χρήση των ψεκαστών διαφυγής πολύ πιθανή με την εφαρμογή των εναλλακτικών καυσίμων, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη περιεκτικότητα σε αρωματικές ενώσεις, υψηλό ιξώδες και μικρή πτητικότητα.



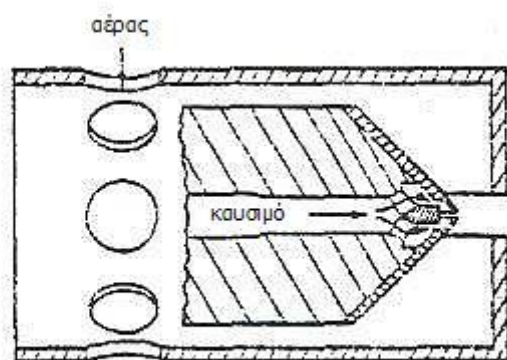
#### **4.8. ΨΕΚΑΣΤΕΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ SPRAY**

Τα επίπεδα spray συνήθως επιτυγχάνονται με τη δημιουργία οπών σε επίπεδες ή κυλινδρικές επιφάνειες και κανονίζοντας τη ροή του καυσίμου να διέρχεται από κάθε οπή από δύο αντίθετες κατεύθυνσης. Στον ψεκασμό μονής οπής, η οπή αυτή αναγκάζει το καύσιμο να ρέει από αυτή με δύο αντίθετες ροές με αποτέλεσμα το spray να έχει το σχήμα κυκλικού τομέα γωνίας 75°. Ένα κάλυμμα αέρα συνήθως ρέει γύρω από το ακροφύσιο παρέχοντας και διευκόλυνση στον ψεκασμό και εκκένωση του αέρα από την άκρη του ακροφυσίου.

Όσον αφορά το μέγεθος των σταγόνων, μεγαλύτερες σταγόνες εμφανίζονται με υψηλές πιέσεις λειτουργίας που οφείλονται στη διάλυση των λεπτών στρωμάτων του καυσίμου, κοντά στην μετωπική επιφάνεια του εγχυτήρα, έτσι ώστε οι σταγόνες να παράγονται στην αρχή από τα πιο λεπτά στρώματα. Ωστόσο η ατμοσφαιρική πίεση δεν επηρεάζει σημαντικά τη γωνία του spray.

Γενικά τα πειράματα έχουν αποδείξει ότι το μέγεθος των σταγόνων των ψεκαστών επίπεδου spray είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο μέγεθος για τους δινοψεκαστές για ίδιες παροχές. Η ύπαρξη όμως του στρώματος αέρα βοήθησε στην παραγωγή spray με SMD < 25 μm, δηλαδή πολύ μικρά σταγονίδια ακόμα και με τη χρήση καυσίμου με υψηλό ιξώδες.

Οι ψεκαστές επίπεδου spray χρησιμοποιούνται στους μικρούς δακτυλιοειδής θαλάμους καύσης αφού παρέχουν πολύ καλή εγκάρσια διασπορά καυσίμου, μειώνοντας έτσι τον αριθμό των εγχυτήρων. Ένα τυπικό παράδειγμα ψεκαστή επίπεδου spray φαίνεται στο σχ. 4.10.



4.10. ΨΕΚΑΣΤΗΡΑΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ SPRAY

#### 4.9. ΔΙΝΟΨΕΚΑΣΤΕΣ

Στους δινοψεκαστές το καύσιμο εισάγεται σε μία περιστρεφόμενη επιφάνεια και εγχύεται ομοιόμορφα με τη Βοήθεια της φυγοκέντρου. Η περιστρεφόμενη επιφάνεια μπορεί να έχει τη μορφή ενός επίπεδου δίσκου, δίσκου με πτερύγια ή διάτρητης ρόδας με διαμέτρους που μεταβάλλονται από 25-450 mm. Οι μικροί δίσκοι περιστρέφονται γύρω στις 60000 rpm ενώ οι μεγαλύτεροι με 12000 rpm. Η δυνατότητα έγχυσης είναι περίπου ίση με 1.4 kgf/sec. Τέτοια συστήματα έχουν αξιόλογη πολλαπλή χρησιμότητα και μπορούν να επιτύχουν τον ψεκασμό καυσίμων που διαφέρουν αρκετά στο ιξώδες. Σημαντικό πλεονέκτημα τέτοιων διατάξεων είναι η δυνατότητα ελέγχου του πάχους και της ομοιομορφίας του υγρού spray, με τη μεταβολή της παροχής του καυσίμου ή τη μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας.

Πολλοί μηχανισμοί της μορφής του περιστρεφόμενου δίσκου μελετήθηκαν με μεταβολές της ροής του υγρού καυσίμου και της γωνιακής ταχύτητας του δίσκου. Για μικρές παροχές, το υγρό διασπείρεται κατά μήκος της επιφάνειας και φυγοκεντρείται ως μεμονωμένες σταγόνες ομοίου μεγέθους. Η διαδικασία του διαχωρισμού των σταγόνων από τα λεπτά στρώματα είναι εν γένη ασυνεχής και εμφανίζεται από μέρος σε μέρος, στην περιφέρεια του δίσκου. Αν η παροχή αυξηθεί, η διαδικασία του ψεκασμού παραμένει βασικά η ίδια εκτός από το γεγονός ότι τα λεπτά στρώματα, που σχηματίζονται κατά μήκος της περιφέρειας του δίσκου, έχουν μεγαλύτερη διάμετρο. Ακόμα μεγαλύτερη αύξηση της παροχής οδηγεί σε μια κατάσταση, κατά την οποία τα στρώματα δεν μπορούν να αντεπεξέλθουν στις απαιτήσεις της ροής. Τότε δημιουργείται ένα λεπτό συνεχές στρώμα, το οποίο εκτείνεται πέρα από το χείλος, έως ότου η δύναμη συστολής, στο ελεύθερο άκρο εξαιτίας της επιφανειακής τάσης, γίνει ίση με την κινητική ενέργεια του προπορευόμενου στρώματος. Σχηματίζεται τότε ένα παχύ χείλος, το οποίο με τη σειρά του αποσυντίθεται σε λεπτότερα στρώματα και σταγονίδια. Όμως επειδή το χείλος αυτό δεν περιορίζεται από στερεή επιφάνεια, τα στρώματα σχηματίζονται με ανάμοιο τρόπο, γεγονός που σημαίνει και μεγάλες μεταβολές στο μέγεθος των σταγόνων. Όταν η γωνιακή ταχύτητα του δίσκου γίνει ίση με 50 m/sec περίπου, το υγρό, που εμφανίζεται στην άκρη του δίσκου, ψεκάζεται αμέσως από τον περιβάλλοντα αέρα.

Με το μηχανισμό του περιστρεφόμενου δίσκου, που περιγράφηκε παραπάνω, θα περίμενε κανείς ότι το μέσο μέγεθος σταγόνας θα μειωνόταν με την αύξηση της γωνιακής ταχύτητας και θα αυξανόταν με την αύξηση της παροχής και του ιξώδους του καυσίμου. Οι προβλέψεις αυτές επιβεβαιώθηκαν από αρκετά πειράματα και μελέτες των παραγόντων που επηρεάζουν τις ιδιότητες ψεκασμού.

Βρέθηκε ότι :

$$SMG = 6.70 Q_L / N D_d^{0.2}$$

όπου  $Q_L$  ογκομετρική παροχή υγρού (lt/sec)

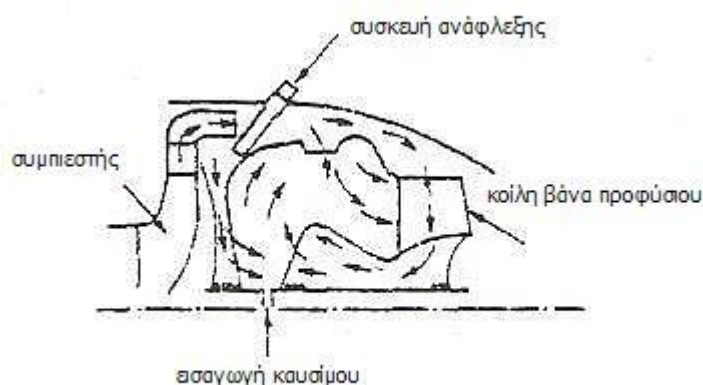
$N$  ταχύτητα περιστροφής (rpm)

$D_d$  διάμετρος δίσκου (m)

Αυτή η έκφραση επιβεβαιώθηκε πειραματικά με νερό και για παροχές 0.008 lt/sec, για επίπεδους δίσκους με διάμετρο από 0.06-0.14 m και ταχύτητες περιστροφής πάνω από 9000 rpm.

#### **4.9.α. ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ**

Στη Γαλλία, η εταιρεία κινητήρων Turbomeca ανέπτυξε επιτυχώς έναν τυμπανοειδή ψεκαστή, ο οποίος χρησιμοποιείται σε ένα ακτινικό-δακτυλιοειδή θάλαμο καύσης, όπως φαίνεται στο σχ. 4.11. Το καύσιμο παρέχεται με χαμηλή πίεση, κατά μήκος του κοίλου, κύριου άξονα και εκτονώνεται ακτινικά μέσω οπών που έχουν δημιουργηθεί πάνω του. Το πλήθος των οπών έγχυσης μεταβάλλεται από 9 έως 18 και οι διαμέτροι από 2.0 έως 3.2 mm. Οι οπές μπορεί να βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, με τη μορφή μιας σειράς, αλλά κάποιες διαμορφώσεις εμφανίζουν διπλές σειρές οπών. Οι οπές αυτές έχουν τη δυνατότητα παροχής ροής πολύ μεγαλύτερη από τις μέγιστες απαιτούμενες συνθήκες λειτουργίας και κατασκευάζονται έτσι ώστε να μη φράζουν εύκολα. Ωστόσο είναι πολύ σημαντική η κατεργασία και το φινιρίσμα τους αφού η εμπειρία έχει δείξει ότι η ομοιογένεια της ροής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια στις διαστάσεις. Είναι φανερό ότι αν μία οπή παρέχει περισσότερο καύσιμο από μία άλλη, θα δημιουργηθεί ένα περιστρεφόμενο θερμό σημείο στα καυσαέρια, με καταστροφικές συνέπειες για τη συγκεκριμένη λεπίδα όπου προσκρούει το θερμό σημείο.



#### 4.11. ΣΥΣΤΗΜΑ TURBOMECA

Η ομοιογένεια της ροής εξαρτάται σε μεγάλο ποσοστό από το "δρομολόγιο" της ροής του καυσίμου μέσα στον άξονα, ειδικά στην περιοχή δίπλα στις οπές. Όταν δε, υπάρχουν δύο σειρές οπών είναι σημαντικό να επιτευχθεί η σωστή διαίρεση μεταξύ τους. Και πάλι η εσωτερική γεωμετρία του άξονα στην περιοχή των οπών είναι μείζονος σημασίας. Το βασικό

πλεονέκτημα του συστήματος "εκτόξευσης" έγκειται στην απλότητα του και στο μικρό κόστος. Απαιτείται μία μικρής πίεσης αντλία και η ποιότητα του ψεκασμού εξαρτάται μόνο από τις στροφές του κινητήρα. Οι ισοδύναμες πιέσεις εγχύσεως είναι αρκετά υψηλές, της τάξεως  $3.4 \cdot 10^4$  KPa σε μέγιστη ταχύτητα και ικανοποιητικός ψεκασμός επιτυγχάνεται σε ταχύτητες της τάξεως του 10% της μέγιστης. Η επίδραση του ιξώδους στη λειτουργία του συστήματος είναι ελάχιστη, για αυτό υπάρχει δυνατότητα χρήσης πολλών καυσίμων.

Από πειράματα που έγιναν για διάφορους τυμπανοειδείς ψεκαστές, για διάφορες διαμέτρους και μεγέθη οπών προέκυψε ότι:

$$SMG = 0.0426 / \text{περιφερειακή ταχύτητα τύμπανου [m/sec]}$$

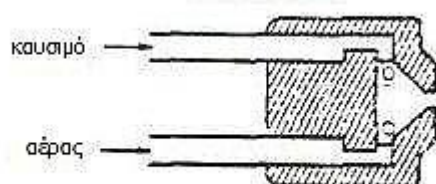
Ένα μειονέκτημα της μεθόδου είναι η χαμηλή απόκριση στις εναλλαγές παροχής καυσίμου εξαιτίας της μεγάλης διαδρομής που πρέπει να ακολουθήσει το καύσιμο. Το πιο σοβαρό πρόβλημα εντοπίζεται στην ικανότητα επανεκκίνησης σε μεγάλα ύψη όπου οι στροφές του κινητήρα είναι λίγες και η ποιότητα του ψεκασμού σχετικά κακή.

Η χρήση του συστήματος αυτού είναι ιδανική για μικρούς κινητήρες με χαμηλούς λόγους συμπίεσης. Αφού η επιτυχία του ψεκασμού εξαρτάται από τις στροφές, συνήθως μεγαλύτερες από 20000 rpm, είναι φανερό ότι τέτοιες ταχύτητες δεν μπορούν να επιτευχθούν με μεγάλους κινητήρες. Ακόμα προβλήματα εντοπίζονται με το δαιδαλώδες σύστημα σωληνώσεων, στο οποίο ο αέρας ψύξεως εκτίθεται αφού η ψύξη είναι δύσκολη για κινητήρες με μεγάλη συμπίεση.

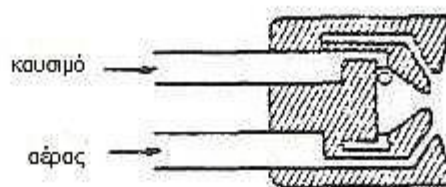
#### **4.10. ΑΕΡΟΒΟΗΘΟΥΜΕΝΟΙ ΨΕΚΑΣΤΕΣ**

Σε αυτήν την παράγραφο περιγράφονται τα ευεργετικά αποτελέσματα ενός ρεύματος αέρα, που βοηθά τη διάλυση του υγρού στρώματος σε σταγόνες. Ένα παράδειγμα είναι η χρήση ενός καλύμματος αέρα στα ακροφύσια τύπου simplex. Όπως όμως ήδη έχει αναφερθεί ένα βασικό μειονέκτημα, των ψεκαστών αυτών είναι ότι αν οι εισοδοί των στροβίλων έχουν μέγεθος αρκετό για να περάσει η μέγιστη παροχή καυσίμου με τη μέγιστη πίεση έγχυσης, τότε η μεταβολή της πίεσης του καυσίμου είναι πολύ μικρή για να δώσει καλή ποιότητα ψεκασμού για τη μικρότερη παροχή καυσίμου. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να ξεπεραστεί με τη χρήση διπλών οπών ή δίδυμου ακροφύσιου. Όμως μια εναλλακτική προσέγγιση είναι η χρήση του ψεκαστή simplex με τους στροβίλους, ο οποίος επιτυγχάνει πάντα καλό ψεκασμό σε μεγάλες παροχές και χρησιμοποιεί αέρα για να βελτιώσει τη διαδικασία του ψεκασμού σε μικρότερες ροές. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται ένα παχύ ρεύμα αέρα που προσκρούει στο σχετικό αργό ρεύμα του καυσίμου, είτε εσωτερικά είτε εξωτερικά, όπως φαίνεται στα σχ. 4.12 και 4.13.

Στις διαμορφώσεις με εσωτερική ανάμειξη, η γωνία του κώνου του spray είναι ελάχιστη για μέγιστη ροή αέρος ενώ αυξάνει με τη μείωση της παροχής. Αυτού του τύπου οι ψεκαστές χρησιμοποιούνται με καύσιμα υψηλού ιξώδους και επιτυγχάνεται κάλος ψεκασμός ακόμα και με ελάχιστη παροχή. Τα συστήματα με εξωτερική μείξη μας παρέχουν σταθερή γωνία κώνου του spray για όλες τις τιμές της παροχής. Έχουν το πλεονέκτημα ότι δεν υπάρχει κίνδυνος το καύσιμο να διαρρεύσει μέσα στον αέρα. Όμως η χρήση του αέρα δεν γίνεται με τον πλέον αποδοτικό τρόπο, για αυτό και οι απαιτήσεις ενέργειας είναι υψηλότερες.



#### 4.12. ΑΕΡΟΒΟΗΘΟΥΜΕΝΟΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ ΨΕΚΑΣΤΗΡΑΣ



#### 4.13. ΑΕΡΟΒΟΗΘΟΥΜΕΝΟΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ ΨΕΚΑΣΤΗΡΑΣ

Το βασικό μειονέκτημα των αεροβοηθούμενων ψεκαστών όσον αφορά τους αεροκινητήρες είναι η ανάγκη για εξωτερική παροχή αέρα υψηλής πίεσης. Αυτό τους κάνει και στην ουσία ακατάλληλους για αεροπορική χρήση.

#### **4.11. ΨΕΚΑΣΤΕΣ ΤΥΠΟΥ "AIR BLAST"**

Σαν αρχή ο ψεκαστή air blast λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο όπως και ο αεροβοηθούμενος γιατί και οι δύο χρησιμοποιούν την κινητική ενέργεια της ροής του αέρα για να διαλύσουν τη βασική ροή του καυσίμου σε λεπτά στρώματα και σταγόνες. Η βασική διαφορά έγκειται στην ποσότητα του αέρα που χρησιμοποιείται και στην ταχύτητα του ψεκασμού. Με το αεροβοηθούμενο ακροφύσιο όπου ο αέρας παρέχεται από ένα συμπιεστή ή ένα κύλινδρο υψηλής πίεσης, είναι σημαντικό να διατηρηθεί η παροχή του αέρα σε χαμηλά επίπεδα. Όμως εφόσον δεν υπάρχει κάποιος ιδιαίτερος περιορισμός για την πίεση του αέρα, η

ταχύτητα του μπορεί να πάρει μεγάλες τιμές. Για αυτό και οι αεροβοηθούμενοι ψεκαστές χαρακτηρίζονται από τη χρήση μιας σχετικά μικρής ποσότητας αέρα, με μεγάλη ταχύτητα. Όμως επειδή η ταχύτητα του αέρα που χρησιμοποιεί ένας air blast ψεκαστής περιορίζεται από μια μέγιστη τιμή (120 m/sec), που ανταποκρίνεται στην μεταβολή της πίεσης κατά μήκος των τοιχωμάτων του θαλάμου καύσης, ένα μεγαλύτερο ποσό αέρα απαιτείται για να επιτευχθεί καλός ψεκασμός. Ο αέρας αυτός δεν πάει χαμένος. Μετά τον ψεκασμό του καυσίμου ρέει προς την πρωτογενή ζώνη, όπου και αποτελεί μέρος του απαραίτητου για την αρχική καύση αέρα.

Οι air blast ψεκαστές έχουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των ψεκαστών πίεσης ειδικά στους αεροκινητήρες με υψηλό βαθμό συμπίεσης. Απαιτούν μικρότερες πιέσεις καυσίμου και παράγουν λεπτότερο spray. Επιπλέον επειδή ο ψεκασμός εξασφαλίζεται από την ανάμειξη του καυσίμου και του αέρα, η καύση που ακολουθεί εμφανίζει πολύ μικρό σχηματισμό αιθάλης και μπλε φλόγα μικρής φωτεινότητας, που δε θερμαίνει τα τοιχώματα του θαλάμου καύσης και δεν εκπέμπει μεγάλες ποσότητες καπνού. Έχει παρατηρηθεί ότι παρέχουν μια σχεδόν σταθερή κατανομή καυσίμου για όλο το φάσμα των παροχών του. Αυτό εξασφαλίζει ένα σημαντικό πρακτικό πλεονέκτημα αφού η κατανομή της θερμοκρασίας των καυσαερίων, που αποχωρούν από το θάλαμο καύσης, μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια. Με τη βοήθεια αυτής της κατανομής προσδιορίζεται το όριο ζωής των λεπίδων του στροβίλου.

Όλο τα παραπάνω πλεονεκτήματα οδήγησαν στην εγκατάσταση και χρήση των air blast ψεκαστών σε αρκετούς αεροπορικούς κινητήρες. Τα περισσότερα συστήματα εγχύσεως καυσίμου σήμερα, διασκορπίζουν το καύσιμο με τη μορφή ενός λεπτού στρώματος, πριν αρχίσει η διαδικασία του ψεκασμού από το ταχύ ρεύμα αέρα. Σε άλλα συστήματα το καύσιμο εγχύεται μέσα στο ταχύ ρεύμα του αέρα με τη μορφή ενός ή περισσοτέρων διακεκριμένων πιδάκων. Σε όλες τις περιπτώσεις ο βασικός στόχος είναι ο ίδιος: η χρήση του διαθέσιμου αέρα με τον πιο αποδοτικό τρόπο προκειμένου να επιτευχθεί το καλύτερο πιθανό επίπεδο ψεκασμού.

#### **4.11.α. ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ**

Από τα πειραματικά δεδομένα που εξήχθησαν από αρκετούς ερευνητές, όσον αφορά | τους ψεκαστές air blast μπορούμε να σημειώσουμε τα παρακάτω:

1. Το μέσο μέγεθος σταγόνας του spray αυξάνει με την αύξηση του ιξώδους και της επιφανειακής τάσης, όπως και με τη μείωση αέρα/ υγρού. Σε ιδανικές συνθήκες ο λόγος μάζας αέρα/ υγρού θα πρέπει να υπερβαίνει το 3, αλλά επιτυγχάνεται μικρή βελτίωση της Ποιότητας ψεκασμού με την αύξηση του λόγου σε τιμή περίπου ίση με 5.
2. Η πυκνότητα του υγρού δε φαίνεται να έχει μεγάλη επίδραση στο μέσο μέγεθος

σταγόνες. Πα τα ακροφύσια που πρώτα φέρουν το καύσιμο σε μορφή στρώματος και μετά το διοχετεύουν στο ρεύμα του αέρα, το μέσο μέγεθος αυξάνει ελάχιστα με την αύξηση της πυκνότητας. Για τους επίπεδους ψεκαστές παρατηρείται ακριβώς το αντίθετο.

3. Οι δύο ιδιότητες του αέρα, που είναι σημαντικές για τους air blast ψεκαστές, είναι η πυκνότητα και η ταχύτητα. Γενικά το μέσο μέγεθος σταγόνας είναι αντιστρόφως ανάλογο της ταχύτητας του αέρα. Η επίδραση της πυκνότητας του αέρα μπορεί να εκφρασθεί ως  $SMD = f(\rho_{air}^{-n})$  όπου το  $n$  είναι ίσο με 0.3 για τους επίπεδους ψεκαστές και 0.6 - 0.7 για τους air blast ψεκαστές.
4. Πα τα επίπεδα ακροφύσια, η αρχική διάμετρος του πίδακα έχει μικρή επίδραση στο μέσο μέγεθος σταγόνας, για υγρά μικρού ιξώδους. Για καύσιμα όμως με υψηλό ιξώδες, η ποιότητα ψεκασμού χειροτερεύει με την αύξηση του μεγέθους του πίδακα.
5. Στους air blast ψεκαστές, με αρχική μετατροπή του καυσίμου σε λεπτό στρώμα, το μέσο μέγεθος σταγόνας αυξάνει με το μέγεθος του ψεκαστή σύμφωνα με τη σχέση:  $SMD = f(L_c^{0.4})$  όπου  $L_c$  η χαρακτηριστική διάσταση του ψεκαστή.
6. Για κάθε συγκεκριμένο μέγεθος του ψεκαστή ( δηλαδή για δεδομένο  $1^\wedge$ , ο βέλτιστος ψεκασμός επιτυγχάνεται με το να γίνει η διάμετρος  $D_p$  του αρχικού πίδακα, που μετατρέπεται αρχικά το καύσιμο σε λεπτό στρώμα, όσο μεγαλύτερη γίνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί αύξηση στο  $D_p$  μειώνει το πάχος του στρώματος 1, το οποίο με τη σειρά του μειώνει το μέσο μέγεθος σταγόνας. ( $SMD = f(t^{0.4})$ ).
7. Στους air blast ψεκαστές, με αρχική μετατροπή του καυσίμου σε λεπτό στρώμα, η διαδικασία ψεκασμού ολοκληρώνεται σε μία απόσταση περίπου ίση με  $1.5 D_p$ . Πιο μπροστά από αυτήν την απόσταση το μέσο μέγεθος σταγόνας αυξάνει λόγω της εξαέρωσης και πιθανώς λόγω της ένωσης σταγόνων.
8. Ελάχιστα μεγέθη σταγόνων επιτυγχάνονται με τη χρήση ψεκαστών που σχεδιάστηκαν να προσφέρουν μέγιστη επαφή μεταξύ του αέρα και του υγρού. Με τους ψεκαστές που κάνουν αρχική μετατροπή του καυσίμου σε λεπτό στρώμα, ο βέλτιστος ψεκασμός επιτυγχάνεται με την παραγωγή του λεπτότερου δυνατού υγρού στρώματος. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι το χείλος ψεκασμού θα πρέπει να έχει τη μέγιστη δυνατή διάμετρο. Είναι επίσης σημαντικό να εξασφαλίσουμε ότι το στρώμα αυτό στο χείλος ψεκασμού υπόκειται στην επίδραση του αέρα και από τις δύο πλευρές. Αυτό όχι μόνο εξασφαλίζει τον καλύτερο ψεκασμό αλλά και αποκλείει την επικάθηση σταγόνων σε παρακείμενες στερεές επιφάνειες.
9. Η απόδοση των air blast ψεκαστών με αρχική μετατροπή του καυσίμου σε λεπτό

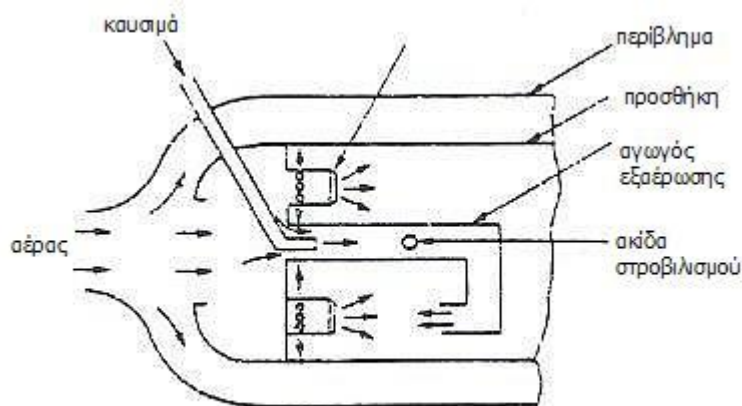
στρώμα, είναι καλύτερη από αυτή των επιπέδων ψεκαστών ιδίως κάτω από αντίξοες συνθήκες μικρού λόγου αέρα/ υγρού και/ ή μικρής ταχύτητας αέρα.

10. Τουλάχιστον δύο διαφορετικοί μηχανισμοί εμπλέκονται, στον ψεκασμό air blast και η σχετική τους σημασία εξαρτάται κυρίως από το ιξώδες του υγρού. Όταν ένα καυσίμου μικρού ιξώδους εγχύεται σε αέρα μικρής ταχύτητας, παράγονται κύματα στην επιφάνεια του υγρού. Η επιφάνεια αυτή γίνεται ασταθής και μετατρέπεται σε κομμάτια. Τα κομμάτια αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, δημιουργώντας συνδέσμους οι οποίοι με τη σειρά τους σπάνε σε σταγόνες. Με αύξηση της ταχύτητας του αέρα τα στρώματα του υγρού διαλύονται γρήγορα έτσι ώστε οι σύνδεσμοι να σχηματίζονται κοντά στο χείλος. Αυτοί οι σύνδεσμοι τείνουν να γίνουν λεπτότεροι και μικρότεροι και διαλύονται σε μικρότερες σταγόνες. Για υγρά με μεγάλο ιξώδες δεν εμφανίζονται κύματα στην επιφάνεια. Αντίθετα το υγρό εξέρχεται από το χείλος ψεκασμού με τη μορφή μακριών συνδέσμων. Ο ψεκασμός συμβαίνει μακριά από το χείλος, σε περιοχές με μικρή σχετικά ταχύτητα για αυτό και οι σταγόνες είναι μεγαλύτερες.

#### **4.12. ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΞΑΕΡΩΣΗΣ**

Ως εναλλακτική λύση του ψεκασμού, ένας άλλος τρόπος προετοιμασίας του καυσίμου για καύση, είναι η θέρμανση του πάνω από το σημείο βρασμού των βαρέων H/C που το συνιστούν, έτσι ώστε ολόκληρο να μετατραπεί σε ατμό πριν την καύση. Συστήματα εξαέρωσης χρησιμοποιήθηκαν στους αεροκινητήρες για πολλά χρόνια. Στην πραγματικότητα στους πρώτους θαλάμους καύσης τύπου Whittle, το καύσιμο θερμαινόταν σε σωλήνες που βρίσκονταν στη ζώνη καύσης. Το θερμαινόμενο καύσιμο διατηρούταν σε μεγάλη πίεση έτσι ώστε να μην εξαερωθεί, πρώτου εγχυθεί μέσω ακροφυσίου και μειωθεί η πίεση του στην τιμή της πίεσης καύσης- Αυτή η μέθοδος εξαέρωσης, που καλείται ταχεία εξαέρωση, χρησιμοποιείται πολύ σπάνια στις μέρες μας, εξαιτίας των προβλημάτων της θερμικής διάσπασης και των στερεών επικαθίσεων, στο εσωτερικό των σωλήνων και εξαιτίας των δυσχερειών στον έλεγχο της ροής του καυσίμου.

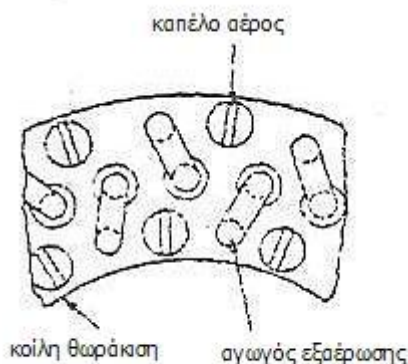




#### 4.14. ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΞΑΕΡΩΣΗΣ

Άλλος, πιο εύκολος τρόπος εξαέρωσης του καυσίμου, είναι η έγχυση του, μαζί με ποσότητα αέρα, μέσα σε σωλήνες που είναι εμβαπτισμένοι στη φλόγα. Το εγχυόμενο μείγμα αέρα-καυσίμου, θερμαίνεται από τα τοιχώματα του σωλήνα, κάτω από ιδανικές συνθήκες και προκύπτει μείγμα εξαερωμένου καυσίμου-αέρα. Τέτοια διαμόρφωση, που φαίνεται στο σχ. 4.14, χρησιμοποιεί και ο J-65.

Όλα τα συστήματα αυτού του τύπου αποτελούνται βασικά από ένα δίσκο με επίπεδο άκρο ή ένα στρογγυλεμένο θόλο στην μπροστά πλευρά του οποίου είναι τοποθετημένοι οι σωλήνες εξαέρωσης και οι δίοδοι αέρα. Σε μεγάλους Δακτυλιοειδής θαλάμους καύσης, οι σωλήνες εξαέρωσης είναι τοποθετημένοι σε δύο σειρές, όπως φαίνεται στο σχ. 4.15. Το πλήθος τους φτάνει τις 24 και έχουν το σχήμα J. Το μεγαλύτερο άκρο του σωλήνα έχει μήκος 100-120 mm και διάμετρο 20-30 mm. Σε ορισμένα συστήματα το άκρο αυτό περιέχει μια σφήνα ως εμπόδιο για την αύξηση της τύρβης και τη βελτίωση της μείξης καυσίμου-αέρα. Κατά μήκος της εσωτερικής και εξωτερικής περιμέτρου του δίσκου υπάρχουν δίοδοι αέρα με ύψος 10-20 mm και 30 mm διάμετρο. Μια σχισμή με 5-10 mm περίπου βάθος κόβεται κατά μήκος όλου του άκρου της διόδου. Το πλήθος των διόδων αυτών είναι ίσο με το πλήθος των σωλήνων εξαέρωσης.



#### 4.15. ΚΑΤΟΨΗ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΞΑΕΡΩΣΗΣ

Ο λόγος αέρα/ καυσίμου, μέσα στις σωλήνες, είναι συνήθως 3 και η ταχύτητα του αέρα γύρω στα 40 m/sec. Ο παραμένων από την καύση αέρας, περνά μέσω των σχισμών, στις διόδους του σέρα και αντιδρά με το μείγμα καυσίμου-αέρα, που εξάγεται από τις σωληνώσεις. Η καύση λαμβάνει χώρα μπροστά και γύρω από τις σωλήνες. Μια απλή μορφή ηλεκτρικού σπινθηριστή χρησιμοποιείται για την έναρξη της καύσης.

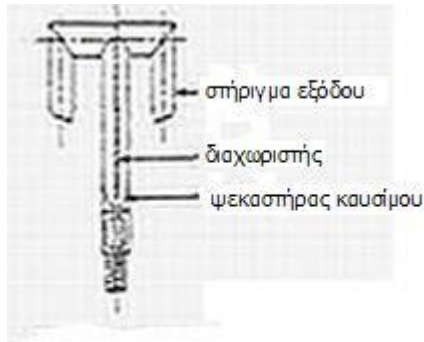
Για μικρούς θαλάμους καύσης, που δεν είναι δυνατός μεγάλος αριθμός εγχυτήρων, χρησιμοποιούνται σωλήνες εξαέρωσης τύπου T, αφού διπλασιάζονται τα σημεία εγχύσεως. Στο σχ. 4.16 δείχνει τον εξαερωτή που έχει σχεδιάσει η Lycopring. Αποτελείται από ένα χώρισμα που διατρέχει κατά μήκος στο κέντρο το σκέλος εισαγωγής και στην ουσία σχηματίζει δύο J, με το ένα πλάτη στο άλλο, με κοινή εισαγωγή. Η απλότητα στην κατασκευή οδήγησε σε μια μεγάλη ποικιλία διαμορφώσεων. Ο τύπος "μανιπάρι" φαίνεται στο σχ 4.17 που δείχνει δύο εναλλακτικές μεθόδους.

Τα πλεονεκτήματα που εμφανίζουν τα συστήματα εξαέρωσης είναι:

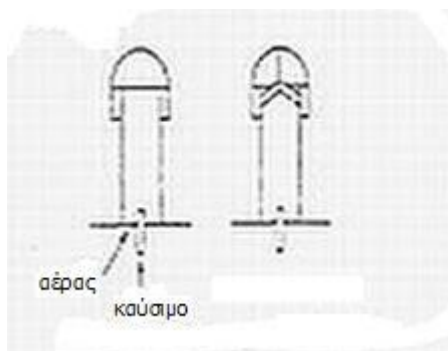
1. Ο μειωμένος σχηματισμός αιθάλης εξαιτίας της προανάμειξης αέρα και καυσίμου, στις σωλήνες εξαέρωσης.
2. Δεν απαιτείται μεγάλη πίεση έγχυσης.
3. Τα συστήματα εξαέρωσης είναι απλούστερα και φθηνότερα από τους ψεκαστές διπλής οπής.
4. Η κατανομή του καυσίμου στη ζώνη καύσης δεν μεταβάλλεται με την παροχή του, στο βαθμό που μεταβαλλόταν με τους ψεκαστές διπλής οπής.

Όμως υπάρχουν και κάποια σοβαρά μειονεκτήματα στη χρήση συστημάτων εξαέρωσης. Ένα είναι η ανικανότητα τους με λόγους μείγματος τόσο μικρούς όσο αυτούς που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τα συστήματα ψεκασμού. Επιπλέον υπάρχει αυξημένος κίνδυνος θερμικής αστοχίας των σωλήνων, ειδικά στις μεγάλες πιέσεις λειτουργίας του θαλάμου καύσης. Στη συγκεκριμένη

περίπτωση χρειάζεται ηλεκτρικός σπινθηριστής σε συνδυασμό με βοηθητικό spray για την επίτευξη εκκίνησης. Πρόβλημα επίσης αντιμετωπίζεται με τις μεταβολές του τύπου του καυσίμου.



#### 4.16. AVCO LYCOMING T ΛΥΧΝΙΑΣ ΕΞΑΕΡΩΣΗΣ



#### 4.17. ΕΞΑΕΡΙΣΤΗΣ « ΜΑΝΙΤΑΡΙ»

Στους συγχρόνους κινητήρες, ο εξαερωτής εμφανίζεται να λειτουργεί περισσότερο ως κατανομητής καυσίμου. Το μεγαλύτερο μέρος του καυσίμου επικάθεται στο θόλο καύσης, όπου είτε εξαερώνεται είτε ψεκάζεται με τον αέρα (air blast ψεκαστής), που ρέει από το πλήθος των οπών του θόλου.

Μία άλλη μορφή συστήματος εξαέρωσης κατανέμει το καύσιμο κατά μήκος του τοιχώματος ενός θαλάμου προ-εξαέρωσης και μετά εξαερώνεται από το τοίχωμα με τη βοήθεια μιας στροβιλώδους ροής αέρα. Πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι η πιθανότητα προ-εξαέρωσης

του καυσίμου και προανάμειξης του με τον αέρα, πριν την καύση, εξασφαλίζοντας έτσι ελάχιστο σχηματισμό αιθάλης και με συνθήκες μικρού λόγου ισοδυναμίας, μικρές εκπομπές ΝΟx. Μειονέκτημα του συστήματος είναι οι επικαθίσεις στα τοιχώματα με τη χρήση βαριών καυσίμων.

#### **4.13. ΕΓΧΥΣΗ ΑΕΡΙΩΝ**

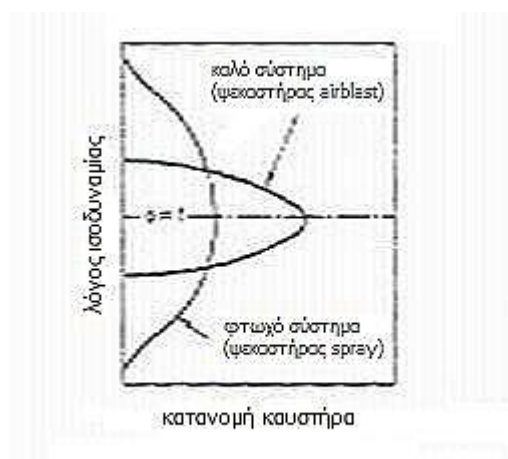
Δεδομένου ότι η ενεργειακή πυκνότητα των αέριων είναι αρκετά υψηλή, (όχι μικρότερη από 6 MJ/m<sup>3</sup>) η χρήση τους δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα προβλήματα, από πλευράς καύσης. Χαρακτηρίζονται από "καθαρή" καύση, με μικρούς ρυθμούς σχηματισμού αιθάλης και οξειδίων του αζώτου. Το βασικό πρόβλημα είναι η επίτευξη του βέλτιστου επιπέδου ανάμειξης, στη ζώνη καύσης. Πολύ υψηλός ρυθμός ανάμειξης παράγει στενά όρια ευστάθειας ενώ αν ο ρυθμός ανάμειξης είναι πολύ χαμηλός, το σύστημα είναι επιρρεπές σε παγωμένες από την καύση μεταβολές της πίεσης. Για κινητήρες που έχουν σχεδιασθεί να λειτουργούν και με υγρά και με αέρια καύσιμα, είναι σημαντική η ταύτιση της ροής του αερίου με αυτή του υγρού. Διαφορετικά μπορεί να παρατηρηθεί μεταβολή στην κατανομή της θερμοκρασίας των καυσαερίων κατά την αλλαγή από το ένα καύσιμο στο άλλο. Σε αυτή τη χρονική περίοδο πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στον έλεγχο των παροχών των δύο καυσίμων για να αποφευχθεί ή το σβήσιμο του κινητήρα ή η υπερθέρμανση του.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για έγχυση αερίων καυσίμων μέσα στο θάλαμο καύσης, περιλαμβάνουν επίπεδες οπές, σχισμές στροβίλους και ακροφύσια Venturi.

#### **4.14. ΣΧΕΤΙΚΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΓΧΥΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

Η επίδραση της έγχυσης του καυσίμου στα όρια της ευστάθειας της καύσης και ρυθμούς έκλυσης θερμότητας φαίνονται στο σχ. 4.18. Αυτό περιλαμβάνει δύο τυπικές καμπύλες ευστάθειας, που αφορούν θαλάμους καύσης. Η μία παριστάνει ομοιόμορφη ανάμειξη, όπως προκύπτει για παράδειγμα από ένα air blast ψεκαστή και η άλλη φτωχή ανάμειξη, όπως συμβαίνει με τις περισσότερες μορφές έγχυσης με πίεση. Με ομοιόμορφα μείγματα, η μέγιστη έκλυση θερμότητας βρίσκεται αρκετά ψηλά, το πεδίο όμως όπου η καύση είναι δυνατή είναι αρκετά στενό και το μέγεθος του εξαρτάται από τη θερμοκρασία και ταχύτητα του εισαγόμενου του αέρα. Στη φτωχή ανάμειξη, η μέγιστη ογκομετρική τιμή της θερμότητας είναι αρκετά μικρή. Παρά το γεγονός ότι στο σημείο αυτό ο λόγος ισοδυναμίας είναι ίσος με τη μονάδα, η μικρή κατανομή του καυσίμου αναγκάζει ένα μεγάλο μέρος της διαδικασίας της καύσης να επιτελεσθεί με αναλογίες μειγμάτων που έχουν πολύ μεγαλύτερη ή πολύ μικρότερη τιμή από τη στοιχειομετρική. Όμως με τη φτωχή ανάμειξη, ακόμα και όταν ο ολικός λόγος καυσίμου/ αέρα στη ζώνη καύσης έχει τιμή έξω από τα όρια ευφλεκτότητας, η καύση μπορεί να συνεχισθεί διότι ανόμοια κατανομή καυσίμου

δημιουργεί περιοχές όπου ο τοπικός λόγος καυσίμου/ αέρα είναι κοντά στο στοιχειομετρικό. Για αυτό και οι ψεκαστές πίεσης χαρακτηρίζονται από ευρέα όρια ευστάθειας και ειδικότερα με πολύ καλό φτωχό σημείο σβέσης.



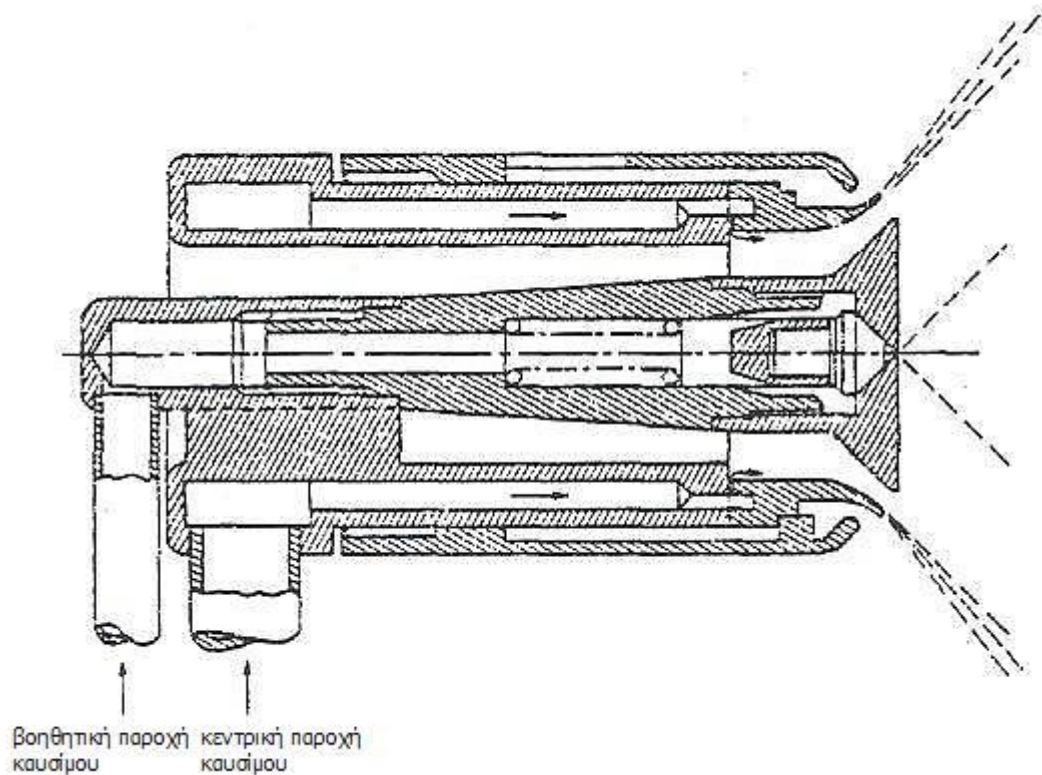
#### 4.18. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ ΑΕΡΑ-ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΕ ΣΤΑΘΕΡΑ ΟΡΙΑ

Η αναγνώριση των περιορισμών των ψεκαστών πίεσης (ειδικά σε κινητήρες με μεγάλο λόγο συμπίεσης) οδήγησε στην ευρεία χρήση των air blast ψεκαστών, οι οποίοι εμφανίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την εξαφάνιση των εκπομπών καπνού, την απαίτηση μικρής πίεσης καυσίμου, την αυξημένη μηχανική αξιοπιστία και τη μικρή επίδραση του ιξώδους του καυσίμου. Τα στενά όρια ευστάθειας μπορούν να αντιμετωπισθούν με τη χρήση ενός βοηθητικού ή υβριδικού συστήματος που να συνδυάζει και ψεκασμό με πίεση και air blast. Στην εκκίνηση όλο το καύσιμο παρέχεται από τον ψεκασμό πίεσης, ο οποίος συνήθως είναι ένα ακροφύσιο simplex ή επίπεδης ροής. Για την κανονική λειτουργία, κάποιο ποσοστό του καυσίμου εξακολουθεί να παρέχεται από τον ίδιο ψεκαστή αλλά το μεγαλύτερο μέρος παρέχεται από τον air blast. Με αυτό τον τρόπο αφενός κάνουμε χρήση των πλεονεκτημάτων των ψεκαστών πίεσης, στις μικρές παροχές καυσίμου (κυρίως εύκολη εκκίνηση, ικανοποιητικός βαθμός απόδοσης καύσης, υψηλό φτωχό σημείο σβέσης) ενώ οι αδυναμίες που εμφανίζουν στις μεγάλες παροχές (φλόγα μεγάλης φωτεινότητας, αυξημένες εκπομπές καπνού, αστάθεια λειτουργίας στις μεταβολές της ροής) δεν επηρεάζουν σχεδόν καθόλου. Ένας βοηθητικός air blast ψεκαστής φαίνεται στο σχ. 4.19.

#### **4.15. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ**

Είναι πλέον από όλους αναγνωρισμένη η μέγιστη σημασία της έγχυσης του καυσίμου ή όπως αλλιώς καλείται της προετοιμασίας του καυσίμου, σε όλους τους τομείς απόδοσης καύσης. Ως ολοκληρωμένο και αυτοτελές κομμάτι στη σχεδίαση των θαλάμων καύσης, μπορούμε να διακρίνουμε τις μελλοντικές εξελίξεις και βελτιώσεις. Οι απαιτήσεις από όλους τους κινητήρες για λιγότερες εκπομπές ρύπων, ειδικά NOx και καπνού, έχουν σαν αποτέλεσμα να δίνεται μεγαλύτερη

έμφαση στην επίτευξη πλήρους εξαέρωσης του καυσίμου και πλήρους ανάμειξης του με τον αέρα, πριν την καύση. Αυτές οι απαιτήσεις όμως από την άλλη δημιουργούν προβλήματα σβέσης του κινητήρα και μπορεί να απαιτηθεί ή τεχνολογία μεταβλητής γεωμετρίας και/ ή σταδιακή έγχυση καυσίμου προκειμένου να τα αντιμετωπίσουμε.



#### 4.19. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟΣ ΒΑΣΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΨΕΚΑΣΤΗΡΑ AIR BLAST

Τα εναλλακτικά καύσιμα που ερευνώνται, για εφαρμογή στους αεροκινητήρες, απαιτούν πλήρη και τέλειο ψεκασμό, προκειμένου να εξασφαλίσουν ικανοποιητική απόδοση, όσον αφορά τους τομείς της εκκίνησης της απόδοσης καύσης και των χαμηλών εκπομπών ρύπων. Την ίδια ώρα όμως η υψηλή περιεκτικότητα των καυσίμων αυτών σε αρωματικές ενώσεις, αυξάνει θεαματικά τα προβλήματα που προκύπτουν από την αύξηση της έκλυσης και από την έμφραξη των περασμάτων του καυσίμου από το σχηματισμό κολλοειδών ουσιών. Ωστόσο είναι βέβαιο ότι στο μέλλον ο ρόλος του εγχυτή καυσίμου θα συνεχίζει να είναι μείζονος σημασίας αναζητώντας συνέχεια ανάπτυξη και έρευνα.

#### **4.16. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΕΓΧΥΤΗΡΑ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΥΨΗΛΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΠΑ**

##### **ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΟ ΚΙΝΗΤΗΡΑ**

Οι προηγμένοι αεροκινητήρες, υψηλής απόδοσης, με στρατιωτικές εφαρμογές, έχουν σαν κύριες απαιτήσεις αφενός τον αυξημένο λόγο συμπίεσης, για καλύτερη απόδοση του κύκλου και αφετέρου τη χρήση του καυσίμου ως δεξαμενής απορρόφησης θερμότητας, που αναπτύσσεται και στη δομή του αεροσκάφους αλλά και στον κινητήρα. Αυτές οι κύριες απαιτήσεις έχουν ως άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση των θερμοκρασιών εισόδου, στο θάλαμο καύσης, και του αέρα αλλά και του καυσίμου. Ωστόσο τα προηγμένα συστήματα έγχυσης θα είναι ικανά να λειτουργήσουν με επιτυχία μέσα σε αυτό το εχθρικό, λόγω αυξημένης θερμοκρασίας, περιβάλλον.

Οι βασικοί σχεδιαστικοί στόχοι των προηγμένων εγχυτήρων καυσίμου είναι:

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ :	1150 K
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΥΣΙΜΟΥ :	450 K
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ :	ΠΑ ΟΛΟ ΤΟ ΦΑΚΕΛΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ
ΕΠΙΠΕΔΑ ΚΑΠΝΟΥ :	ΑΟΡΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ JP-5 ΚΑΙ 12.5% H <sub>2</sub> ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ
ΟΡΙΟ ΖΩΗΣ :	ΤΟ ΟΡΙΟ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ
ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΗΣ	
ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ :	JP-5

Το πρώτο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται στη σχεδίαση των εγχυτήρων υψηλής θερμοκρασίας, είναι το φαινόμενο της μεταβολής του καυσίμου σε κοκ. Ο σχηματισμός του κοκ είναι βασικά ο σχηματισμός αδιάλυτων H/C στο καύσιμο, λόγω αυτοοξειδωσης. Έχει δε σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση επικαθίσεων, συνήθως στερεού C, στις διόδους του καυσίμου. Ο σχηματισμός του κοκ εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως τη θερμοκρασία των τοιχωμάτων του θαλάμου καύσης, τον ολικό όγκο του καυσίμου που διαρρέει το σύστημα, το χρόνο παραμονής του καυσίμου σε υψηλές θερμοκρασίες και τη θερμική ευστάθεια του καυσίμου.

Υπάρχουν τέσσερις βασικές προσεγγίσεις στο καιρίο ζήτημα της ελαχιστοποίησης του σχηματισμού του κοκ στον εγχυτήρα :

1. Επιλογή πιο θερμικά ευσταθούς καυσίμου.
2. Ψύξη του εγχυτήρα με καύσιμο ή αέρα, μέσω ενός ξεχωριστού κυκλώματος ψύξης.
3. Βελτίωση της γεωμετρίας και της θερμικής προστασίας των διόδων του καυσίμου.

4. Επεξεργασία των επιφανειών των διόδων του καυσίμου ώστε να εμποδίζουν το σχηματισμό του κοκ.

Το κλειδί στην επίτευξη των σχεδιαστικών επιδιώξεων είναι η καλή ψύξη του εγχυτήρα. Η ανάλυση της μετάδοσης θερμότητας έδωσε τις Βασικές κατευθύνσεις για τη μείωση της θερμοκρασίας των τοιχωμάτων :

1. Μείωση της επιφάνειας διόδου της ροής καυσίμου

- Αυξάνει την ταχύτητα καυσίμου
- Αυξάνει τους συντελεστές μετάδοσης θερμότητας
- Μειώνει τη θερμοκρασία των τοιχωμάτων
- Μειώνει το χρόνο παραμονής του καυσίμου σε υψηλές θερμοκρασίες

2. Προσθήκη κενών αέρα

- Μέταλλα με κενά αέρος είναι πιο αποτελεσματικά από τα στερεά κεραμικά

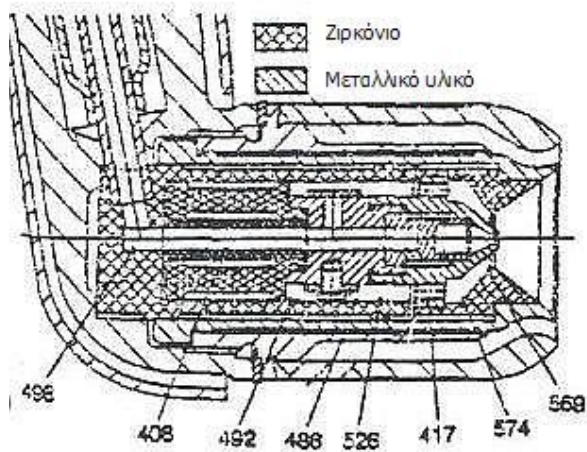
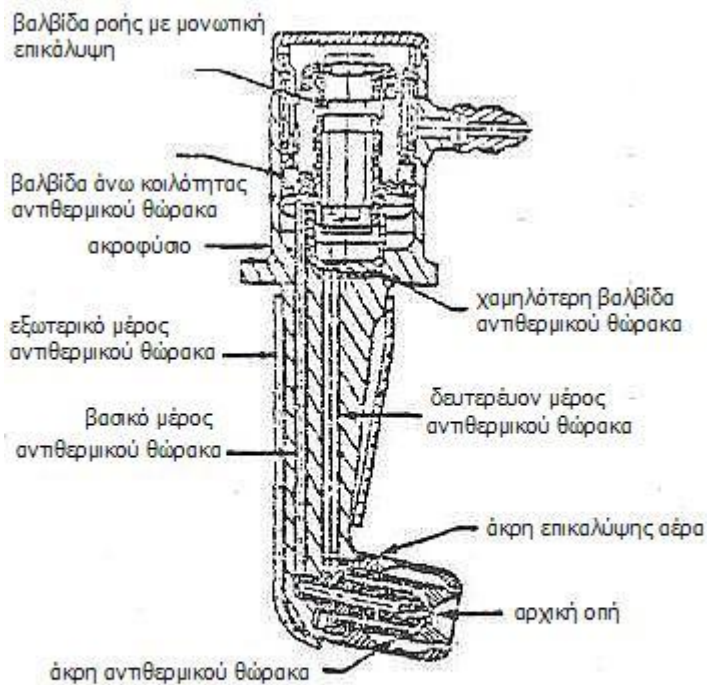
3. Αντικατάσταση μεταλλικών μερών με κεραμικά

- Κεραμικά σε συνδυασμό με κενά αέρος

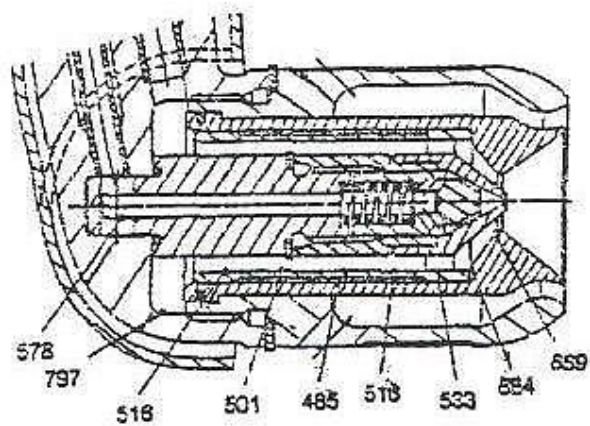
4. Αποφυγή στροφών και άλλων εμποδίων στη ροή του καυσίμου

- Προκαλούν την εμφάνιση περιοχών στο καύσιμο όπου οι συντελεστές μετάδοσης θερμότητας είναι χαμηλοί και συνεπώς η θερμοκρασία των τοιχωμάτων υψηλή
- Αποτελούν ιδανικές περιοχές για το σχηματισμό κοκ.





Καινοτόμο Ακροφύσιο



Βασική μορφή Ακροφύσιου

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### ΑΝΑΦΛΕΞΗ

## **5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Βασική σημασία σε ένα κινητήρα είναι η εύκολη και αξιόπιστη εκκίνηση σε συνθήκες στατικές όταν στον κινητήρα παρέχεται η απαραίτητη ισχύς. Για τους αεροπορικούς κινητήρες επιπλέον απαραίτητη είναι και η δυνατότητα γρήγορης επανεκκίνησης στην πτήση μετά από κράτηση του κινητήρα. Κάτω από αντίξοες καιρικές συνθήκες, είτε στην απογείωση από Βρεγμένο διάδρομο υπάρχει μεγάλος κίνδυνος απορρόφησης αρκετής ποσότητας νερού ή πάγου. Το σύστημα ανάφλεξης θα πρέπει να εξασφαλίσει άμεση επανεκκίνηση στην περίπτωση σβέσης.

Η ανάφλεξη ενός εύφλεκτου μείγματος μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους για παράδειγμα με ένα ηλεκτρικό σπινθηριστή ή με επαφή με μια καυτή επιφάνεια ή σε κάθε άλλη εξωτερική πηγή θερμότητας αλλά και με την αύξηση της θερμοκρασίας ή πίεσης πάνω από κάποια όρια πέρα από τα οποία έχουμε αυτανάφλεξη. Στους αεροκινητήρες συνήθως χρησιμοποιούμε τον ηλεκτρικό σπινθηριστή και αυτό γιατί απαιτούνται μεγάλα ποσά ενέργειας προκειμένου να αναφλέγουν ετερογενή μείγματα και τυρβώδεις ροές που έχουν ταχύτητες της τάξης των 25 m/sec.

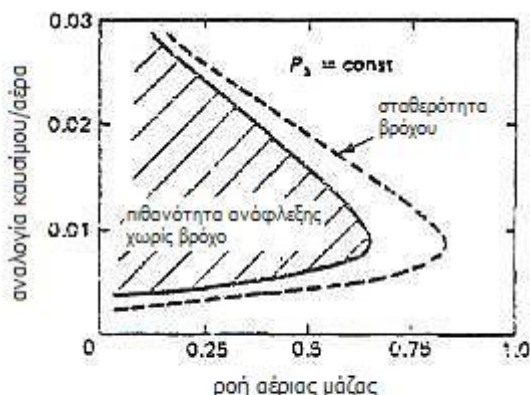
Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει λεπτομερή πειράματα για τον προσδιορισμό της επίδρασης των ηλεκτρικών και ροϊκών παραμέτρων στην ελάχιστη ενέργεια σπινθήρα, μέσα στα μείγματα σταγονιδίων καυσίμου και αέρα. Αυτές οι μελέτες επέτρεψαν να καταλάβουμε τη διαδικασία ανάφλεξης και μας παρέθεσαν χρήσιμες πληροφορίες για τη σχέση των χαρακτηριστικών της ανάφλεξης με όλες τις μεταβλητές λειτουργίας του κινητήρα. Έτσι έχει δειχθεί ότι η ανάφλεξη είναι πιο εύκολη με την αύξηση της πίεσης, της θερμοκρασίας και της ενέργειας του σπινθήρα αλλά παρεμποδίζεται από την αύξηση της τύρβης και της ταχύτητας. Επίσης παρατηρήθηκε ότι η απόδοση της καύσης επηρεάζεται σημαντικά από τις ιδιότητες του καυσίμου γύρω από τη συγκέντρωση των αερίων του καυσίμου στην περιοχή του σπινθηριστή. Έτσι μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα η επίδραση της πτητικότητας στους ρυθμούς εξαέρωσης αλλά και η επίδραση του ιξώδους, στο μέσο μέγεθος σταγόνας του καυσίμου. Το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για την ανάφλεξη είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό που χρησιμοποιείται για αέρια καύσιμα με στοιχειομετρικό λόγο καυσίμου/ αέρα. Το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για την ανάφλεξη είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό που χρησιμοποιείται για αέρια καύσιμα με στοιχειομετρικό λόγο καυσίμου/ αέρα. Μεγάλο μέρος αυτής της επιπλέον ενέργειας απορροφάται για την εξαέρωση των σταγονιδίων του καυσίμου ενώ το κανονικό ποσό εξαρτάται από την κατανομή του καυσίμου στην πρωτογενή ζώνη αλλά και την ποιότητα ψεκασμού.

Οι συνεχείς προσπάθειες για μεγαλύτερες ταχύτητες πτήσης και μεγαλύτερους λόγους συμπίεσης δημιούργησαν άσχημες συνθήκες για την πραγματοποίηση της ανάφλεξης. Επιπλέον αυξήθηκαν και οι απαιτήσεις για βελτίωση των επιδόσεων, του ορίου ζωής και της αξιοπιστίας του συστήματος ανάφλεξης. Για αυτό και το πρόβλημα της ανάφλεξης ειδικά στους αεροπορικούς

κινητήρες χρήζει ειδικής προσοχής.

## **5.2. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ**

Η απόδοση της ανάφλεξης σε ένα αεροπορικό κινητήρα εκφράζεται συνήθως σε σχέση με τις συνθήκες πτήσης κάτω από τις οποίες μπορεί να ξαναρχίσει η καύση μετά από μία κράτηση κινητήρα σε κάποιο ύψος. Για να καθορισθούν οι ικανότητες επανάφλεξης ενός κινητήρα είναι απαραίτητο να γίνουν πειράματα στα οποία οι συνθήκες εισαγωγής να εξομοιώνουν τις συνθήκες πτήσης. Κρατώντας σταθερά την πίεση, θερμοκρασία και τη μάζα του αέρα στην είσοδο του θαλάμου καύσης, δοκιμάζουμε την ανάφλεξη για διάφορες τιμές του λόγου καυσίμου/ αέρα. Επιτυχημένη ανάφλεξη θεωρείται η διαδικασία κατά την οποία η καύση συνεχίζεται κανονικά μετά τη σβέση της πηγής ενέργειας. Ο μέγιστος χρόνος για κάθε δοκιμή είναι 10 sec σπινθηρισμού αλλά επιτυγχάνονται και χρόνοι γύρω στα 3 sec. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για διάφορες τιμές της παροχής της μάζας μέχρι να σχηματισθεί η καμπύλη ανάφλεξης. Ένα τυπικό παράδειγμα φαίνεται στο σχ. 5.1. Συνήθως μεταξύ 4 και 6 καμπυλών ανάφλεξης, που σχηματίζονται για διαφορετικές τιμές πίεσης, είναι αρκετές για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών επανάφλεξης.



### 5.1. ΤΥΠΙΚΗ ΚΑΥΣΗ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΒΡΟΧΟΥ

## **5.3. ΑΝΑΦΛΕΞΗ ΜΕ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ**

Για τους αεροκινητήρες η πιο ικανοποιητική και βολική μέθοδος ανάφλεξης είναι η ηλεκτρική εκκένωση, όπως ο σπινθήρας ή το βολταικό τόξο. Ωστόσο η ενέργεια του σπινθήρα συγκεντρώνεται σε ένα σχετικά μικρό όγκο. Επίσης απόλυτος έλεγχος μπορεί να ασκηθεί όσο αφορά το ποσό της ενέργειας και τη διάρκεια της εκκένωσης.

Ένα κοινό σύστημα ανάφλεξης αποτελείται από μια γεννήτρια, καλώδιο που συνδέει τον αναφλεκτήρα και σπινθηροπαγωγό και τέλος τον αναφλεκτήρα. Η λειτουργία ενός τέτοιου

συστήματος είναι η απορρόφηση ενέργειας από μια ηλεκτρική πηγή και η απόδοση της, μέσω του αναφλεκτήρα, με τη μορφή παλμών μικρής διάρκειας. Δύο τύποι συστημάτων ανάφλεξης χρησιμοποιούνται σήμερα. Το ένα αποτελείται από μία μονάδα υψηλής τάσης, που παράγει τάση από 12 έως 15 KV, ενώ η αποδιδόμενη ενέργεια είναι της τάξης των 50 mJ, γύρω από τον σπινθηριστή, με ένα ρυθμό αναφλέξεων γύρω στις 300 ανά λεπτό.

Ο δεύτερος τρόπος είναι σύστημα υψηλής ενέργειας. Η χρησιμοποιούμενη τάση είναι συνήθως 2 kv. Η διαφορά με το παραπάνω σύστημα είναι ότι η ενέργεια δεν πηγαίνει απευθείας στον αναφλεκτήρα αλλά πρώτα αυξάνει μετά από μια σειρά διαδικασιών. Για μικρούς κινητήρες έχουμε έκλυση ενέργειας 2 J περίπου, με ρυθμό σπινθηρισμού 250 ανά λεπτό.

Το σύστημα υψηλής ενέργειας είναι πιο αποδοτικό όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ένα σπινθηριστή επιφανείας. Αυτός αποτελείται από ένα κεντρικό και ένα στερεωμένο εξωτερικό ηλεκτρόδιο. Μεταξύ τους παρεμβάλλεται ένας κεραμικός μονωτής, ο οποίος καταλήγει στην άκρη σε ένα λεπτό ημιαγωγό. όπως φαίνεται στο σχ. 5.2.



## 5.2. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ ΑΝΑΦΛΕΚΤΗΡΑ

Η λειτουργία του ημιαγωγού είναι η διευκόλυνση του ιονισμού μέσα στην περιοχή του αναφλεκτήρα και επιτρέπει οι σπινθήρες να παράγονται από πηγές ενέργειας με σχετικά μικρή τάση. Σημαντικό χαρακτηριστικό είναι επίσης ότι η ηλεκτρική αντίσταση του ημιαγωγού μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό σημαίνει ότι όταν εφαρμόζεται τάση και το ρεύμα κυκλοφορεί μέσα σε ένα λεπτό νήμα, το οποίο γρήγορα λευκοκυρώνεται, παρέχεται κατά μήκος των ηλεκτροδίων μια περιοχή ιονισμού. Όταν ο ιονισμός συμβεί, εμφανίζεται η κύρια εκκένωση με τη μορφή ενός ισχυρού βολταϊκού τόξου.

### **5.3.a. ΟΡΙΟ ΖΩΗΣ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ**

Έχει αποδειχθεί ότι η συνεχόμενη αύξηση της επιχειρησιακής ζωής των κινητήρων απαιτεί ότι ο σπινθηριστής θα λειτουργεί για όλη τη διάρκεια ζωής του κινητήρα, αφού το κόστος συντήρησης και οι απρογραμμάτιστες αλλαγές θα πρέπει να μειωθούν στο ελάχιστο. Αν αυτό είναι δυνατό τότε ο αναφλεκτήρας θα πρέπει να λειτουργεί ικανοποιητικά τουλάχιστον μέχρι κάποιον από τους περιοδικούς ελέγχους.

Η εμπειρία έχει δείξει ότι το όριο ζωής ενός σπινθηριστή επιφανειακής εκκένωσης εξαρτάται αφενός από την έκλυση της ενέργειας σε αυτόν και αφετέρου από τις συνθήκες λειτουργίας. Κάθε σπινθήρας προκαλεί ένα μικρό χτύπημα στα ηλεκτρόδια, τα οποία σιγά-σιγά διαβρώνονται ώσπου παύουν να έρχονται σε επαφή με τον ημιαγωγό. Είναι φανερό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια του σπινθήρα τόσο πιο γρήγορος ο ρυθμός της διάβρωσης.

Η ζωή του αναφλεκτήρα μπορεί να διευρυνθεί με την αύξηση της διαμέτρου του κεντρικού ηλεκτροδίου, αυξάνοντας προφανώς τον όγκο του μετάλλου που πρόκειται να διαβρωθεί. Όμως επειδή δεν επιθυμούμε την αύξηση της αεροδυναμικής έμφραξης της ροής από το σπινθηριστή, η εξωτερική διάμετρος πρέπει να παραμείνει σταθερή. Έτσι το εσωτερικό ηλεκτρόδιο μπορεί να αυξηθεί μόνο σε βάρος του κενού που υπάρχει ενδιάμεσα. Το γεγονός αυτό με τη σειρά του μειώνει την ενέργεια σπινθηρισμού πράγμα που αυξάνει τη ζωή του σπινθηριστή. Πειραματικά έχει βρεθεί ότι μείωση της ενέργειας σπινθήρα κατά 4 φορές αυξάνει το όριο ζωής του αναφλεκτήρα 5 φορές.

Εξίσου σημαντικές στη ζωή του αναφλεκτήρα είναι και οι συνθήκες που επικρατούν στην πρωτογενή ζώνη. Στους κινητήρες με υψηλό λόγο συμπίεσης ο ρυθμός μετάδοσης της θερμότητας στην μετωπική επιφάνεια του σπινθηριστή μπορεί να είναι τόσο υψηλός ώστε να οδηγήσει σε υπερθέρμανση των ηλεκτροδίων. Οποιαδήποτε αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από τους 880 K προκαλεί δραματική μείωση στο όριο ζωής του σπινθηριστή. Αυτό οφείλεται στην οξειδωση η οποία επιταχύνει τη διάβρωση και προκαλεί την απώλεια της επαφής μεταξύ των ηλεκτροδίων και του ημιαγωγού.

Άλλος ένας παράγοντας που επηρεάζει τη ζωή του ημιαγωγού είναι η χημική σύσταση των εμπλεκόμενων αερίων. Στο παρελθόν αυτό το γεγονός είχε αρνητικές συνέπειες και για αυτό τα υλικά του ημιαγωγού διαλέγονταν ώστε να είναι ικανά να αντεπεξέλθουν στις υπάρχουσες συνθήκες. Σήμερα όμως εξαιτίας της τάσης για μικρότερες πρωτογενείς ζώνες, τα αέρια είναι πιο οξειδωτικά.

Τα προβλήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω μπορούν να αντιμετωπισθούν με την καθοδήγηση ενός στρώματος ψυχρού αέρα πάνω στη μετωπική επιφάνεια του σπινθηριστή. Όμως δεν είναι απόλυτα ικανοποιητική λύση αφού το ψυχρό κύμα εμποδίζει την ανάφλεξη σε πολύ μεγάλο βαθμό στις πτήσεις σε μεγάλα ύψη. Προτάθηκε η λύση των αφαιρούμενων

σπινθηριστών οι οποίοι όμως εμφανίζουν αξιόλογα μηχανικά προβλήματα. Μια καλύτερη λύση θα μπορούσε να είναι η χρήση νέων υλικών κατασκευής των ημιαγωγών, που θα ήταν ικανά να λειτουργήσουν για πολύ καιρό σε ένα θερμό και οξειδωτικό περιβάλλον. Περαιτέρω επεκτάσεις του ορίου ζωής του σπινθηριστή μπορούν να επέλθουν από τη μείωση στις απαιτήσεις της έκλυσης ενέργειας αλλά και από τη χρήση αναφλεκτήρων που διαθέτουν μεγάλα εσωτερικά ηλεκτρόδια.

### **5.3.B. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ**

Η απόδοση ενός σπινθηριστή επιφανειακής εκκένωσης εκφράζεται συνήθως από το λόγο της εκλυόμενης ενέργειας και της ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στον πυκνωτή. Είναι βεβαίως προφανές ότι το μέγεθος αυτό μας δίνει μια προσεγγιστική εικόνα γιατί βεβαίως μόνο ένα μικρά ποσοστό της ενέργειας του σπινθήρα συμβάλλει απευθείας στην ανάφλεξη και αυτό το ποσοστό μεταβάλλεται με τη σχεδίαση του σπινθηριστή. Ωστόσο για σταθερή αποθηκευμένη ενέργεια πυκνωτή η ενέργεια που εκλύεται στο σπινθήρα παρέχει ένα χρήσιμο και βολικό μέτρο της αναφλεξιμότητας.

Οι σπινθηριστές επιφανειακής εκκένωσης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το αν ο ημιαγωγός προεξέχει μαζί με τα ηλεκτρόδια ή αν είναι πιο μέσα. (σχ. 5.3.) Τα πειράματα έδειξαν ότι η ενέργεια σπινθηρισμού αυξάνεται με την αύξηση του βάθους του κενού ανάμεσα στα ηλεκτρόδια ή με τη μείωση του βάθους που βρίσκεται ο ημιαγωγός. Έτσι η μέγιστη αναφλεξιμότητα επιτυγχάνεται με τους σπινθηριστές όπου ο ημιαγωγός προεξέχει και το κενό ανάμεσα στα ηλεκτρόδια είναι μεγάλο.



### **5.3. ΔΥΟ ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΕΚΦΟΡΤΙΣΤΩΝ - ΑΝΑΦΛΕΚΤΗΡΩΝ**

Ο τύπος αυτός του σπινθηριστή είναι πιο δύσκολο να κατασκευαστεί από ότι με τον ημιαγωγό μέσα, είναι πιο ακριβός και έχει μικρότερη αντοχή. Από την άλλη είναι πιο αποδοτικός (γιατί μεγάλο μέρος της αποθηκευμένης ενέργειας είναι διαθέσιμο για ανάφλεξη) και το επιχειρησιακό όριο ζωής είναι μεγαλύτερο." Μεγάλη αδυναμία του σπινθηριστή με τον ημιαγωγό μέσα είναι η αδυναμία να λειτουργήσει σε υγρές συνθήκες καυσίμου. "Αυτό το μειονέκτημα είναι αρκετά σοβαρό για τους πολυαξονικούς, με λόγο παράκαμψης αεροκινητήρες, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από μεγάλη καθυστέρηση μεταξύ της εκκίνησης και της απόκτησης ικανών συνθηκών για ανάφλεξη. Έτσι όλη η ενέργεια του σπινθήρα χρησιμοποιείται για τη θέρμανση των ηλεκτροδίων και τη διάβρωση τους. Έτσι κάτω από αυτές τις συνθήκες ο αναφλεκτήρας αυτός εμφανίζει μικρή αναφλεξιμότητα και μικρό όριο ζωής.

### **5.3.γ. ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΜΟΥ**

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει μόνο ένα μικρό μέρος της ολικής αποθηκευμένης ενέργειας, στον πυκνωτή, είναι χρήσιμο στη θέρμανση του καυσίμου μείγματος. Από το υπόλοιπο, κάποιο μέρος δαπανήθηκε στις απώλειες (διηλεκτρικές απώλειες) και το άλλο δαπανήθηκε με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής και ακουστικής ακτινοβολίας. Όταν η εκκένωση είναι γρήγορη αυτές οι ενεργειακές απώλειες είναι πολύ υψηλές. Από την άλλη αν η διάρκεια του σπινθηρισμού είναι μεγάλη, η ενέργεια διασκορπίζεται σε ένα μεγάλο όγκο του μείγματος και οι θερμοκρασίες των αερίων είναι πολύ χαμηλές για να προκαλέσουν ανάφλεξη.

Διάφοροι ερευνητές που ασχολήθηκαν με τις ενέργειες ανάφλεξης σε μείγματα προπανίου-αέρα, με σπινθηριστή πυκνωτή, υπολόγισαν ως βέλτιστο χρόνο διάρκειας σπινθήρα περίπου τα 100  $\mu\text{sec}$ . Τέτοιος χρόνος υπολογίσθηκε και για τα συστήματα ανάφλεξης που χρησιμοποιούν οι συμβατοί κινητήρες. Σε άλλα πειράματα, σε αέρια καύσιμα στα οποία οι συνθήκες της ροής κρατήθηκαν σταθερές, μετρήθηκε το ελάχιστο ποσό ενέργειας που απαιτείται για επιτυχημένη ανάφλεξη, για διάφορες τιμές διάρκειας σπινθηρισμού. Η βέλτιστη διάρκεια σπινθηρισμού ορίσθηκε ως αυτή που ανταποκρίνεται στη χαμηλότερη τιμή της ενέργειας ανάφλεξης. Από μια ανάλυση των θερμικών απωλειών που υποβάλλεται ο σπινθήρας τη διάρκεια της εκκένωσης, διαπιστώθηκε ότι μετά το αρχικό κρουστικό κύμα, η βασική πηγή απωλειών είναι η εξαναγκασμένη μετάδοση θερμότητας με τη ροή. Βασισμένες σε αυτά τα αποτελέσματα εξάχθηκαν εκφράσεις που υπολογίζουν τη βέλτιστη διάρκεια σπινθηρισμού για κάθε μείγμα και συνθήκες ροής. Για το πεδίο των συνθηκών που μελετήθηκε η βέλτιστη διάρκεια σπινθηρισμού βρέθηκε ότι κυμαίνεται μεταξύ 30 και 90  $\mu\text{sec}$ , με τη μεγαλύτερη τιμή να αντιστοιχεί στα στοιχειομετρικά μείγματα. Βρέθηκε επίσης ότι η διάρκεια σπινθηρισμού μένει ανεπηρέαστη από την τύρβη αλλά μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας. Ακόμα παρατηρήθηκε ότι η βέλτιστη διάρκεια σπινθηρισμού αυξάνει με την αύξηση του μέσου μεγέθους των σταγονιδίων.



### **5.3.δ. ΡΥΘΜΟΣ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΜΟΥ**

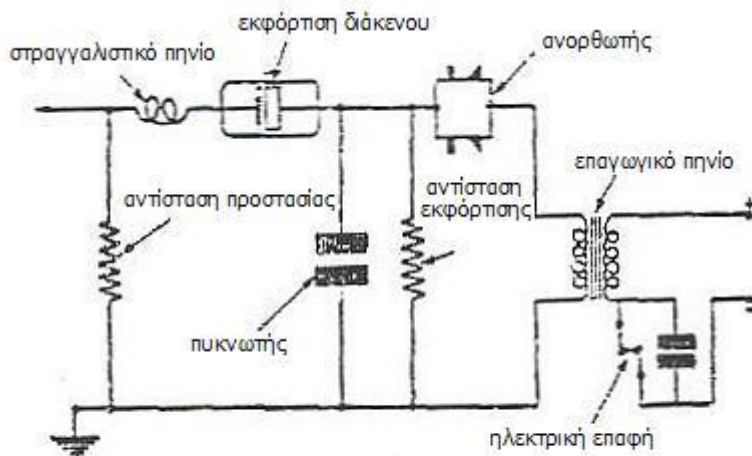
Κατά τη διάρκεια της εκκίνησης στο έδαφος και η ροή του αέρα και η ροή του καυσίμου στον κινητήρα αυξάνουν αλλά με διαφορετικούς ρυθμούς. Το αποτέλεσμα είναι μεγάλες μεταβολές στις ρυθμίσεις του σπινθηριστή, ανάλογα με τις αναλογίες του μείγματος. Η ανάφλεξη εμφανίζεται μόνο αφού η εκκένωση συμπέσει με λόγο μείγματος που βρίσκεται μέσα στα όρια αναφλεξιμότητας. Κάτω από αυτές τις συνθήκες αύξηση στο ρυθμό σπινθηρισμού είναι προτιμότερη από αύξηση της αποδιδόμενης ενέργειας. Μια εναλλακτική μέθοδος που εξαφανίζει τα προβλήματα εκκίνησης στο έδαφος, είναι η καθυστέρηση ή η πρόωρη έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης, που θα αλλάξει τη σύνθεση του μείγματος στον αναφλεκτήρα.

Σε πειράματα που έγιναν σε συνθήκες υψομέτρου για το θέμα αυτό, ο ρυθμός σπινθηρισμού αυξανόταν από 2 σε 150/sec. Βρέθηκε ότι ο ρυθμός σπινθηρισμού μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο μόνο αν είναι ιδιαίτερα υψηλός έτσι ώστε οι σπινθήρες να ενεργούν μέσα σε αέρια που έχουν ήδη προθερμανθεί από προηγούμενους σπινθήρες.

Ο μεγάλος ρυθμός σπινθηρισμού λοιπόν είναι ευνοϊκός για συνθήκες δύσκολης ανάφλεξης. Όμως για δεδομένο σύστημα ανάφλεξης, αύξηση στο ρυθμό αυτό απαιτεί μείωση της εκλυόμενης ενέργειας. Η εμπειρία μας έχει δείξει ότι μια συχνότητα σπινθήρα μεταξύ 1 και 2 sec, εξαρτάται από την εφαρμογή, απαιτεί την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας και δίνει την πιο μικρή μορφή συστήματος ανάφλεξης.

### **5.3.ε. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Το διάγραμμα του συστήματος φαίνεται στο σχ. 5.4. Παράγει 12 J ενέργειας και αποτελείται από ένα επαγωγικό πηνίο που μπαίνει σε λειτουργία από ένα μηχανοηλεκτρικό διακόπτη, φορτίζει έναν πυκνωτή μέσω ενός ανορθωτή υψηλής τάσης, μέχρι η τάση να εξισωθεί με την τάση κλεισίματος μιας διόδου. Στη σειρά συνδέεται μια αντίσταση και ο σπινθηριστής επιφανειακής εκκένωσης. Ο ρόλος της αντίστασης είναι να ελέγξει τη διάρκεια σπινθηρισμού ενώ η αντίσταση ασφαλείας χρησιμοποιείται για τη σίγουρη φόρτιση του πυκνωτή.



#### 5.4. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τα συστήματα ανάφλεξης σήμερα κατασκευάζονται σε πολλές εκδόσεις που ικανοποιούν τις διάφορες απαιτήσεις των κινητήρων. Συστήματα ενός ή δύο καναλιών είναι διαθέσιμα με επίπεδα αποθηκευμένης ενέργειας από 1 έως 12 KJ. Σε ορισμένες σχεδιάσεις ο σπινθήρας βρίσκεται ανάποδα με σκοπό την αύξηση της εκλυόμενης ενέργειας. Συστήματα που ψύχονται από το καύσιμο χρησιμοποιούνται όταν οι θερμοκρασίες στο γύρω περιβάλλον είναι εξαιρετικά υψηλές.

#### 5.3.στ. ΘΕΣΗ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ

Στους πρώτους κινητήρες η τοποθέτηση του αναφλεκτήρα γινόταν με κριτήριο την προσιτότητα για επισκευή και αντικατάσταση του. Όμως σήμερα είναι απολύτως αποδεκτό ότι η θέση του αναφλεκτήρα παίζει σημαντικό ρόλο και στην απόδοση της ανάφλεξης και στη διάρκεια της ζωής του.

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες στον καθορισμό της βέλτιστης θέσης του σπινθηριστή είναι ότι αυτός πρέπει να βρίσκεται αποκλειστικά στην πρωτογενή ζώνη έτσι ώστε ο θερμός πυρήνας, που δημιουργείται από το σπινθήρα, να ξαναγυρίζει μπροστά, εξαιτίας της αντίστροφης ροής. αυτό προϋποθέτει ένα μηχανισμό ανάφλεξης όπου καιγόμενα αέρια θα παραμένουν μέσα στην ανάστροφη αυτή ροή έως ότου ολόκληρη η πρωτογενής ζώνη αναφλέγει, οπότε και θα συνεχίσουν προς την έξοδο του κινητήρα.

Πειραματικά έχει δειχθεί ότι η καλύτερη θέση για το σπινθηριστή είναι κοντά στην κεντρική γραμμή του θαλάμου καύσης, κοντά στο ακροφύσιο καυσίμου. Δυστυχώς όμως αυτή η θέση είναι πολύ άβολη όσον αφορά την προσιτότητα και την αλληλεπίδραση με τη ροή. Ακόμα η μετωπική επιφάνεια του σπινθηριστή συνεχώς καλύπτεται από ανθρακώδη αποθέματα

και δυσλειτουργεί λόγω υπερθέρμανσης. Η πλέον συνήθης θέση είναι στο κυλινδρικό μέρος του θαλάμου, κοντά στην έξοδο του ψεκασμένου καυσίμου. Όμως είναι σημαντικό για έναν αναφλεκτήρα να μη λειτουργεί κάτω από συνθήκες υγρού καυσίμου, είτε λόγω της άμεσης πρόσκρουσης με αυτό είτε λόγω της ροής του καυσίμου κατά μήκος των τοιχωμάτων του θαλάμου καύσης.

Το άκρο του αναφλεκτήρα πρέπει να προεξέχει από τα τοιχώματα του θαλάμου αρκετά έτσι ώστε να μην αλληλεπιδρά με το στρώμα ψυχρού αέρα, που κινείται κατά μήκος τους. Γενικά αυξάνοντας το βάθος εμβάπτισης, της άκρης του σπινθηριστή, βελτιώνεται η αναφλεξιμότητα και μειώνεται το όριο ζωής του. Το βέλτιστο ποσό της προεξοχής μπορεί να προσδιορισθεί με πειράματα, που γίνονται με μέγιστη πίεση θαλάμου, χρησιμοποιώντας τροποποιημένο σπινθηριστή, με ένα θερμοζεύγος τοποθετημένο στην άκρη του. Ξεκινώντας με την άκρη του εφαπτόμενη στα τοιχώματα του θαλάμου, η προεξοχή αυξάνει σιγά-σιγά έως ότου οι ενδείξεις του θερμοζεύγους δείξουν απότομη αύξηση της θερμοκρασίας. Ο αναφλεκτήρας τότε αποσύρεται αργά στην αρχική θέση. Σε καμία περίπτωση η θερμοκρασία στο άκρο δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 880 K.

### **5.3.ζ. ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

Η προσθήκη καυσίμου στους κινητήρες γίνεται είτε με έγχυση μπροστά από τον αέρα, που εισάγεται στο θάλαμο καύσης, είτε γύρω από το σπινθηριστή. Από σειρά πειραμάτων που έχουν γίνει διαπιστώσαμε ότι τα όρια ανάφλεξης μπορούν να επεκταθούν, σε αυτή την περίπτωση σε μικρότερες τιμές της πίεσης, με τοπική έγχυση αερίου καυσίμου μέσα στον πυρήνα του σπινθήρα. Αυτό έρχεται σε απόλυτο συμβιβασμό με το πειραματικό πόρισμα που συμπεραίνει ότι "το κύριο εμπόδιο για την ανάφλεξη είναι η έλλειψη εξαερωμένου καυσίμου μέσα στην περιοχή του σπινθήρα".

### **5.3.η. ΕΓΧΥΣΗ ΟΞΥΓΟΝΟΥ**

Η ανάφλεξη σε χαμηλές πιέσεις διευκολύνεται σε μεγάλο βαθμό με την έγχυση οξυγόνου στην πρωτογενή ζώνη. Πειράματα που έγιναν σε πίεση θαλάμου 14 KPa έδειξαν ότι ροή οξυγόνου ίση με 0.5% της κανονικής ροής αέρα επιτρέπει αύξηση της τάξης του 200% στα όρια της μάζας του αέρα που απαιτούνται για ανάφλεξη. Το οξυγόνο εγχύθηκε από εκεί που ψεκάσθηκε και ο αέρας για να εισέλθει στο θάλαμο καύσης.

Μια και το οξυγόνο μεταφέρεται από το αεροσκάφος για άλλους λόγους, αντιπροσωπεύει ένα πολύ καλό τρόπο αύξησης της ικανότητας ανάφλεξης, σε μεγάλο υψόμετρο, σε περιπτώσεις όπου άλλες συμβατικές μέθοδοι αποδείχθηκαν ανεπαρκείς.

### **5.3.θ. ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΦΛΕΞΗ**

Ένας αριθμός χημικών θα αναφλεγόταν ταυτόχρονα με την επαφή με τον αέρα και θα απελευθέρωνε ενέργεια με υψηλούς ρυθμούς. Τα πειράματα έχουν δείξει ότι μικρές ποσότητες των καλουμένων "πυροφορικών" καυσίμων (περίπου 2 cc) είναι πολύ αποτελεσματικές όταν εγχύονται μέσω ενός αγωγού στην πρωτογενή ζώνη.

Τα πυροφορικά καύσιμα περιέχουν τριμεθυλικό αργίλιο, τριαιθυλικό αργίλιο και αργιλικό βοροειδίο. Για εύκολη αποθήκευση και αντιμετώπιση των προβλημάτων έγχυσης στα περισσότερα πειράματα τα καύσιμα αυτά διαλύθηκαν μέσα σε κηροζίνη ή πετρέλαιο. Παρά το γεγονός ότι τα πειράματα αυτά απέδειξαν ότι τα πυροφορικά καύσιμα αποτελούν πολύ ισχυρές πηγές ανάφλεξης, είναι επιτακτική η ανεύρεση μέσων αποθήκευσης και έγχυσης πριν τη χρήση στα αεροσκάφη. Είναι πολύ επικίνδυνα σε περίπτωση πτώσης και αυτό μάλλον θα τα περιορίσει μόνο για στρατιωτική χρήση.

### **5.4. ΑΛΛΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ**

Παρά το γεγονός ότι η χρήση του συνδυασμού της μεθόδου ανάφλεξης υψηλής ενέργειας με τον επιφανειακό σπινθηριστή εκκένωσης, είναι πολύ διαδεδομένη, υπάρχουν και άλλες διαθέσιμες μέθοδοι με αρκετά πλεονεκτήματα.

#### **5.4.α. ΑΝΑΦΛΕΚΤΗΡΑΣ ΤΥΠΟΥ ΑΥΛΟΥ**

Το σύστημα ανάφλεξης αυτού του τύπου αποτελείται από ένα σπινθηριστή και μια Βοηθητική παροχή καυσίμου σε μια κοινή κατασκευή. Η θέση αυτών των δύο εξαρτημάτων είναι τέτοια ώστε η ανάφλεξη του καλά εξαερωμένου καυσίμου, από το σπινθήρα να παράγει έναν αυλό από καιγόμενα σταγονίδια τα οποία και αναφλέγουν και το υπόλοιπο κύριο καύσιμο. Η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τη θέση του. Συνήθως στους δακτυλιοειδείς θαλάμους τοποθετείται στο μπροστά μέρος ανάμεσα στο κύριο θάλαμο και το εξωτερικό περίβλημα του.

Το βασικό πρόβλημα του συστήματος είναι ο σπινθηροβολισμός και η συσσωμάτωση του καυσίμου, όταν ο ψεκαστής δε λειτουργεί. Αυτό προκαλεί την έμφραξη της κεφαλής εκκένωσης, η οποία έχει συνήθως διάμετρο 0.23 mm. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπισθεί με τη χρήση ειδικής ηλεκτροκίνητης βαλβίδας, η οποία θα κλείνει την παροχή του καυσίμου μετά την ανάφλεξη και θα παρέχει καθαρό ξηρό αέρα. Η διάταξη αυτή όμως αυξάνει και το βάρος και την πολυπλοκότητα της συσκευής.

Οι αναφλεκτήρες αυτοί είναι ειδικά κατασκευασμένοι για τους θαλάμους καύσης εξαερισμού όπου χρησιμοποιούνται τουλάχιστον δύο συσκευές. Τοποθετούνται στις χαμηλότερες θέσεις του θαλάμου καύσης. Σε ορισμένους κινητήρες χρησιμοποιούνται και επιπρόσθετοι εγχυτήρες

καυσίμου, για επέκταση της φλόγας σε ολόκληρη την πρωτογενή ζώνη. Όταν η φλόγα σταθεροποιηθεί και η διαδικασία της καύσης πραγματοποιείται κανονικά, ο βοηθητικός αγωγός καυσίμου και ο σπινθηριστής παύουν να λειτουργούν.

Ανάμεσα στους παράγοντες που επηρεάζουν τη διάδοση της φλόγας στους θαλάμους καύσης συγκαταλέγεται και η θερμοκρασία εισόδου. Πειραματικά έχει βρεθεί ότι ο χρόνος που απαιτείται για να έχουμε διάδοση της φλόγας στο 90% του χώρου, 7πλασιάζεται με τη μείωση της θερμοκρασίας από τη συνήθη στους 219 Κ. Η πτητικότητα του καυσίμου και ο λόγος καυσίμου/ αέρα συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στο ρυθμό διάδοσης της φλόγας εξαιτίας της σχέσης τους με την εξαέρωση του καυσίμου. Ενδιαφέροντας είναι και ο ρόλος που παίζει και ο χώρος που εγχύεται το εξαερωμένο καύσιμο. Όσο μεγαλύτερος είναι ο χώρος τόσο πιο αργή και η διάδοση της φλόγας.

#### **5.4.β. ΠΥΡΑΚΤΩΜΕΝΟ ΒΥΣΜΑ (ΡΕΥΜΑΤΟΛΗΠΤΗΣ)**

Η λειτουργία του ρευματολήπτη είναι να παράγει γρήγορη επανάφλεξη όταν η φλόγα έχει χάσει την ευστάθεια της κάτω από συνθήκες παγοποίησης, αναρρόφησης νερού ή παροδικής έλλειψης καυσίμου. Οι διαστάσεις του βύσματος αυτού διαλέγονται ώστε να συνδυάζονται με το μέγεθος του θαλάμου καύσης, δηλαδή ένα τυπικό βύσμα έχει τη μορφή ενός κυλίνδρου 2.5 cm μήκους και 1,5 cm εξωτερικής διαμέτρου. Το πυρακτούμενο βύσμα τοποθετείται στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης και προεξέχει στην πρωτογενή ζώνη, μέσα στα καιγόμενα αέρια. Αυτή είναι και η ιδανική θέση για την επανάφλεξη του μείγματος μετά από ξαφνικό σβήσιμο του κινητήρα.

Το ιδανικό υλικό του βύσματος θα συνδυάζε μεγάλη ειδική θερμότητα, πυκνότητα και θερμική αγωγιμότητα με ταυτόχρονη μεγάλη αντίσταση στην οξειδωση και στις θερμικές καταπονήσεις. Τα πειράματα με βύσματα από πλατίνα ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά άλλα το υλικό αυτό είναι αρκετά ακριβό. Ευτυχώς τα καρβίδια της σιλικόνης με προσμίξεις αζώτου αποδείχθηκαν άριστα υποκατάστατα, με όριο ζωής τις 4000 H σε στρατιωτικά αεροσκάφη. Τα πυρακτωμένα βύσματα φαίνεται ότι έχουν αξιόλογο μέλλον και ιδιαίτερες χρήσεις στα ελικόπτερα.

#### **5.4.γ. ΑΝΑΦΛΕΞΗ ΘΕΡΜΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ**

Η ανάφλεξη ενός αερίου καυσίμου από θερμή επιφάνεια είναι τεχνικώς δυνατή και έχει επιτευχθεί πολλές φορές στην πραγματικότητα. Όμως η χρήση της μεθόδου δεν είναι δυνατή στους αεροκινητήρες λόγω των μεγάλων ποσών θερμότητας που πρέπει να μεταδοθούν ώστε αφενός το καύσιμο να εξαερωθεί και αφετέρου το μείγμα καυσίμου-αέρα να φτάσει στη θερμοκρασία ανάφλεξης, μέσα στο μικρό χρονικό διάστημα που έρχεται σε επαφή με τη θερμή

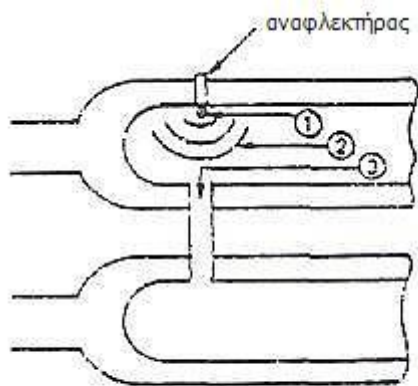
επιφάνεια. Για αυτό και η ανάφλεξη με σπινθήρα είναι η πιο διαδεδομένη, γιατί παρέχει σχεδόν στιγμιαία (150  $\mu\text{sec}$ ) μετάδοση θερμότητας στο άκαυτο μείγμα.

#### **5.4.δ. ΕΓΧΥΣΗ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ**

Ο σπινθηριστής στη συγκεκριμένη διάταξη αποτελείται από ένα κοίλωμα, στο οποίο το αέριο, που ρέει, θερμαίνεται ηλεκτρικά, σε πολύ υψηλή θερμοκρασία και μετά εκκενώνεται ως πλάσμα υψηλής ταχύτητας στο κύριο ρεύμα του μείγματος. Τα αέρια που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα ήταν άζωτο και υδρογόνο. Παρατηρήθηκε ότι η αποτελεσματικότητα τους ως πηγές ανάφλεξης εξαρτάται από την περιεκτικότητα τους σε ρίζες. Είναι επίσης δυνατό να ρυθμιστεί η εισχώρηση του πίδακα μεταβάλλοντας την απόσταση "της πηγής της ανάφλεξης".

#### **5.5. Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ**

Μεγάλη πρόοδος στην κατανόηση της διαδικασίας της ανάφλεξης στους αεροκινητήρες ήταν η αποδοχή του γεγονότος ότι η διαδικασία αυτή δεν ήταν τόσο απλή και ακαριαία όσο φαινόταν αλλά αποτελείται από τρεις ξεχωριστές φάσεις. Η πρώτη φάση είναι η δημιουργία ενός πυρήνα φλόγας ικανού μεγέθους και θερμοκρασίας για να επιτευχθεί η διάδοση του. Η δεύτερη φάση είναι η διάδοση της φλόγας από τον πυρήνα αυτό σε όλα τα μέρη της πρωτογενούς ζώνης. Η τρίτη φάση λαμβάνει χώρα μόνο στους σωληνοειδείς, θαλάμους καύσης και είναι η διάδοση της φλόγας από έναν "αναμμένο" σε ένα "σβηστό". Οι τρεις αυτές φάσεις φαίνονται στο σχ. 5.5. Αποτυχία οποιασδήποτε φάσης ισοδυναμεί με αποτυχία ανάφλεξης. Είναι πολύ πιθανό η απόδοση της ανάφλεξης ενός θαλάμου καύσης να επηρεάζεται από διαφορετικούς παράγοντες, ανάλογα με τη φάση της ανάφλεξης που επιτελείται κάθε φορά. Η υιοθέτηση των τριών φάσεων στη διαδικασία της ανάφλεξης εξήγησε πολλά παράξενα φαινόμενα. Για παράδειγμα δικαιολόγησε γιατί σε μια δεδομένη φάση αύξηση της ενέργειας του σπινθήρα Βελτιώνει την απόδοση της καύσης ενώ σε άλλη χρονική στιγμή δεν έχει κανένα αποτέλεσμα. Η εξήγηση είναι πλέον απλή αφού όπως φαίνεται στην πρώτη περίπτωση η ανάφλεξη βρίσκεται στην πρώτη φάση ενώ στη δεύτερη στην δεύτερη ή τρίτη φάση.



### 5.5. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΤΡΙΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ

Αντίστοιχα, αποτυχία στην επίτευξη, σε πτήση, επανάφλεξης σε υψόμετρο, που προβλέφθηκε σε στατικά πειράματα, σε ένα φλογοσωλήνα ενός σωληνοειδούς θαλάμου καύσης μπορεί να εξηγηθεί με αποτυχία της τρίτης φάσης.

#### **5.5.α. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΠΡΩΤΗ ΦΑΣΗ**

Η επιβίωση του πυρήνα των θερμών αερίων που δημιουργήθηκε από το σπινθήρα εξαρτάται εξολοκλήρου από το αν ο ρυθμός απόδοσης θερμότητας από την καύση ξεπερνά το ρυθμό απαγωγής θερμότητας από το περιβάλλον, εξαιτίας της ακτινοβολίας και της τύρβης. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας εξαρτάται κυρίως από το λόγο καυσίμου/ αέρα κοντά στο βύσμα, που είναι συνήθως κοντά στο στοιχειομετρικό αλλά και από το μέγεθος και τη θερμοκρασία του σπινθήρα που με τη σειρά τους καθορίζονται από την ενέργεια και τη διάρκεια του σπινθηρισμού. Ο ρυθμός απωλειών θερμότητας του πυρήνα σε μεγάλο βαθμό ορίζεται από τις τοπικές συνθήκες ταχύτητας και τύρβης αλλά και την ποσότητα της περίσσειας καυσίμου στη ζώνη ανάφλεξης.

#### **5.5.β. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΕΥΤΕΡΗ ΦΑΣΗ**

Η επιτυχία ή αποτυχία της φάσης εξαρτάται κατά ένα μέρος από τη θέση του αναφλεκτήρα, αφού αυτή ορίζει αν ο θερμός πυρήνας θα βρίσκεται ή όχι στην πρωτογενή ζώνη ανακυκλοφορίας. Επηρεάζεται επίσης από όλους τους παράγοντες που καθορίζουν την ευστάθεια της φλόγας. Για αυτό αύξηση πίεσης ή/ και θερμοκρασίας, μείωση στην ταχύτητα την πρωτογενούς ζώνης ή οποιαδήποτε αλλαγή του λόγου καυσίμου/ αέρα προς τη στοιχειομετρική αναλογία, που όλα ευνοούν την ευστάθεια, βελτιώνουν ταυτόχρονα και τη δεύτερη φάση.

### **5.5.γ. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΤΡΙΤΗ ΦΑΣΗ**

Η θέση της σύνδεσης των υπομέρους φλογοσωληνών είναι μείζονος σημασίας για την τρίτη φάση. Σε ιδανικές συνθήκες κάθε είσοδος σε θάλαμο καύσης πρέπει να συμπέφτει με την περιοχή μέγιστης θερμοκρασίας του θαλάμου ενώ η έξοδος πρέπει να είναι σε τέτοια θέση ώστε να εξασφαλίζει ότι τα θερμά αέρια θα ρέουν προς τη ζώνη ανακυκλοφορίας. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί για την ελαχιστοποίηση της ροής του αέρα ψύξης, που ρέει πάνω από τα άκρα του σωλήνα, αφού μπορεί να αλληλεπιδράσει με τη ροή των θερμών αερίων και να σημειωθεί σημαντική μείωση της θερμοκρασίας τους. Η πραγματοποίηση της τρίτης φάσης ενθαρρύνεται από τη χρήση συνδέσεων μεταξύ των υπομέρους θαλάμων, στις οποίες η διατομή είναι αρκετά μεγάλη ώστε να διευκολύνεται το πέρασμα της φλόγας ενώ το μήκος είναι μικρό ώστε να μειωθούν οι απώλειες θερμότητας.

### **5.6. ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ**

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της ανάφλεξης είναι το σύστημα της ανάφλεξης που χρησιμοποιείται, οι παράμετροι ροής και τα χαρακτηριστικά του καυσίμου.

#### **5.6.α. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ**

Η ενέργεια, η διάρκεια και η συχνότητα σπινθηρισμού εξαρτώνται από το σχεδιασμό της συσκευής ανάφλεξης, το μέγεθος του πυκνωτή και το σχεδιασμό του αναφλεκτήρα. Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν μόνο την πρώτη φάση. Γενικά από την ολική ενέργεια που εκλύεται κατά την αποφόρτιση του πυκνωτή, το ποσοστό που πηγαίνει στον αναφλεκτήρα αυξάνει με την αύξηση της πίεσης, το βάθος του κενού και την ταχύτητα. Η ευεργετική επίδραση της πίεσης και του βάθους του κενού απορρέουν από το γεγονός ότι και στα δύο φαινόμενα αυξάνεται ο αριθμός των μορίων στο βολταϊκό τόξο. Αυτό αυξάνει την ηλεκτρική αντίσταση του κενού, που πλέον απαιτεί μεγαλύτερη τάση απέμφραξης, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη ενέργεια σπινθήρα. Αύξηση στην ταχύτητα του αέρα τείνει στην αύξηση της ενέργειας σπινθηρισμού. Αυτό οφείλεται αφενός στο "άπλωμα" του σπινθήρα, που αυξάνει την αντίσταση του και κατά συνέπεια την έκλυση ενέργειας και αφετέρου σε μείωση στις απώλειες θερμότητας στα ηλεκτρόδια αφού το τόξο βρίσκεται πλέον μπροστά από την επιφάνεια του βύσματος, εξαιτίας της ροής.

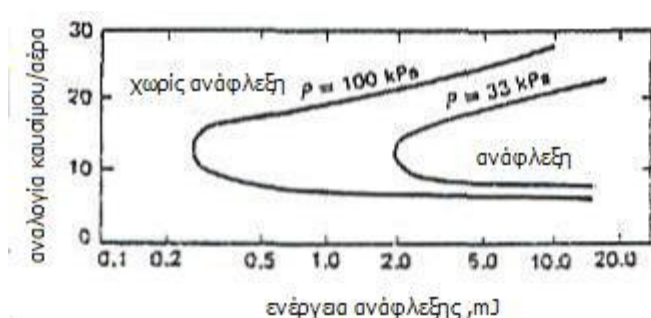


## **5.6.β. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΡΟΗΣ**

Οι βασικές παράμετροι ροής είναι η πίεση, η θερμοκρασία, η ταχύτητα και η τύρβη.

### **5.6.β.1. ΠΙΕΣΗ ΑΕΡΑ**

Όλες οι πληροφορίες από τα πειράματα που έχουν διεξαχθεί δείχνουν καθαρά την ευεργετική επίδραση της πίεσης στην ελαχιστοποίηση της ενέργειας ανάφλεξης. Τέτοιες μετρήσεις φαίνονται στο σχ. 5.6. Προκύπτει δηλαδή ότι μια μείωση στην πίεση κατά τρεις φορές προκαλεί 8πλασιασμό στην ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης.



## 5.6. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΙΕΣΕΩΣ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΤΟΥ ΑΔΡΑΝΟΥΣ ΑΕΡΙΟΥ

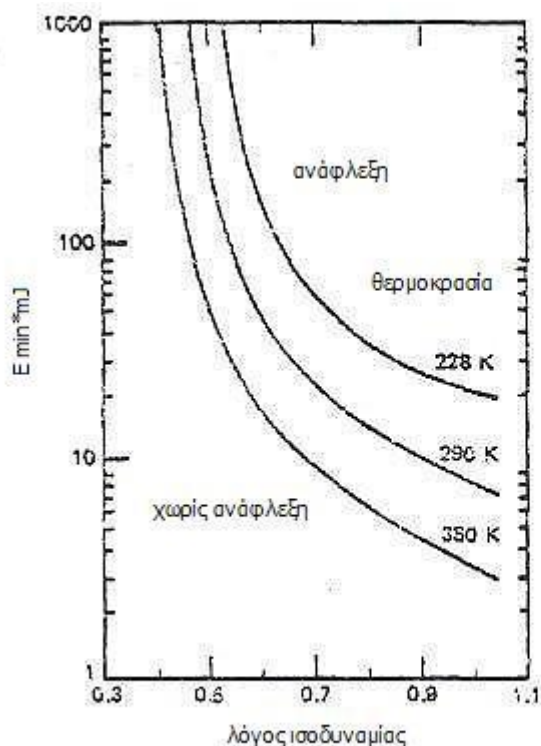
### **5.6.β.2. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ**

Όλα τα πειράματα δείχνουν ότι μείωση στη θερμοκρασία αέρα είναι επιβλαβής στην ανάφλεξη. Αυτό βέβαια είναι αναμενόμενο επειδή τότε περισσότερη ενέργεια απαιτείται για να αυξήσει τη θερμοκρασία του μείγματος, στη θερμοκρασία αντίδρασης αλλά και γιατί οι ρυθμοί εξαέρωσης είναι χαμηλότεροι σε χαμηλές θερμοκρασίες με συνέπεια την απορρόφηση μεγαλύτερων ποσών ενέργειας προκειμένου να εξαερωθούν τα σταγονίδια του καυσίμου.

Η επίδραση της θερμοκρασίας εισόδου στην ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης φαίνεται στο σχ. 5.7, όπου περιέχονται πληροφορίες για πίεση στα 20 KPa, ταχύτητα 15 m/sec, και σταθερό SMD=60 μm. Το σχήμα δείχνει ότι η ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης μειώνεται δραστικά με αύξηση της θερμοκρασίας και με αύξηση του λόγου καυσίμου /αέρα προς τη στοιχειομετρική αναλογία.

Αφού οι θάλαμοι καύσης απαιτείται υπό κανονικές συνθήκες να λειτουργούν υπό μια σταθερή τιμή του  $U / T^{0.5}$ , κάθε μείωση στη θερμοκρασία συνοδεύεται από μείωση στην ταχύτητα. Έτσι εκτός από τις φτωχές, σε καύσιμο, ροές, όπου κυριαρχούν οι ρυθμοί εξαέρωσης, η αρνητική επίδραση της μείωσης της θερμοκρασίας εν μέρει αναιρείται από

μείωση της ταχύτητας.



### 5.7. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΑΕΡΑ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ: $P = 20 \text{ kPa}$

$$U = 15 \text{ m/s}, \text{ SMD} = 60 \text{ mm}$$

#### **5.6.β.3. ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΕΡΑ**

Η ταχύτητα επηρεάζει την πρώτη και δεύτερη φάση της διαδικασίας ανάφλεξης. Στην πρώτη φάση η επίδραση είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη. Ένα ευεργετικό αποτέλεσμα, που ήδη προαναφέραμε, προκύπτει από την "επιμήκυνση" του σπινθήρα προς τα μπροστά, γεγονός που αυξάνει την έκλυση της ενέργειας, κατά τη διάρκεια της εκκένωσης και μειώνει τις απώλειες θερμότητας. Όμως ενάντια σε αυτά πλεονεκτήματα τίθεται η απώλεια θερμότητας, του πυρήνα του σπινθήρα, κατά τη διάρκεια της αρχικής φάσης, εξαιτίας της επαφής με τα ηλεκτρόδια. Αυτή η απώλεια θερμότητας, η οποία αυξάνει σχεδόν γραμμικά με την ταχύτητα, πρέπει να αντισταθμιστεί με μία αύξηση στην ενέργεια του σπινθήρα.

Η αρνητική επίδραση μιας αύξησης της ταχύτητας στη δεύτερη φάση, εμφανίζεται εξαιτίας του γεγονότος ότι ο πυρήνας του σπινθήρα έχει λίγο χρόνο για να διαδοθεί στην πρωτογενή ζώνη, πριν παρασυρθεί από τη ροή. Το ολικό αποτέλεσμα από όλα τα παραπάνω είναι ότι η ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης αυξάνει ελάχιστα με την αύξηση στην ταχύτητα.

#### **5.6.β.4. ΤΥΡΒΗ**

Όταν ο πυρήνας του σπινθήρα αποκόπτεται από τα ηλεκτρόδια και μπαίνει στη ζώνη ανακυκλοφορίας δεν υπόκειται πλέον στην επίδραση της ταχύτητας. Μεγάλη όμως απώλεια θερμότητας παρουσιάζεται λόγω της τυρβώδους ροής. Πρακτικά το επίπεδο της τύρβης, στην πρωτογενή ζώνη, προσδιορίζεται από την πτώση πίεσης κατά μήκος των τοιχωμάτων του θαλάμου καύσης.

#### **5.6.γ. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

Τελευταία όλο και μεγαλύτερη γίνεται η απαίτηση οι αεροκινητήρες να χρησιμοποιούν περισσότερα είδη υγρών καυσίμων. Για αυτό και η επίδραση των ιδιοτήτων των καυσίμων είναι ιδιαίτερης σημασίας στην απόδοση της ανάφλεξης.

##### **5.6.γ.1. ΤΥΠΟΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

Στα ήδη χρησιμοποιούμενα συστήματα καύσης, η απόδοση της ανάφλεξης επηρεάζεται από τις ιδιότητες του καυσίμου, κυρίως γύρω από την επιρροή τους στη συγκέντρωση των ατμών του καυσίμου στην περιοχή του σπινθηριστή αλλά και στην ευρύτερη περιοχή της πρωτογενούς ζώνης.

Οι ρυθμοί εξαέρωσης εξαρτώνται κυρίως από δύο παράγοντες :

1. Την πτητικότητα του καυσίμου, όπως αυτή προκύπτει κατά Reid ή κατά ASTM της θερμοκρασίας εξαέρωσης του 10%.
2. Την ολική επιφάνεια του ψεκασμένου καυσίμου, που εξαρτάται άμεσα από το SMD.

Αν τα χαρακτηριστικά των αεροπορικών καυσίμων διευρύνονταν για να περικλείσουν μεγαλύτερο ποσοστό αργού πετρελαίου, οι σημαντικότερες μεταβολές θα ήταν αύξηση της περιεκτικότητας αρωματικών ενώσεων και αύξηση του σημείου βρασμού. Αυτές οι μεταβολές θα μείωναν την πτητικότητα και την επιφάνεια του ψεκασμένου καυσίμου και ταυτόχρονα θα αύξαναν το ιξώδες του καυσίμου, σε βάρος του ψεκασμού. Και τα δύο αυτά φαινόμενα συντελούν στη μείωση του ρυθμού εξαέρωσης, με άμεση συνέπεια τη δυσχερή εκκίνηση του κινητήρα. Τα παραπάνω συμπεράσματα θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη αν η ανικανότητα της διεθνούς παραγωγής πετρελαίου να ικανοποιήσει τις βασικές ανάγκες, επιβάλει τη χρήση πετρελαίων που προέρχονται από ανθρακώδη και πηλώδη εδάφη.

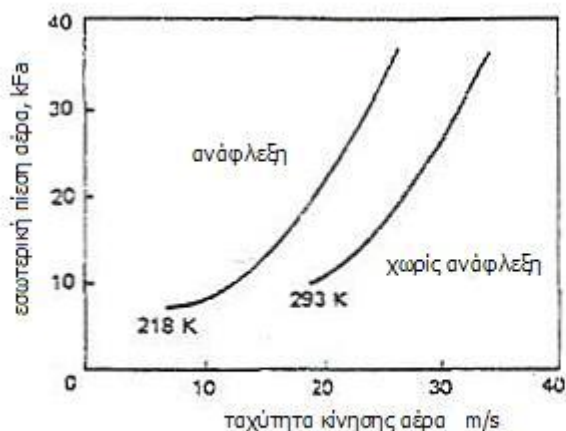
### **5.6.γ.2. ΛΟΓΟΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ/ ΑΕΡΑ**

Για να κατανοήσουμε τις απαιτήσεις όλων των φάσεων της διαδικασίας ανάφλεξης είναι φανερό ότι οι βέλτιστες συνθήκες επιτυγχάνονται όταν το μείγμα, στην πρωτογενή ζώνη, είναι περίπου σε στοιχειομετρική αναλογία, δηλαδή όταν η ταχύτητα και θερμοκρασία της φλόγας είναι μέγιστες. Σε συνθήκες όμως εκκίνησης μόνο το εξαερωμένο καύσιμο συμμετέχει στη διαδικασία της ανάφλεξης και το ποσοστό του ολικού καυσίμου που εξαερώνεται, στο διατιθέμενο χρόνο, εξαρτάται αποκλειστικά από την πτητικότητα και την ποιότητα του ψεκασμού. Έτσι η μέση τιμή του λόγου καυσίμου/ αέρα, στην πρωτογενή ζώνη, δεν έχει και πολύ μεγάλη σημασία. Η απόδοση της ανάφλεξης εξαρτάται από τον "αποτελεσματικό" λόγο καυσίμου/ αέρα, που σχετίζεται με τη συγκέντρωση του εξαερωμένου καυσίμου. Οι συνθήκες για ανάφλεξη είναι ιδανικές όταν ο λόγος αυτός, στην πρωτογενή ζώνη, είναι περίπου ίσος με το στοιχειομετρικό.

### **5.6.γ.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ**

Είναι αποδεκτό πλέον ότι μεγάλη βελτίωση στα χαρακτηριστικά εκκίνησης ενός κινητήρα μπορεί να προέλθει με κατάλληλη μεταβολή του ψεκασμού του καυσίμου. Τα συνήθη καύσιμα δεν είναι τόσο πτητικά, ώστε να παράγουν τους ατμούς που απαιτούνται για ανάφλεξη και καύση εκτός αν η επιφάνεια τους είναι τόσο αυξημένη, από τον ψεκασμό σε μεγάλο αριθμό σταγονιδίων. Όσο μικρότερο το μέγεθος της σταγόνας τόσο γρηγορότερη και η εξαέρωση. Από τα πειράματα που έχουν γίνει παρατηρήθηκε η απαίτηση για αύξηση της ελάχιστης ενέργειας ανάφλεξης, με την παραμικρή χειροτέρευση της ποιότητας ψεκασμού.

Η κατανομή των σταγονιδίων του καυσίμου είναι εξίσου σημαντική για την ανάφλεξη. Στην πραγματικότητα οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι ψεκασμού του καυσίμου παράγουν μεγάλες μεταβολές στο λόγο του μείγματος, μέσα στη ζώνη καύσης. Συγκεκριμένα ο λόγος του μείγματος είναι αρκετά υψηλός στην περιοχή του σπινθηριστή παρά στο σύνολο της πρωτογενούς ζώνης. Για αυτό και όταν το μείγμα είναι σε ιδανική αναλογία στην πρώτη φάση, μπορεί να είναι φτωχό για τη δεύτερη φάση. Αντίστροφα όταν η αναλογία του καυσίμου/ αέρα, στη ζώνη διάδοσης είναι ίση με την αποτελεσματική στοιχειομετρική, το μείγμα στην περιοχή του αναφλεκτήρα είναι πολύ πλούσιο σε καύσιμο. Η απόδοση της ανάφλεξης εξαρτάται συνεπώς όχι μόνο από τη μέση τιμή του λόγου καυσίμου/ αέρα αλλά και από την κατανομή του καυσίμου στη ροή του αέρα. Συμπερασματικά, μείωση στη γωνία ψεκασμού είναι ευεργετική για την ανάφλεξη, ειδικά σε μεγάλα ύψη. Ωστόσο υπάρχει ένα όριο στη μείωση της γωνίας αυτής εξαιτίας της σχετικής με αυτή αύξησης της εκπομπής καπνού.



#### 5.8. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΟΡΙΩΝ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ , ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΑΕΡΑ

228 K

#### **5.6.γ.4. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

Σε μεγάλα ύψη η επίδραση της θερμοκρασίας καυσίμου φαίνεται στο σχ. 5.8. Παρατηρούμε ότι η χαμηλή θερμοκρασία καυσίμου μικραίνει το πεδίο των ταχυτήτων για τις οποίες πραγματοποιείται ανάφλεξη, με δεδομένη ενέργεια σπινθήρα. Αυτό το γεγονός ποιοτικά μπορεί να ερμηνευτεί με τη σχέση της θερμοκρασίας με το ρυθμό εξαέρωσης. Γενικά ο ρυθμός εξαέρωσης αυξάνει με τη θερμοκρασία του καυσίμου αφενός εξαιτίας της αύξησης της πτητικότητας και αφετέρου εξαιτίας του καλύτερου ψεκασμού λόγω μικρότερου ιξώδους.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>

## ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ

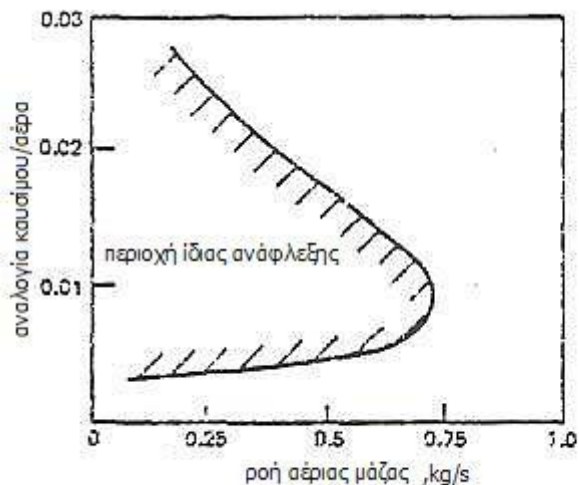
## **6.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στο σχεδιασμό ενός θαλάμου καύσης κινητήρα πρέπει να ληφθούν μέτρα ώστε να εξασφαλισθεί η καύση σ' όλο το φάσμα λειτουργίας του κινητήρα, συμπεριλαμβάνοντας και τις μεταβατικές καταστάσεις της γρήγορης επιτάχυνσης και επιβράδυνσης. Ο αεροπορικός θάλαμος καύσης απαιτείται να λειτουργεί σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και πιέσεις εισόδου και λόγους καυσίμου/ αέρα που έχουν τιμές που βρίσκονται αρκετά έξω από τα όρια καύσης των κανονικών μειγμάτων υδρογονανθράκων. Επίσης ομαλή πρέπει να εξασφαλίζεται σε πολύ τυρβώδεις ροές που έχουν ταχύτητες πολύ μεγαλύτερες της κανονικής ταχύτητας καύσης του καυσίμου. Τέλος η φλόγα πρέπει να παραμένει αναμμένη και κατά τη διάρκεια αντίξων συνθηκών πτήσης όπως οι βροχές και ο πάγος.

Η βασική αρχή που διέπει την ευστάθεια της φλόγας είναι αρκετά απλή. Αν η καύση αρχίσει σε μια κινούμενη ροή και αν η ταχύτητα του αερίου  $V$  είναι υψηλότερη από την ταχύτητα καύσης  $S$  η φλόγα θα κινηθεί προς την διεύθυνση της ροής με ταχύτητα  $v-S$ . Μόνο αν  $V=S$  τότε η φλόγα θα παραμείνει σταθερή. Έτσι πρακτικά η περιοχή της φλόγας παριστάνει την περιοχή των σημείων όπου η ταχύτητα καύσης είναι ίση με την ταχύτητα των αερίων. Η πιο συνοπτικά θα λέγαμε "συνθήκη για σταθερή φλόγα" σε μια ροή χωρίς ομοιόμορφη κατανομή ταχυτήτων είναι όταν υπάρχει ένα σημείο στη ροή όπου η ταχύτητα είναι ίση και αντίθετη από την ταχύτητα του κύματος καύσης.

Επομένως η λειτουργία του συγκρατητή φλόγας είναι να δημιουργήσει, σε μια ροή μεγάλης ταχύτητας, μια περιοχή όπου η ταχύτητα θα είναι μικρότερη από την ταχύτητα καύσης. Η φλόγα γυρίζει προς τα πίσω "blowout" όταν η ταχύτητα καύσης είναι μικρότερη της ταχύτητας της ροής. Έτσι, σε κάθε θάλαμο καύσης ο πρωταρχικός στόχος στη σχεδίαση για καλή συγκράτηση φλόγας είναι η αύξηση του λόγου της ταχύτητας καύσης προς την ταχύτητα της ροής. Αυτό ταυτόχρονα είναι και μία σημαντική απαίτηση για την επίτευξη μεγάλης απόδοσης καύσης. Η εκπλήρωση της απαίτησης αυτής, επιτυγχάνεται με τη δημιουργία στην αρχή της ροής του θαλάμου καύσης μίας προστατευόμενης ζώνης χαμηλής ταχύτητας, στην οποία η ταχύτητα της φλόγας επαυξάνεται σημαντικά με τη μετάδοση της τύρβης στο κυρίως ρεύμα του αέρα και φροντίζοντας έτσι ώστε τα ζεστά προϊόντα της καύσης να ανακυκλοφορούν και να φροντίζοντας έτσι ώστε τα ζεστά προϊόντα της καύσης να ανακυκλοφορούν και να αναμειγνύονται με τον εισερχόμενο αέρα και καύσιμο.

Η απόδοση της ευστάθειας εκφράζεται συνήθως με τη μορφή διαγραμμάτων ευστάθειας που χωρίζονται σε περιοχές ευσταθούς ή ασταθούς καύσης. Τέτοια διαγράμματα έχουν τον λόγο ισοδυναμίας ή το λόγο καυσίμου/ αέρα ως τεταγμένη και μία παράμετρο επιβάρυνσης, όπως η ταχύτητα της ροής στο θάλαμο καύσης ως τετμημένη. Τέτοιο διάγραμμα είναι και το 6.1 το οποίο ονομάζεται βρόγχος ευστάθειας λόγω της μορφής του.



### 6.1. ΤΥΠΙΚΟ ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΑΥΣΗΣ ΕΥΣΤΑΘΟΥΣ ΒΡΟΧΟΥ

Ο βρόγχος ευστάθειας μας παρέχει δυο βασικές πληροφορίες. Πρώτον για κάθε δεδομένο λόγο καυσίμου/ αέρα βρίσκουμε την ταχύτητα για την οποία η φλόγα σβήνει, "blowout",  $V_{bo}$ . Προσοχή συνήθως δίνεται στη μέγιστη ταχύτητα "blowout" η οποία τείνει να συμπίπτει με τις τιμές των μειγμάτων που πλησιάζουν τη στοιχειομετρική. Δεύτερον για κάθε επιβάρυνση του θαλάμου καύσης μας γίνεται γνωστό το πεδίο τιμών του λόγου καυσίμου/ αέρα για το οποίο έχουμε ευσταθή φλόγα.

Συμπερασματικά σε πειραματικούς συγκρατητές φλόγας, στους οποίους το καύσιμο παρέχεται προανεμειγμένο με αέρα, όλη η έμφαση δίνεται στην ταχύτητα "blowout". Στους αεροκινητήρες ο καθορισμός των ορίων που ορίζουν την ομαλή καύση είναι μείζονος σημασίας.

#### **6.1.a. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ**

Οι βρόγχοι ευστάθειας μπορούν να προσδιοριστούν με δύο τρόπους. Είτε η ευσταθής καύση πραγματοποιείται με μία σταθερή τιμή της ροής του αέρα, οπότε αλλάζει η ροή του καυσίμου μέχρι τη σβέση, είτε η ροή του καυσίμου παραμένει σταθερή και η ροή του αέρα αυξάνει έως τη σβέση. Και στις δύο περιπτώσεις σημειώνονται στο διάγραμμα οι τιμές των παροχών του αέρα και του καυσίμου που πέτυχαν "blowout". Πρακτικά προτιμότερη είναι η πρώτη μέθοδος αφού μεταβολές στην παροχή του καυσίμου επηρεάζουν μόνο το λόγο καυσίμου/ αέρα ενώ μεταβολές στην παροχή του αέρα επηρεάζουν και τους δύο άξονες του διαγράμματος.

Η επιθυμητή απόδοση ευστάθειας σε ένα αεροπορικό θάλαμο καύσης επιτυγχάνεται ύστερα από σειρά πειραμάτων "blowout" σε σταθερές και προκαθορισμένες τιμές πίεσης και θερμοκρασίας. Ενώ το καύσιμο ρέει και το μείγμα αναφλέγεται, σταδιακά μειώνουμε την παροχή του καυσίμου έως ότου εμφανιστεί "blowout". Αφού σημειωθούν οι τιμές των



παροχών καυσίμου και αέρα η καύση επανέρχεται σε φυσιολογικές συνθήκες. Έπειτα η παροχή του καυσίμου μειώνεται έως τη σβέση της φλόγας. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται με τις μεταβολές της παροχής του αέρα και στο τέλος προκύπτει κάτι ανάλογο με το διάγραμμα 6.1. Η περιοχή ευσταθούς καύσης περικλείεται από τα παραπάνω όρια, τα οποία συγκλίνουν όσο η παροχή αυξάνει έως ότου η τιμή της φτάσει σε ένα σημείο πέρα από το οποίο η καύση είναι αδύνατη για κάθε λόγο καυσίμου/ αέρα.

Μία ολοκληρωμένη εικόνα της απόδοσης της ευστάθειας μπορούμε να έχουμε αφού σχεδιάσουμε βρόγχους ευστάθειας για διαφορετικές πιέσεις. Αυτές τις πληροφορίες από τα διαγράμματα τις χρησιμοποιούμε για τη δημιουργία πινάκων που ορίζουν επακριβώς τα όρια της ομαλής καύσης.

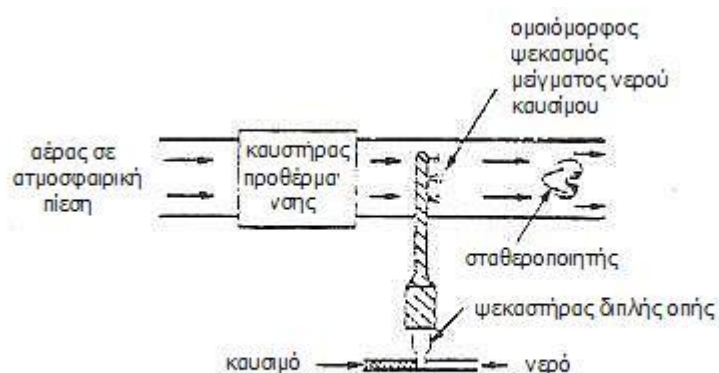
### **6.1.β. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΓΧΥΣΕΩΣ ΝΕΡΟΥ**

Τα χαρακτηριστικά των κινητήρων είναι τέτοια ώστε σε σταθερές στροφές η μάζα του αέρα που εισάγεται στο θάλαμο καύσης να είναι ανάλογη με την πίεση του αέρα. Ο ρυθμός δε, με τον οποίο εξελίσσονται οι χημικές αντιδράσεις εξαρτάται από την πίεση ανάλογα με τον τύπο του καυσίμου, το λόγο καυσίμου/ αέρα και τη διαδικασία προετοιμασίας του καυσίμου. Αυτό σημαίνει ότι όσο η πίεση μειώνεται τόσο μειώνεται και η παροχή του καυσίμου αλλά πιο σημαντική είναι η μείωση του ρυθμού εξέλιξης των χημικών αντιδράσεων. Το αποτέλεσμα βέβαια είναι η χειροτέρευση της απόδοσης καύσης. Ωστόσο στις δοκιμές ενός θαλάμου καύσης μόνο στη μικρότερη πίεση λειτουργίας αυτά τα προβλήματα εκτίθενται πλήρως. Στα αεροσκάφη αυτή η πίεση είναι ίση με μερικά KPa.

Δυστυχώς το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας μιας διάταξης χαμηλής πίεσης είναι απαγορευτικά υψηλό. Με διαφορά η φθηνότερη διάταξη παροχής αέρα είναι το FAN και για αυτό μεγάλο μέρος των πειραμάτων κάνει χρήση αέρα από εκεί. Αυτός ο αέρας βρίσκεται σε ατμοσφαιρική πίεση για αυτό και στα πειράματα καύσης χρησιμοποιήθηκαν πολύ πλούσια ή πολύ φτωχά μείγματα. Όταν τα πειράματα έγιναν στην πιο ενδιαφέρουσα περιοχή όπου ο λόγος καυσίμου/ αέρα είναι περίπου ίσος με το στοιχειομετρικό, είτε οι ταχύτητες ήταν πολύ υψηλές, είτε οι διαστάσεις πολύ μικρές. Ο σχεδιασμός του διαγράμματος με υποθέσεις είναι μία διαδικασία με αμφίβολα αποτελέσματα.

Η τεχνική της εγχύσεως νερού δεν αντιμετωπίζει τέτοια προβλήματα. Επιτρέπει την εκτίμηση των θαλάμων καύσης ενώ λειτουργούν μέσα στα κανονικά όρια ταχυτήτων και λόγων καυσίμου/ αέρα. Χρησιμοποιείται αέρας που "συμπιέστηκε" στο FAN και οι χαμηλές πιέσεις αντιμετωπίζονται με την εισαγωγή νερού στο θάλαμο καύσης. Η ουσία της μέθοδοι είναι η θεωρητική ισοδυναμία μεταξύ της μείωσης στην πίεση αντιδράσεως και της θερμοκρασίας αντιδράσεως (η οποία τώρα επιτυγχάνεται με την εισαγωγή νερού).

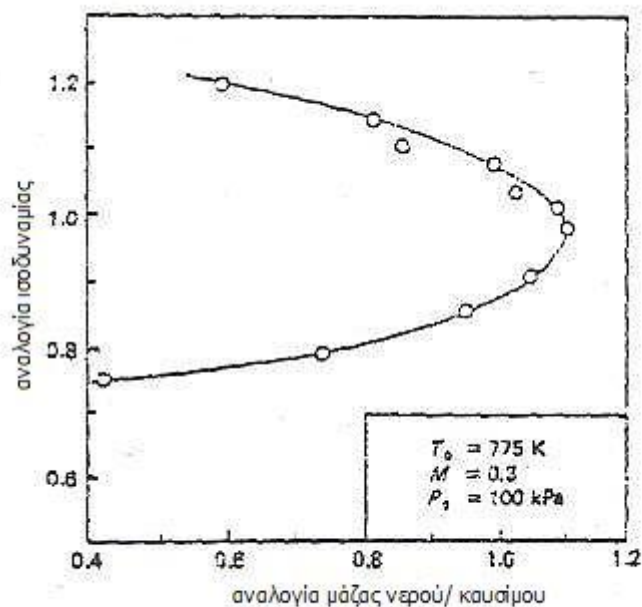
Μία από τις πιο χρήσιμες εφαρμογές της μεθόδου είναι η συλλογή πληροφοριών γύρω από τη σβέση για διαφορετικά σχήματα συγκρατητών φλόγας. Ο συγκρατητής στη δοκιμή τοποθετείται μέσα σε ένα σωλήνα, ο οποίος συνδέεται στην έξοδο ενός FAN μέσω ενός θαλάμου καύσης. Μπροστά από το συλλέκτη υπάρχουν σωλήνες σχεδιασμένοι να εγχύσουν καύσιμο ή μείγμα καυσίμου/ νερού ομοιόμορφα κατά μήκος της ροής. Παρότι δεν αποτελεί καθοριστικό παράγοντα, το καύσιμο και το νερό μπορούν να προαναμειχθούν πριν εισαχθούν στους σωλήνες έγχυσης. Αυτό επιτυγχάνεται με το "δίδυμο ψεκαστή", στον οποίο ο βοηθητικός αγωγός εγχύει καύσιμο ενώ ο κύριος νερό (βλ. σχ.6.2).



## 6.2. ΒΑΣΙΚΟ ΜΗΧΑΝΗΜΑ ΜΕ ΤΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΑ ΤΕΣΤ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΕΧΝΙΚΗ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΝΕΡΟΥ

Η διαδικασία της δοκιμής είναι αρκετά απλή. Η ταχύτητα και θερμοκρασία των αερίων που ρέουν στο συγκρατητή ρυθμίζονται στις επιθυμητές τιμές. Το καύσιμο αναφλέγεται και η φλόγα εγκαθίσταται στη ζώνη ανακυκλοφορίας μπροστά από το συγκρατητή. Το νερό εισάγεται σταδιακά αναμειγμένο με το καύσιμο σε αυξανόμενες ποσότητες μέχρι να επέλθει το σβήσιμο του κινητήρα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για αρκετό αριθμό παροχών καυσίμου μέχρι να σχηματισθεί ο βρόγχος ευστάθειας. Μία τυπική μορφή του φαίνεται στο σχ. 6.3, όπου η τεταγμένη παριστάνει το λόγο ισοδυναμίας του μίγματος καυσίμου/ αέρα και η τετμημένη το λόγο μαζών της παροχής του νερού προς την παροχή του καυσίμου. Φαίνεται ξεκάθαρα πόσο εύκολα ορίζεται, με τη μέθοδο εγχύσεως νερού, το οριακό σημείο ευστάθειας.

Οι καμπύλες αυτής της μορφής παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για τη σύγκριση διαφορετικών σχεδιάσεων. Η μόνη υπόθεση που απαιτείται και η οποία είναι απόλυτα λογική, είναι ότι η σχεδίαση που απαιτεί το περισσότερο νερό για να διακόψει τη λειτουργία της είναι και η πιο ευσταθής.



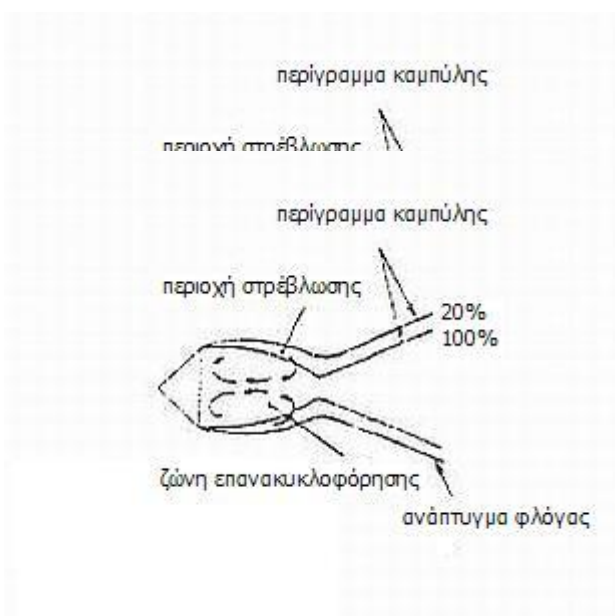
### 6.3. ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΑΠΟ ΒΑΛΒΙΔΑΣ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΕΧΝΙΚΗ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΝΕΡΟΥ

## **6.2. ΣΥΓΚΡΑΤΗΤΕΣ ΦΛΟΓΑΣ ΤΡΑΧΙΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ**

Από όλους τους τύπους συγκρατητών φλόγας αυτός ο τύπος αναμφίβολα είναι ο πιο σημαντικός. Το μεγαλύτερο μέρος πειραματικών πληροφοριών συλλέχθηκαν με τους τραχιούς συγκρατητές οι οποίοι χρησιμοποιούνται και στα RAMJET αλλά και στα συστήματα μετάκαυσης.

### **6.2.α. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΦΛΟΓΑΣ**

Το ροϊκό πεδίο γύρω από το συγκρατητή φλόγας φαίνεται στο σχ. 6.4. Στο σχήμα ο συγκρατητής δέχεται από τα αριστερά ένα προαναμειγμένο μείγμα καυσίμου. Η αποκόλληση εμφανίζεται στο χείλος εκφυγής του συγκρατητή και ένα κύμα κρούσης σχηματίζεται μπροστά. Η περιοχή κοντά στο κύμα ευνοεί την ανακυκλοφορία της ροής. Όσο η ταχύτητα στην περιοχή είναι μικρότερη από αυτήν του κυρίου ρεύματος, σχηματίζεται ένα στρώμα διάτμησης μέσα στο οποίο ευνοούνται οι διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας και μάζας.



Σύμφωνα με τις θεωρίες που έχουν αναπτυχθεί σχετικά με το νέο μείγμα, αυτό όταν εισέρχεται στο στρώμα αναφλέγεται από τα ζεστά προϊόντα της καύσης, που βρέθηκαν εκεί εξαιτίας της ζώνης ανακυκλοφορίας. Το καμένο μείγμα επιστρέφει μπροστά στο στρώμα διάτμησης και με τη σειρά του αναφλέγει το γειτονικό του νέο μείγμα. Όταν τα τέλεια πλέον καμένα αέρια αποχωρούν από το στρώμα, ένα μέρος ανακυκλοφορεί πίσω στην περιοχή του κύματος παρέχοντας μία διαρκή πηγή ανάφλεξης στο εισαγόμενο μείγμα.

## **6.2.β. ΜΕΛΕΤΕΣ ΨΥΧΡΗΣ ΡΟΗΣ**

Οι Nicholson και Field μετά από πειράματα πήραν πολλές ενδιαφέρουσες φωτογραφίες από θερμές και ψυχρές ροές γύρω από τους τραχιούς συγκρατητές φλόγας. Μετά από μελέτη συμπέραναν ότι σε συνθήκες κοντά στην κράτηση του κινητήρα, ένα πλήθος δινών εμφανιζόταν μέσα στην περιοχή του στρώματος, γεγονός που επιβεβαιωνόταν και με το ψυχρό ρεύμα. Στις μελέτες του Williams όμως δεν παρατηρήθηκε διασκορπισμός δινών ούτε στην ευσταθή κατάσταση ούτε λίγο πριν τη σβέση της φλόγας. Σύμφωνα με διάφορους ειδικούς, σε συνθήκες ψυχρής ροής, η δίνη της ζώνης ανακυκλοφορίας είναι τόσο μεγάλη και επιμήκης, σε σχέση με τις διαστάσεις του συγκρατητή φλόγας, ώστε η καύση είναι τόσο ασταθής που οδηγείται σε σβέση. Αντίθετα στις θερμές ροές τα φαινόμενα δινών δεν εκτείνονται πολύ μπροστά και επομένως παραμένουν κάτω από τη σταθεροποιητική επιρροή του συγκρατητή φλόγας.

### **6.2.γ. ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ**

Η διαδικασία της τυρβώδους ανταλλαγής πίσω από το συγκρατητή έχει ερευνηθεί πειραματικά από πολλούς επιστήμονες. Τα αποτελέσματα των ερευνών αυτών δείχνουν ότι η τυρβώδης ανταλλαγή ορίζεται από τη γεωμετρία της ζώνης ανακυκλοφορίας και το χρόνο παραμονής των αερίων στη ζώνη αυτή. Ο μέσος χρόνος παραμονής, ο οποίος είναι μία ένδειξη του πόσο γρήγορα η θερμότητα και η μάζα της ζώνης ανακυκλοφορίας μεταδίδονται στο στρώμα διάτμησης, έχει βρεθεί ότι είναι αντιστρόφως ανάλογος της ταχύτητας ροής. Η παρουσία της φλόγας μειώνει αυτή την ανταλλαγή με ένα συντελεστή από 2 έως 8 σε ψυχρές συνθήκες, μειώνοντας έτσι αισθητά και το χρόνο παραμονής. Τέλος ο χρόνος αυτός φαίνεται ότι είναι ανεξάρτητος του λόγου του μείγματος και ότι μειώνεται με την ένταση της τύρβης του κυρίου ρεύματος. Οι συγκρατητές φλόγας που εκτρέπουν τη ροή ως επί το πλείστον απαιτούν το μεγαλύτερο χρόνο παραμονής και έχουν τα πιο ευρέα όρια ευστάθειας.

### **6.2.δ. ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΕΜΦΡΑΞΗΣ**

Εάν ένας συγκρατητής φλόγας τοποθετηθεί σ' ένα αγωγό, πράγμα που είναι και το συνηθέστερο φαινόμενο, μια επιπλέον παράμετρος ελέγχου της ευστάθειας του είναι και ο λόγος έμφραξης. Ορίζεται ως 'Ο λόγος της επιφάνειας της προβολής του συγκρατητή στην επιφάνεια της διανομής του αγωγού. Όλες οι θεωρίες περί ευστάθειας δείχνουν ότι τα όρια ευστάθειας γίνονται ευρύτερα όσο οι χαρακτηριστικές διαστάσεις του συγκρατητή αυξάνουν. Ωστόσο όταν το όλο σύστημα βρίσκεται εκτός αγωγού τα ακραία τοιχώματα εμποδίζουν την ελεύθερη κίνηση του αέρα γύρω από το σώμα με αποτέλεσμα η αξονική ταχύτητα στην περιοχή αυτή να είναι μεγαλύτερη αν το σήμα βρισκόταν σε ελεύθερο ρεύμα. Μια σοβαρή συνέπεια της μεγάλης αυτής αξονικής ταχύτητας είναι η συνέπεια της μείωσης του βάθους της ζώνης ανακυκλοφορίας. Έτσι για δεδομένο μέγεθος συγκρατητή φλόγας, κάθε αύξηση στη γεωμετρία έμφραξης, η οποία επιτυγχάνεται για παράδειγμα με τη μείωση της επιφάνειας ροής του σωλήνα, θα μειώσει το μέγεθος της ζώνης ανακυκλοφορίας και έτσι θα επηρεάσει την ευστάθεια της φλόγας.

### **6.2.ε. ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΥΡΒΗΣ**

Η τύρβη παίζει σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια της φλόγας ενισχύοντας τη μείξη των προϊόντων της καύσης με το άκαυτο καύσιμο. Έρευνες έγιναν και για τον αριθμό του Reynolds που καθορίζει τα όρια της ευσταθούς φλόγας. Παρατηρήθηκε ότι κάτω από ένα κρίσιμο αριθμό Reynolds (βρέθηκε ίσος με 104) η περιοχή της ροής που καθορίζει την ευστάθεια της φλόγας είναι σχεδόν στρωτή. Σε μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds η διαδικασία καύσης κυριαρχείται από τυρβώδη ανάμειξη. Ενδιαφέροντα είναι τα φαινόμενα, από πρακτικής πλευράς, που

παρατηρούνται για αριθμούς  $Re > 10^5$ .

## **6.2.στ. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΕΥΡΗΜΑΤΑ ΣΕ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ (ΣΥΓΚΡΑΤΗΤΕΣ ΤΡΑΧΙΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ)**

Οι ιδιότητες των συγκρατητών αυτού του είδους έχουν μελετηθεί εκτενώς και ένα σημαντικό πλήθος από πειραματικά δεδομένα έχει συλλεχθεί. Τα κύρια συμπεράσματα αυτών των μελετών συζητούνται και συνοψίζονται παρακάτω:

### **6.2.στ.1. ΤΥΠΟΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

Για τύπους καυσίμου όπως η κηροζίνη έχει βρεθεί ότι η καύση μπορεί να διατηρηθεί με φτωχότερα μείγματα με καύσιμα χαμηλής ειδικής βαρύτητας. Έτσι τα παραφινικά καύσιμα γενικά θα χρησιμοποιούνται σε μικρότερους λόγους καυσίμου/ αέρα απ' ό,τι τα αρωματικά καύσιμα. Ομοίως οι ελαφρές βενζίνες επιδεικνύουν πολύ μεγαλύτερες τιμές χαμηλού σημείου σβέσης απ' ό,τι το αέριο πετρέλαιο. Οι καλύτερες αυτές τιμές των καυσίμων χαμηλού ειδικού βάρους οφείλονται εν μέρη στο μικρότερο ιξώδες εξαιτίας του οποίου ψεκάζονται πιο εύκολα και εν μέρη στην μεγάλη τους πτητικότητα. Ο συνδυασμός αυτός αποτελεί ευνοϊκό γεγονός για τη γρήγορη εξαέρωση, επιτρέποντας καύση με φτωχά μείγματα. Για τον ίδιο λόγο τα πολύ πτητικά καύσιμα είναι επιρρεπή στην υψηλή (πλούσια) σβέση σε μεγάλα ύψη εξαιτίας της παρουσίας υπερβολικών ποσών ατμών στη ζώνη ανακυκλοφορίας.

### **6.2.στ.2. ΛΟΓΟΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ/ ΑΕΡΑ**

Εφόσον η ταχύτητα της φλόγας και ο ρυθμός της χημικής αντίδρασης παίρνουν τις μέγιστες τιμές τους κοντά στο στοιχειομετρικό λόγο καυσίμου/ αέρα θα ήταν λογικό να υποτεθεί ότι οι ταχύτητες σβέσης θα έχουν μέγιστο στον ίδιο λόγο. Αυτό πρακτικά είναι σωστό για τις περισσότερες πραγματικές καταστάσεις όπου ο αριθμός Reynolds είναι υψηλός και η ροή είναι τυρβώδης. Όμως κάτω από ένα κρίσιμο αριθμό Reynolds ίσο με 104 στην περιοχή όπου η μείξη χαρακτηρίζεται από μοριακή διάχυση εμφανίζονται μέγιστες ταχύτητες σβέσης σε ισοδύναμους λόγους. Σε ψηλούς αριθμούς Reynolds (πάνω από 105) λαμβάνει χώρα η τυρβώδης διάχυση και τα ακραία σημεία σβέσεως εμφανίζονται είτε στη στοιχειομετρική αναλογία καυσίμου/ αέρα είτε σε ελάχιστα πλουσιότερα μείγματα. Όμως με την εφαρμογή των συστημάτων ψεκασμού η κορυφή των βροχών εμφανίζεται σε λόγους καυσίμου/ αέρα που διαφέρουν από το στοιχειομετρικό κατά ένα ποσό που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ψεκασμού και το επίπεδο της απόδοσης της καύσης. Για παράδειγμα αν μια μεγάλη ποσότητα καυσίμου εγκαταλείψει τη ζώνη αντίδρασης άκαυτη η κορυφή του βρόχου ευσταθείας

εμφανίζεται προς την πλευρά των πλουσιότερων μειγμάτων της στοιχειομετρικής. Αντίθετα αν τα χαρακτηριστικά του εγχυτήρα καυσίμου και της ροής του αέρα είναι τέτοια ώστε το ποσό του αέρα εισάγεται με τον ψεκασμό να μειώνεται με τη μείωση της ροής του καυσίμου, τότε η κορυφή του βρόχου ευστάθειας τείνει να βρεθεί στην πλευρά των φτωχότερων μειγμάτων από το στοιχειομετρικό. Σ' όλες όμως τις περιπτώσεις η μέγιστη ευστάθεια επιτυγχάνεται όταν το μείγμα είναι περίπου στοιχειομετρικό δηλαδή όταν ο λόγος καυσίμου/ αέρα στη ζώνη καύσης υπολογίζεται με βάση τις πραγματικές ποσότητες που μετέχουν στην καύση.

### **6.2.στ.3. ΤΑΧΥΤΗΤΑ**

Κάθε αύξηση στην ταχύτητα του ρεύματος πάντα έχει μια αρνητική συνέπεια στην ευστάθεια της φλόγας. Πειραματικά έχει βρεθεί ότι κάθε αύξηση της ταχύτητας μειώνει το πλήθος των λόγων καυσίμου/ αέρα για τα οποία η καύση είναι δυνατή.

### **6.2.στ.4. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ**

Γνωρίζοντας την εκθετική σχέση που συνδέει το ρυθμό πραγματοποίησης των χημικών αντιδράσεων με τη θερμοκρασία, αναμένεται ότι αύξηση στη θερμοκρασία εισαγωγής του μείγματος θα οδηγήσει σε διεύρυνση της περιοχής ευσταθούς καύσης και σε αύξηση της ταχύτητας στην οποία παρατηρείται σβέση. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνεται πλήρως από τα πειράματα που έγιναν και από τα οποία προκύπτει ότι η ταχύτητα σβέσης  $V_{bo}$  είναι ευθέως ανάλογη της θερμοκρασίας για τα πλούσια μείγματα και ευθέως ανάλογη του τετραγώνου της θερμοκρασίας για φτωχά μείγματα. Οι ειδικοί αποδίδουν τα διαφορετικά αυτά αποτελέσματα στο γεγονός ότι τα όρια του φτωχού μείγματος εξαρτώνται περισσότερο από τη χημεία ενώ τα όρια πλούσιου μείγματος από την ανάμειξη.

### **6.2.στ.5. ΠΙΕΣΗ**

Αύξηση της πίεσως πάντα ευνοεί την ευστάθεια της καύσης. Για αέρια μείγματα μία αύξηση στην πίεση μεγαλώνει το βρόγχο ευστάθειας αυξάνοντας την ταχύτητα σβέσης ( $V_{bo}$ ), ειδικά για πλούσια μείγματα και μείγματα με αναλογία σχεδόν ίση με τη στοιχειομετρική. Οι επιδράσεις από την αύξηση της πίεσης είναι αμελητέες στα όρια ευστάθειας των φτωχών μειγμάτων. Στα ετερογενή μείγματα οι συνέπειες της αύξησης της πίεσης είναι πιο θεαματικές αφού η αύξηση αυτή ευνοεί (μέσω του αριθμού Reynolds) την εξαέρωση του καυσίμου.

Πειραματικά έχει δειχθεί ότι η ταχύτητα σβέσης  $V_{bo}$  είναι ανάλογη του όρου  $Pm$ , όπου το  $m$  παίρνει τιμές από 0.75 έως 1.0.

### **6.2.στ.6. ΤΥΡΒΗ**

Από τις πρώτες πειραματικές μελέτες των επιδράσεων που έχει η τύρβη στην ευστάθεια της καύσης, παρατηρήθηκε μία χειροτέρευση της ευστάθειας με την αύξηση της τύρβης, η οποία αποδίδεται στην μεταβολή της μέσης τοπικής ταχύτητας στο συγκρατητή. Μια άλλη ένδειξη που οδήγησε σε αυτή τη διαπίστωση είναι και η μικρή επιρροή της αύξησης της τύρβης, στα όρια της ευσταθούς καύσης, σε μεγάλους συγκρατητές.

Πάντως και με νεότερα πειράματα επιβεβαιώνεται αυτή η αντίστροφη αναλογία της αύξησης της τύρβης με την ευστάθεια της καύσης, αλλά αποδίδεται στην εισαγωγή πρόσθετου άκαυτου μείγματος στην περιοχή του κύματος, η οποία αυξάνει την επιβάρυνση, του συστήματος και μειώνει το διαθέσιμο χρόνο για καύση.

### **6.2.στ.7. ΜΕΓΕΘΟΣ ΣΥΓΚΡΑΤΗΤΗ**

Αύξηση του μεγέθους του συγκρατητή αυξάνει τα όρια ευσταθούς καύσης αφού μεγαλώνει ο χρόνος παραμονής των αντιδρώντων στη ζώνη ανακυκλοφορίας. Τα πειραματικά δεδομένα που αφορούν την επίδραση του μεγέθους του συγκρατητή στα όρια ευσταθούς καύσης, παριστάνονται σε διαγράμματα του  $V_{bo}/ D_c^w$  με το λόγο ισοδυναμίας, όπου  $D_c$  είναι μια χαρακτηριστική διάσταση του συγκρατητή. Η τιμή του  $w$  για τυρβώδεις ροές κυμαίνονται από 0.75 έως 1.0.

### **6.2.στ.8. ΣΧΗΜΑ ΣΥΓΚΡΑΤΗΤΗ**

Το σχήμα των σταθεροποιητών τραχιού συστήματος επιδρά στα χαρακτηριστικά της ευστάθειας μέσω του σχήματος και μέγεθος της περιοχής του κύματος. Οι ροές γύρω από συγκρατητές διαφορετικών σχημάτων δεν παρουσιάζουν καμία ομοιότητα.

### **6.2.στ.9. ΨΕΚΑΣΜΟΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

Για κάθε δεδομένο θάλαμο καύσης που λειτουργεί υπό συγκεκριμένη πίεση θερμοκρασία, ταχύτητα και τύπο καυσίμου υπάρχει ένα κρίσιμο μέσο μέγεθος σταγόνας καυσίμου κάτω από το οποίο οποιαδήποτε αλλαγή στον ψεκασμό του καυσίμου δεν επιδρά καθόλου στο όριο φτωχού μείγματος. Για μεγαλύτερες τιμές της μέσης διαμέτρου σταγόνας (SMD) το καύσιμο δεν είναι πλήρως εξαερωμένο μέσα στη ζώνη ανακυκλοφορίας, έτσι απαιτείται πρόσθεση κι άλλου καυσίμου προκειμένου να πραγματοποιηθεί η καύση. Αυτό προκαλεί αύξηση του λόγου ισοδυναμίας για το όριο σβέσης φτωχού μείγματος με την αύξηση του SMD.



### **6.2.Ζ. ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΕΥΡΗΜΑΤΩΝ**

Συμπερασματικά η ταχύτητα σβέσης ( $U_{bo}$ ) αυξάνεται και τα όρια ευσταθούς καύσης διευρύνουμε με:

1. Μείωση της ταχύτητας του κυρίου ρεύματος.
2. Αύξηση της θερμοκρασίας εισαγωγής στο θάλαμο καύσης.
3. Αύξηση στην πίεση των αερίων.
4. Μείωση στην ένταση της τύρβης.
5. Οποιαδήποτε αλλαγή του λόγου ισοδυναμίας προς τη μονάδα.
6. Αύξηση του μεγέθους του συγκρατητή.
7. Αύξηση του συντελεστή οπισθέλκουσας του συγκρατητή.
8. Μείωση της μετωπικής επιφάνειας του συγκρατητή (για δεδομένο μέγεθος)

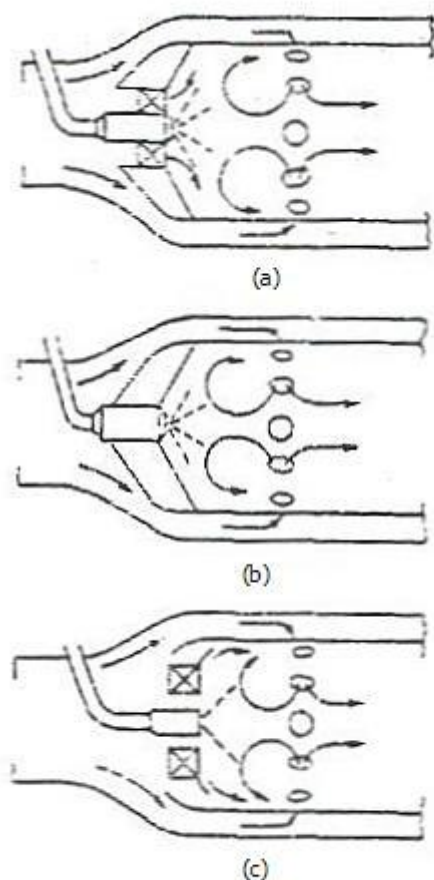
Για υγρά καύσιμα η ευστάθεια καύσης βελτιώνεται επιπλέον με

1. Αύξηση της πτητικότητας του καυσίμου.
2. Καλύτερος (λεπτότερος) ψεκασμός δηλαδή μείωση του μέσου μεγέθους της σταγόνας.

### **6.3. ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ ΣΕ ΘΑΛΑΜΟ ΚΑΥΣΗΣ.**

Ο σχεδιαστής δεν μπορεί να επέλθει σε μεγάλο βαθμό πάνω στην ποσότητα του άκαυτου μείγματος που εισάγεται στη ζώνη ανακυκλοφορίας του σταθεροποιητή. Συνήθως αυτή η ποσότητα είναι ένα μικρό μόνο μέρος της κύριας ροής η οποία διαφέρει σημαντικά με τις αλλαγές στην ταχύτητα του αέρα και στην θερμοκρασία. Στους κυρίους θαλάμους καύσης όμως ο αέρας μπαίνει στη ζώνη ανακυκλοφορίας από ανοίγματα που βρίσκονται στα τοιχώματα τους, έτσι ο σχεδιαστής μπορεί να ελέγξει το ποσό του αέρα που θα συμμετάσχει στην πρωτογενή καύση διαλέγοντας προσεκτικά το μέγεθος, το σχήμα και τον αριθμό των ανοιγμάτων.

Στο σχήμα 6.5α φαίνεται ο τύπος της πρωτογενούς ζώνης που χρησιμοποιείται στους περισσότερους σωληνοειδείς θαλάμους καύσης. Το κύριο χαρακτηριστικό που αφορά και τη διαδικασία της ευστάθειας είναι που δημιουργείται και διατηρείται από τον αέρα που εισάγεται από πηγές δινών τοποθετημένες γύρω από μια σειρά οπών που βρίσκονται πάνω στο τοίχωμα του θαλάμου καύσης. Επιπρόσθετα στην πρωτογενή ζώνη αναμειγνύονται καμένα και καιγόμενα μείγματα με άκαυτο αέρα και καύσιμο. Κάτω από αυτές τις συνθήκες είναι δυνατή η εγκατάσταση ενός μηχανισμού συνεχούς ανάφλεξης και η καύση μπορεί να διατηρηθεί για μεγάλες μεταβολές στην πίεση, ταχύτητα και στο λόγο καυσίμου/ αέρα.

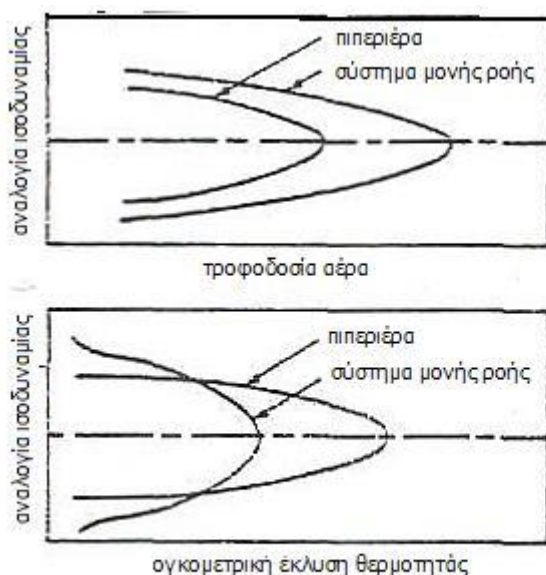


#### 6.5. ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΡΩΤΑΡΧΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ

Στο σχήμα 6.5β φαίνεται η πρωτογενής ζώνη σε δακτυλιοειδή θάλαμο καύσης. Βασικά είναι το ίδιο με το ίδιο το προηγούμενο σύστημα μόνο που το μεγαλύτερο μέρος του αέρα που συμμετέχει στην καύση εισάγεται από μια σειρά οπών που βρίσκονται πάνω στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης. Σ' ορισμένους δακτυλιοειδείς θαλάμους καύσης όμως η πρωτογενής παροχή αέρα συμπληρώνεται σημαντικά από τον αέρα που χρησιμοποιείται για ψύξη στην περιοχή του θόλου και από τον αέρα που χρησιμοποιείται στη διαδικασία προετοιμασίας του καυσίμου όπως βλέπουμε στο σχήμα 6.5c.

Στους κύριους θαλάμους καύσης η ευστάθεια της φλόγας δεν έχει μελετηθεί πειραματικά και όπως οι σταθεροποιητές τραχιού σχήματος όμως έχουν δοθεί ικανοποιητικές περιγραφές από κάποιους ερευνητές. Γενικά η μέγιστη ευστάθεια καύσης επιτυγχάνεται εγχύοντας την κύρια ροή μέσα από ένα μικρό νούμερο μεγάλων οπών. Αυτό γιατί οι μεγάλες οπές παράγουν μεγάλους πίδακες και μεγάλης κλίμακας ανακυκλοφορίας και με τη σειρά τους εξασφαλίζεται άφθονο χρόνο για την καύση. Ωστόσο για δεδομένη μάζα αέρα μεγάλωμα στο μέγεθος των οπών επιτυγχάνεται μόνο εις βάρος του αριθμού των οπών. Παρότι δεν υπάρχουν συγκεκριμένες προδιαγραφές που να ορίζουν το βέλτιστο αριθμό οπών για δακτυλιοειδείς θαλάμους καύσης, ένα ζευγάρι από αντικριστές οπές ανά εγχυτήρα καυσίμου

είναι η ελάχιστη διαμόρφωση. Μάλλον το διπλάσιο θα ήταν προτιμότερο. Διάφορα πειράματα που εξέταζαν την απόδοση διαφόρων θαλάμων καύσης τύπου δοχείων έχουν γίνει χρησιμοποιώντας ομογενή μείγματα κηροζίνης και αέρα. Το ένα σύστημα παρήγαγε μιας μεγάλης κλίμακας αναστροφή ροής με ταυτόχρονες παροχές μείγματος από μια σειρά μεγάλων οπών. Το άλλο αποκαλούμενο ως "πιπεριέρα" χρησιμοποιούσε ένα μεγάλο αριθμό μικρών αναβλυστήρων σε μια προσπάθεια να πετύχει ομοιογένεια στη ζώνη καύσης. Οι βρόχοι ευστάθειας για τα δύο αυτά συστήματα φαίνονται στο σχήμα 6.6 στο οποίο φαίνεται ξεκάθαρα η υπεροχή του θαλάμου καύσης με τη μονή σειρά οπών που εξασφαλίζει μεγάλη ανακυκλοφορία. Ωστόσο γι' αυτό το σύστημα το επίπεδο απόδοσης του θαλάμου Γ καύσης στη σβέση είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή για το άλλο σύστημα. Η αναπαράσταση των μετρήσεων σε διάγραμμα λόγου ισοδυναμίας προς απόδοση θερμότητας ανά μονάδα όγκων δείχνει υπεροχή του συστήματος πολλών αναβλυστήρων στο ρυθμό έκλυσης θερμότητας όμως υπολείπεται στο πεδίο τιμών λόγου καύσιμου/ αέρα στο οποίο διατηρεί την καύση. Έρευνες έχουν επίσης γίνει για τον προσδιορισμό των παραγόντων που επηρεάζουν την ευστάθεια σε σωληνοειδείς θαλάμους καύσης. Οι μεταβλητές που μελετήθηκαν περιλάμβαναν διάμετρο δοχείου (από 5 έως 12.7mm) και πίεση (από 17 έως 50 KPa). Τα πειράματα είχαν ως σκοπό τον προσδιορισμό των συνεπειών της μεταβολής του αριθμού και μεγέθους των οπών εγχύσεως αέρα και του μήκους της ζώνης ανακυκλοφορίας. Εμπειρικά αποδείχθηκε ότι τα όρια ευστάθειας είναι συνάρτηση του όρου  $V/DP^{0.8}$  όπου V η ταχύτητα στην πρωτογενή ζώνη και D η διάμετρος του δοχείου.



## 6.6. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΚΑΥΣΤΗΡΩΝ

### **6.3.α. ΕΓΧΥΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

Ένας από τους κυριότερους παράγοντες που διέπουν τα όρια σβέσης φτωχού μείγματος είναι και ο τρόπος έγχυσης καυσίμου. Η φτωχή κατανομή καυσίμου των ψεκαστών με πίεση και στροβίλους της απλής, διπλής ή δίδυμης ομόκεντρης μορφής εξασφαλίζει ότι μέρος της καύσης θα γίνει σε μείγματα πλουσιότερα από το μέσο όρο. Αυτό σημαίνει ότι ακόμα και αν ο λόγος καυσίμου/ αέρα πέσει σε τιμές κάτω από το κανονικό όριο "φτωχής" σβέσης, η φλόγα θα διατηρηθεί εξαιτίας τη παρουσίας, μέσα στη ζώνη καύσης, περιοχών με σχεδόν στοιχειομετρικών μείγματα. Αυτό εξηγεί τη χρήση ψεκαστών πίεσης προτιμούνται για ευρεία όρια καύσης. Αντίθετα οι air blast ψεκαστές που παρέχουν πιο ομοιόμορφη κατανομή καυσίμου χαρακτηρίζονται από σχετικά στενά όρια καύσης.

Τελευταία μεγάλο ενδιαφέρον δείχνεται για τη διαμόρφωση φτωχού προ-αναμειγμένου, προ-εξαερωμένου (KPP) καυσίμου ως μέσο για τον έλεγχο της εκπομπής καπνού και οξειδίων αζώτου. Χαρακτηριστικό αυτής της διαμόρφωσης είναι η προσπάθεια για πλήρη εξαέρωση του καυσίμου και ολική μείξη καυσίμου και αέρα πριν την καύση.

Χαμηλές θερμοκρασίες αντιδράσεων είναι ζωτικής σημασίας για την πραγματοποίηση του στόχου της διαμόρφωσης LPP αυτό απαιτεί ότι για μεγάλο μέρος του φάσματος λειτουργίας του κινητήρα ο λόγος καυσίμου/ αέρα μέσα στη ζώνη καύσης πρέπει να είναι πολύ κοντά στην τιμή του ορίου "φτωχής" σβέσης.

### **6.4. ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΔΗ ΣΥΓΚΡΑΤΗΤΩΝ ΦΛΟΓΑΣ**

Η παραπάνω συζήτηση επικεντρώθηκε κυρίως στους συγκρατητές τύπου εκτροπής και δοχείου. Αυτοί οι δύο τύποι έχουν και το μεγάλο πρακτικό ενδιαφέρον στους σημερινούς κινητήρες και συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο μέρος της γνώσης που έχουμε σήμερα για την καύση. Ωστόσο και άλλοι τύποι συγκρατητών αναπτύχθηκαν με μοναδικά πλεονεκτήματα σε ορισμένες ειδικές εφαρμογές. Οι κυριότεροι είναι:

#### **6.4.α. ΒΗΜΑΤΙΚΟΣ ΣΥΓΚΡΑΤΗΤΗΣ**

Αρκετοί ερευνητές επεξεργάστηκαν τις ιδιότητες συγκρατητή της φλόγας της ξαφνικής εκτόνωσης σ' ένα αγωγό που περιέχει κινούμενο εύφλεκτο μείγμα. Αν ο αγωγός έχει κυκλική διατομή και μπροστά και πίσω από την απότομη εκτόνωση, το σύστημα αναφέρεται ως θάλαμος καύσης εκτόνωσης. Αν ο αγωγός έχει δύο διαστάσεις σε κάθετη τομή και η απότομη εκτόνωση γίνει στο ένα μόνο τοίχωμα καλείται ανάστροφης εκτόνωσης. Ο προσδιορισμός των ορίων φτωχού μείγματος έγιναν διατηρώντας τη ροή του καυσίμου μέχρι τη σβέση. Στη διαμόρφωση αυτή τα πειραματικά αποτελέσματα είναι αρκετά ικανοποιητικά σε σχέση με τα θεωρητικά.

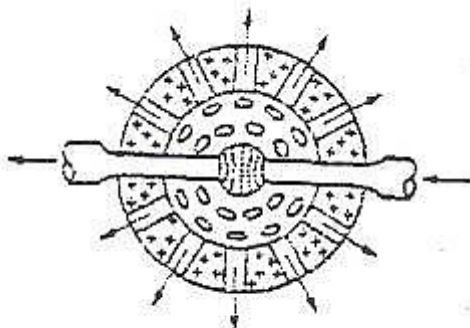
#### **6.4.β. ΔΙΑΤΡΗΤΑ ΕΛΑΣΜΑΤΑ**

Οι συγκρατητές φλόγας της μορφής των διάτρητων ελασμάτων εμφανίζουν πλεονεκτήματα σε θάλαμο καύσης τύπου LPP. Πρώτον ο συνδυασμός της μεγάλης ταχύτητας και του λεπτού οριακού στρώματος μέσα στις οπές είναι αρκετός να εμποδίσει την αντιστροφή της φλόγας σ' οποιοσδήποτε συνθήκες λειτουργίας. Δεύτερον οι κλεισμένες περιοχές ανάμεσα στις τρύπες ευνοεί τη διάδοση της φλόγας από τη μια περιοχή της καύσης στην άλλη. Τρίτον λόγω της ύπαρξης μικρών ζωνών καύσης είναι δυνατό να επιτευχθεί και καύση υψηλής έντασης και μικρός χρόνος παραμονής στις ζώνες αυτές. Το τελευταίο αυτό χαρακτηριστικό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την ελαχιστοποίηση του σχηματισμού των οξειδίων αζώτου. Μετά από αρκετά πειράματα στα οποία η θερμοκρασία εισόδου ήταν γύρω στους 750 K, η ταχύτητα των αερίων 20 m/sec, η πτώση πίεσης στο συγκρατητή της τάξεως του 3-4%, το πλήθος των οπών ποίκιλλε από 7 έως 128, οι διάμετροι των οπών από 0.25 έως 1.0 cm και τέλος οι λόγοι έμφραξης έπαιρναν τιμές από 50-80%, αποδείχθηκε ότι η ταχύτητα σβέσης  $V_{bo}$  εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την θερμοκρασία αλλά και από τον όρο  $C_d D_c$  όπου  $C_d$  είναι ο συντελεστής οπισθέλκουσας που μετρά τα αεροδυναμικά αποτελέσματα που παράγουν οι διάφοροι λόγοι έμφραξης και  $D_c$  είναι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των οπών. Η συνθήκη η οποία αποτελεί ικανοποιητικό κριτήριο ευστάθειας της καύσης όπως προκύπτει από τα πειράματα είναι:

$$V_{bo} / C_d * D_c (T_0 / 760)^{1.5}$$

#### **6.4.γ. ΚΙΝΗΤΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ**

Οι κινητοί αντιδραστήρες είναι η λύση με την οποία πετυχαίνουμε μεγάλη απόδοση θερμότητας χωρίς περιορισμούς στην ανάμειξη. Στις μέρες μας θεωρείται πολύτιμο εργαλείο για τη μελέτη πολύ υψηλών ρυθμών αντιδράσεων. Η σφαιρική μορφή του αντιδραστήρα φαίνεται στο σχήμα 6.7. Ένα ομοιόμορφο καύσιμο μείγμα γνωστής σύνθεσης και θερμοκρασίας εγχύεται στο κέντρο του αντιδραστήρα και αναμειγνύεται ταχύτατα με καιγόμενο αέρα μέσα στον όγκο αντίδρασης. Ταυτόχρονα μια ίση ποσότητα καμένων καυσαερίων φεύγει μέσω των οπών έξω από τη σφαίρα.

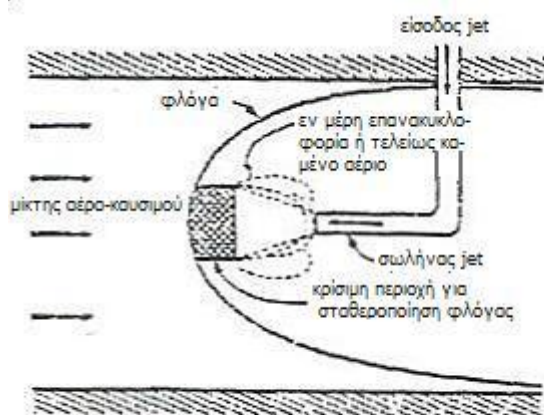


#### 6.7. ΚΙΝΗΤΟΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ

Για κάποια περίοδο πιστευόταν ότι η απότομη ανάμειξη που οφειλόταν στους γρήγορους αναβλυστήρες εξασφάλιζε πραγματικά ομογενή θερμοκρασία και σύνθεση μέσα στον όγκο αντίδρασης. Αργότερα όμως αποδείχθηκε ότι και τα ροϊκά δυναμικά φαινόμενα είναι εξίσου σημαντικά και ότι οι γεωμετρικές μεταβλητές όπως το μέγεθος των οπών και η απόσταση μεταξύ τους συμβάλλουν σημαντικά στα χαρακτηριστικά της καύσης. Παρόλα αυτά οι κινητοί αντιδραστήρες αποτελούν ότι καλύτερο υπάρχει σήμερα όσο αφορά τον ρυθμό απόδοσης θερμότητας ανά όγκο αφού οι περιορισμοί στην ανάμειξη, οι οποίοι υπάρχουν στην πραγματικότητα για να εξασφαλίσουν την ελάχιστη πτώση πίεσης στο θάλαμο καύσης, έχουν ουσιαστικά εξαλειφθεί.

#### **6.4.δ. ΑΝΑΒΛΥΣΤΗΡΕΣ ΥΓΡΟΥ**

Οι τυρβώδεις φλόγες μπορούν επίσης να σταθεροποιηθούν αρκετά ικανοποιητικά με τη χρήση ενός αναβλυστήρα ροής ανάποδης ροής. Το σχήμα 6.8 δείχνει τη διαμόρφωση του συστήματος. Η φλόγα σταθεροποιείται γύρω από μια περιοχή ανακοπής ( $V < S$ ) που βρίσκεται λίγο μπροστά από την έξοδο του αναβλυστήρα (η πραγματική απόσταση εξαρτάται από τις σχετικές ταχύτητες της ροής και του υγρού). Οι έρευνες για τα όρια σβέσης πλούσιου και φτωχού μείγματος έδειξαν ότι οι ταχύτητες σβέσης εξαρτώνται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τη χημική φύση της ροής του αναβλυστήρα. Αφού οι ρυθμοί της απόδοσης θερμότητας των μειγμάτων κοντά στη στοιχειομετρική, οι μεγαλύτερες ταχύτητες σβέσης θ' αναμενόταν να αντιστοιχούν σε συνθήκες κοντά στη στοιχειομετρική στη κρίσιμη περιοχή για την ευστάθεια της φλόγας. Τα πειραματικά αποτελέσματα συμφωνούν μ' αυτή την υπόθεση. Πα στοιχειομετρικά μείγματα του αναβλυστήρα αντίθετης ροής η μέγιστη ταχύτητα σβέσης αντιπροσωπεύει λόγο ισοδυναμίας ίσο με 1 στην κύρια ροή. Για αναβλυστήρα καθαρού αέρα η μέγιστη ταχύτητα σβέσης εμφανίζεται για λόγους ισοδυναμίας μεγαλύτερους από τη μονάδα.



#### 6.8. ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΝΑΒΛΥΣΤΗΡΑ ΝΕΡΟΥ

Ένα πλεονέκτημα του συγκρατητή αυτής της διαμόρφωσης είναι ότι ο λόγος ισοδυναμίας που αντιστοιχεί στη μέγιστη ταχύτητα μπορεί να μεταβληθεί μέσα σε αρκετά ευρέα όρια σε κάθε επιθυμητή τιμή με κατάλληλη εκλογή της χημικής σύνθεσης της ροής εγχύσεως. Η εφαρμογή σε συστήματα προώθησης εμφανίζει και άλλο πλεονέκτημα: Όταν δεν απαιτείται παραπέρα αύξηση της ώσης ο αναβλυστήρας μπορεί να σταματήσει τη λειτουργία του έτσι ώστε να μειωθεί η πτώση πίεσης σε τιμές που είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές που έχουμε σε συστήματα με συγκρατητή φλόγας τραχιού σχήματος. Το σύστημα αναβλυστήρα αντιστρόφου ροής δεν υιοθετήθηκε στην μετάκαυση λόγω των προβλημάτων παροχής του υγρού στον αναβλυστήρα.

Οι αναβλυστήρες του υγρού χρησιμοποιούνται για την ευστάθεια της φλόγας στους συγκρατητές της μορφής "πετάσματος αναβλυστήρων". Σε αυτόν τον τύπο έχουμε ένα κύλινδρο με εξωτερική διάμετρο 2.5mm στον οποίο υπάρχουν δύο αντκρυστές σειρές οπών διαμέτρου 1mm και λόγο βήματος/ διάμετρο ίσο με 2.0 κύλινδρος αυτός είναι τοποθετημένος στο θάλαμο καύσης με τέτοιο τρόπο ώστε ο αέρας να εγχύεται κάθετα στην κύρια ροή.

Πλεονέκτημα της διαμόρφωσης αυτής αποτελεί το γεγονός ότι η έμφραξη μπορεί να διαφέρει για να ταιριάξει με τις συνθήκες λειτουργίας του θαλάμου καύσης, με καλή επιλογή του λόγου πίεσης του αναβλυστήρα. Άλλο πλεονέκτημα είναι η μικρή πτώση πίεσης όταν δεν είναι σε λειτουργία.

Μετρήσεις που έχουν γίνει δείχνουν ότι το ποσό του άκαυτου μείγματος που εισάγεται μέσα στη ζώνη ανακυκλοφορίας, στο σύστημα "πετάσματος αναβλυστήρων" είναι περίπου 5 φορές μεγαλύτερο από το συμβατικό σχήμα V με την ίδια έμφραξη. Πιθανώς αυτό οφείλεται στην ενίσχυση της ανταλλαγής τύρβης που παράγεται μεταξύ της κύριας ροής και της ζώνης ανακυκλοφορίας από τη ροή του αναβλυστήρα. Μεγαλύτερα επίπεδα τύρβης μπορούν να αποδειχθούν ευνοϊκά στην αύξηση της απόδοσης της καύσης και στους ρυθμούς έκλυσης

θερμότητας.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του συστήματος "πετάσματος αναβλυστήρων", που αφορούν τη μεταβολή της έμφραξης και τη μικρή απώλεια πίεσης, σε συνδυασμό με τις μέτριες απαιτήσεις του λόγου πίεσης του αναβλυστήρα και του ρυθμού της ροής αυτής, τον κάνουν ιδανικό για χρήση στη μετάκαυση.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>

## ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

### **7.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η επιθεώρηση των θαλάμων καύσης, που πραγματοποιείται κατά τακτά διαστήματα, μας κάνει φανερά προβλήματα λυγισμού και ρωγμών των θαλάμων. Όταν τέτοια προβλήματα εμφανιστούν σε σχετικά σύντομα χρονικά διαστήματα, η αιτία είναι συνήθως λάθος είτε σχεδιαστικό είτε κατασκευαστικό. Συνήθως ένα θερμό σημείο μπορεί να εμφανιστεί εξαιτίας του κακού ψεκασμού είτε αυτός οφείλεται στην κακή εκλογή της μεθόδου εγχύσεως του καυσίμου είτε στο σχηματισμό άνθρακα στο ακροφύσιο του ψεκαστή. Πάντως αν τέτοια φαινόμενα δεν εμφανιστούν σχετικά σύντομα είναι πολύ λογική η ύπαρξη ρωγμών και άλλων παρόμοιων καταπονήσεων, μετά από μεγάλες περιόδους χρήσης. Συνήθως τα προβλήματα αυτά, όπως οι ρωγμές, εμφανίζονται σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από γεωμετρική ασυνέχεια όπως π.χ. οι εισαγωγές αέρα ή οι διακλαδώσεις ψύξης και άλλα σημεία όπου μεγάλες εσωτερικές τάσεις μπορούν να επαχθούν κατά τη διάρκεια της κατασκευής.

Ο θάλαμος καύσης έχει πολύπλοκη δομή και ο υπολογισμός των θερμικών καταπονήσεων καθώς και ο προσδιορισμός του ορίου ζωής είναι εξαιρετικά δύσκολοι. Γενικά πάντως μπορεί να λεχθεί ότι τα φαινόμενα λυγισμού είναι αποτελέσματα αφενός της λειτουργίας για αρκετή ώρα υπό συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και αφετέρου των ρυθμών μεταβολής της θερμοκρασίας. Αντίστοιχα οι ρωγμές προκαλούνται εξαιτίας των μεταβατικών συνθηκών στη θερμοκρασία των τοιχωμάτων. Αυτές οι συνθήκες συνήθως εμφανίζονται στην απογείωση και κατά τη διάρκεια των επιταχύνσεων, οπότε και τα φορτία λυγισμού, κατά μήκος των τοιχωμάτων, είναι εξίσου μέγιστα. Συνεπώς για να εξασφαλισθεί ένα αποδεκτό όριο ζωής, για το θάλαμο καύσης, είναι σημαντικό να διατηρηθούν οι θερμοκρασίες και οι μεταβολές τους σε χαμηλά επίπεδα. Για τα σημερινά υλικά των θαλάμων, που χρησιμοποιούνται, έχει βρεθεί ότι η θερμοκρασία λειτουργίας δεν πρέπει να ξεπερνά τους 1100 K. Η πρακτική σημασία αυτού του ορίου είναι η απαίτηση της ύπαρξης ενός τρόπου αφαίρεσης θερμότητας από τα τοιχώματα του θαλάμου. Η συνηθέστερη μέθοδος είναι η δημιουργία ενός λεπτού φιλμ αέρα κατά μήκος της εσωτερικής πλευράς του θαλάμου καύσης.

Όπως είναι γνωστό ο θερμικός βαθμός απόδοσης ενός αεροκινητήρα βελτιώνεται με την αύξηση του λόγου συμπίεσης. Πα αυτό και οι λόγοι συμπίεσης αυξήθηκαν σημαντικά με την αύξηση του λόγου συμπίεσης. Για αυτό και οι λόγοι συμπίεσης αυξήθηκαν σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Η αύξηση αυτή της πίεσης αυξάνει το ποσό της θερμότητας που μεταδίδεται στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης με την ακτινοβολία. Επιπλέον η αναπόφευκτη αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στο θάλαμο μειώνει την ικανότητα του αέρα να ψύξει τα τοιχώματα μέσω συναγωγής. Έτσι όσο η συμπίεση αυξάνει τόσο το πρόβλημα της ψύξης γίνεται σοβαρότερο, σε σημείο ώστε, σε ορισμένους κινητήρες, τουλάχιστον το 1/3 του ολικού αέρα να χρησιμοποιείται για ψύξη. Η μείωση του αέρα καύσης, κυρίως στη ζώνη αραιώσης, έχει τα αντίθετα από τα αναμενόμενα αποτελέσματα, όσον αφορά τη θερμοκρασία στην έξοδο.

Επιπλέον η απότομη ψύξη επιφέρει μείωση στην απόδοση της καύσης, ειδικά στις χαμηλές στροφές, με αυξημένη την εκπομπή του CO και των UHC. Για αυτούς τους λόγους κάθε προσπάθεια πρέπει να επικεντρωθεί στη βελτίωση της απόδοσης των τεχνικών ψύξης, έτσι ώστε να διατηρηθεί στο ελάχιστο η απαίτηση για αέρα ψύξης.

## **7.2. ΨΥΞΗ ΜΕ ΛΕΠΤΟ ΣΤΡΩΜΑ ΑΕΡΑ (ΦΙΛΜ)**

Παρά το γεγονός ότι πολλές μέθοδοι για την αφαίρεση θερμότητας από το θάλαμο καύσης με εξωτερική ακτινοβολία και συναγωγή χρησιμοποιούν ένα λεπτό στρώμα (φιλμ) αέρα ψύξης στο εσωτερικό των τοιχωμάτων, το όνομα ψύξη με φιλμ χρησιμοποιείται για μια μέθοδο ψύξης που έχει εφαρμογές στην τεχνολογία των αεροπορικών και βιομηχανικών κινητήρων. Συγκεκριμένα η μέθοδος αυτή κάνει χρήση ενός αριθμού οπών, στην επιφάνεια του φλογοσωλήνα, μέσα από τις οποίες εγχύεται αξονικά ψυχρός αέρας κατά μήκος των εσωτερικών τοιχωμάτων του, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα προστατευτικό φιλμ ψυχρού αέρα, μεταξύ των καυσαερίων και του φλογοσωλήνα. Το φιλμ ψύξης καταστρέφεται βαθμιαία, εξαιτίας της τυρβώδους μείξης του με τα καυσαέρια, έτσι η κοινή πρακτική απαιτεί την ύπαρξη αλληπάλληλων οπών ανά 4-8 cm, κατά μήκος του θαλάμου καύσης. Στο τέλος του φλογοσωλήνα, η επιταχυνόμενη, λόγω ακροφυσίου, ροή τείνει να καταπνίξει την τυρβώδη ροή των καυσαερίων, με αποτέλεσμα τη διατήρηση του φιλμ ψύξης για μεγαλύτερη απόσταση.

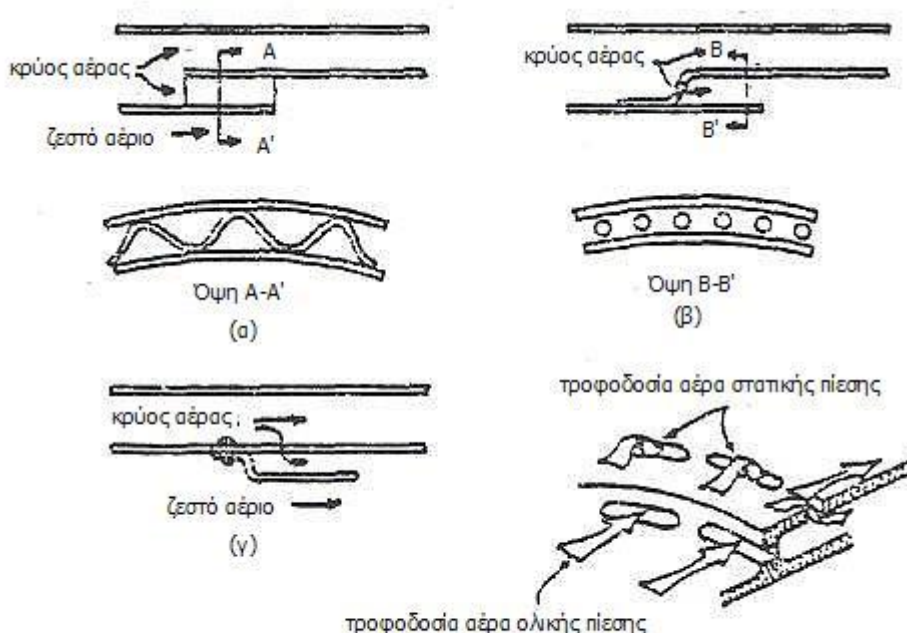
Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι οι οπές έγχυσης ή οι λωρίδες ψύξης μπορούν να σχεδιασθούν έτσι ώστε να ανταποκρίνονται στις πιο αντίξοες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Επιπλέον η ακαμψία εξαιτίας των λωρίδων ψύξης έχουν σαν αποτέλεσμα και ελαφρότερη κατασκευή και αυξημένη μηχανική αντοχή. Κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν παρέχει ομοιόμορφη θερμοκρασία στα τοιχώματα. Τα τοιχώματα είναι ψυχρότερα κοντά στις οπές και όσο απομακρυνόμαστε από αυτές η θερμοκρασία αυξάνει. Για αυτό και η μέθοδος θεωρείται ότι σπαταλά αέρα για ψύξη, αφού τα τοιχώματα που βρίσκονται γύρω από τις οπές είναι "υπερψυγμένα".

Οι πιο ευρεία διαδεδομένες μέθοδοι ψύξης με φιλμ αέρα είναι:

### **7.2.α. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΠΤΩΣΗΣ ΤΗΣ ΟΛΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ**

Στους θαλάμους καύσης υψηλών ταχυτήτων, η πτώση της στατικής πίεσης κατά μήκος των τοιχωμάτων μπορεί να είναι πολύ μικρή για να εγχυθεί ο επαρκής αέρας για το φιλμ ψύξης. Σε αυτήν την περίπτωση καταφεύγουμε σε διατάξεις που κάνουν χρήση της πτώσης της ολικής πίεσης κατά μήκος των τοιχωμάτων. Συνήθως ο θάλαμος καύσης αποτελείται από μέρη των οποίων η διάμετρος αυξάνει σταδιακά, όσο πλησιάζουμε την έξοδο, με ένα δακτυλιοειδές διάκενο να χωρίζει το κάθε μέρος από το επόμενο. Σε ορισμένες διατάξεις τα

μέρη αυτά επικαλύπτουν το ένα το άλλο και συνδέονται μεταξύ τους με ράβδους δηλαδή π.χ. με αυλάκωση της μεγαλύτερης διαμέτρου και συγκολλώντας τις ράβδους στο μπροστά μέρος. Άλλες διατάξεις χρησιμοποιούν ένα αυλακώδες διάκενο γνωστό, ως "κυματοειδές", όπως φαίνεται στο σχ7.1. Στο σχήμα αυτό επίσης διακρίνεται το σχηματικό διάγραμμα της διάταξης με το πλήθος των δακτυλίων, κατασκευή που προτιμάται έναντι της κυματοειδούς.



7.1. ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΨΥΞΗΣ ΜΕ ΛΕΠΤΟ ΣΤΡΩΜΑ ΑΕΡΑ (Α) ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΠΤΩΣΗΣ ΟΛΙΚΗΣ ΠΙΕΣΕΩΣ (Β) ΣΤΟΙΒΑΓΜΕΝΕΣ ΣΤΕΦΑΝΕΣ (Γ) ΔΑΚΤΥΛΙΟΙ ΨΥΞΗΣ ΔΙΑΣΚΟΡΠΙΣΜΟΥ

## **7.2.β. ΔΑΚΤΥΛΙΟΙ ΨΥΞΗΣ ΔΙΑΣΚΟΡΠΙΣΜΟΥ (SPLASH-COOLING RINGS)**

Οι διατάξεις αυτές χρησιμοποιούν την πτώση της στατικής πίεσης κατά μήκος των τοιχωμάτων ως δύναμη έγχυσης του αέρα ψύξης (σχ. 8.28). Ο αέρας ψύξης απομαστεύεται από το δακτύλιο μέσω μιας σειράς μικρών οπών στο τοίχωμα και οδηγείται κατά μήκος της εσωτερικής επιφάνειας, μέσω ενός προστατευτικού στρώματος εκτροπέα, ο οποίος είναι ή συγκολλημένος ή ηλωμένος πάνω στα τοιχώματα. Η λειτουργία του προστατευτικού αυτού στρώματος είναι να μετατρέψει τους ξεχωριστούς πίδακες του αέρα σε ένα συνεχές στρώμα. Χωρίς αυτό το στρώμα οι πίδακες θα συμπαρέσυραν μαζί τους και τα θερμά καυσαέρια, που είναι πλούσια σε καύσιμο, δημιουργώντας έτσι περιοχές καύσης κοντά στα τοιχώματα. Γενικά το μήκος του προστατευτικού στρώματος είναι περίπου 4 φορές μεγαλύτερο του βάθους των οπών, το οποίο είναι της τάξης των 0.15 έως 0.30 cm.

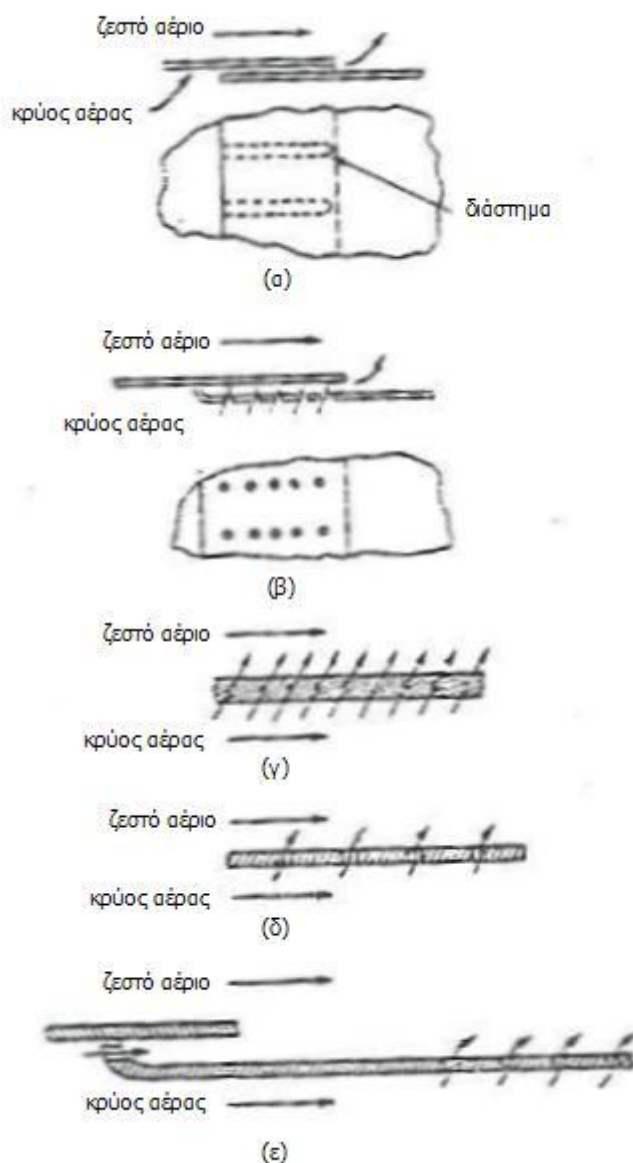
### **7.2.γ. ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΟΙ ΣΕ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΙ**

Μία εναλλακτική μέθοδος κατασκευής αντίστοιχων διατάξεων είναι η κατεργασία σε τόννο, της διόδου του ψυχρού αέρα, ενός δακτυλίου από μέταλλο. Στη συνέχεια σχηματίζονται σειρά από οπές έτσι ώστε ο ψυχρός αέρας να εισαχθεί είτε μετωπικά είτε εξαιτίας της διαφοράς στατικής πίεσης ή με συνδυασμό των παραπάνω (σχ. 8.28).

### **7.2.δ. ΣΧΕΤΙΚΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΨΥΞΗΣ ΜΕ ΦΙΛΜ ΑΕΡΑ**

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η μέθοδος της εκμετάλλευσης της πτώσης της ολικής πίεσης, είναι ότι έχει τη δυνατότητα παροχής επαρκούς ποσότητας αέρα, ακόμα και αν η πτώση της στατικής πίεσης, κατά μήκος των τοιχωμάτων του θαλάμου, είναι αμελητέα. Μειονέκτημα της διάταξης είναι ότι οι μεταβολές στην ταχύτητα του αέρα έχουν άμεσες επιπτώσεις στην παροχή του αέρα ψύξης. Επιπλέον στην κυματοειδή κατασκευή έχει διαπιστωθεί ότι μπορούν να εμφανιστούν μεγάλες μεταβολές στην ποσότητα του αέρα ψύξης, μεταξύ των κυματοειδών θαλαμίσκων, εξαιτίας των ελαχίστων διαφορών στο πάχος του υλικού κατασκευής. Ακόμα και οι μικρές μεταβολές στο πάχος του μετάλλου, μέσα στις προβλεπόμενες ανοχές της κατεργασίας, μπορούν να έχουν αξιόλογες συνέπειες στη μεταβολή της παροχής του ψυχρού αέρα. Παρόλα αυτά, με προσεκτικό έλεγχο στην ποιότητα της συγκόλλησης και με πειράματα που ελέγχουν τη συμπεριφορά και την ακρίβεια της ροής, οι κυματοειδείς διατάξεις φιλμ ψύξης χρησιμοποιούνται με επιτυχία στους αεροπορικούς κινητήρες, με λόγους συμπίεσης πάνω από 18:1. Η κατασκευή με το πλήθος των οπών παρέχει μια λιγότερο συμπαγή μορφή του θαλάμου καύσης αλλά επειδή οι οπές εισαγωγής του αέρα έχουν σχηματισθεί με κοπτικό εργαλείο, η διαστατική τους ακρίβεια είναι μεγαλύτερη, με αποτέλεσμα μικρότερες μεταβολές στην παροχή του ψυχρού αέρα.

Στις περισσότερες όμως των περιπτώσεων, η διαθέσιμη πτώση της στατικής πίεσης είναι περισσότερο από αρκετή για την επίτευξη της απαιτούμενης ταχύτητας του ψυχρού αέρα, και συνήθως υπάρχει η πρόβλεψη για την ύπαρξη των μέσων που αυξάνουν αυτήν την πτώση πίεσης. Με τη χρήση των δακτυλίων ψύξης διασκορπισμού η μετωπική επιφάνεια που παρέχεται από τη σειρά των οπών, στα τοιχώματα του θαλάμου, υπολογίζεται για να μετρηθεί η απαιτούμενη ποσότητα του αέρα ψύξης. Το προστατευτικό στρώμα δημιουργεί μια περιοχή όπου η τύρβη εξαφανίζεται και οι πίδακες αέρα συνεργάζονται για τη δημιουργία ενός δακτυλιοειδούς στρώματος. Στην έξοδο του θαλάμου καύσης το πάχος του διακένου έχει υπολογισθεί να επιτυγχάνει την απαιτούμενη ταχύτητα του αέρα ψύξης. Συνεπώς ένα κύριο πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι η ταχύτητα του ψυχρού αέρα μπορεί να διατηρηθεί στη βέλτιστη της τιμή, ανεξάρτητα από την πτώση πίεσης κατά μήκος των τοιχωμάτων του θαλάμου.



## 7.2. ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΓΙΑ ΨΥΞΗ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ

Οι κατεργασμένοι σε εργαλειομηχανές δακτύλιοι, προσφέρουν πλεονεκτήματα όσον αφορά τον πιο ακριβή έλεγχο της ποσότητας του αέρα ψύξης και την αξιόλογη βελτίωση της αντοχής της κατασκευής. Το τελευταίο είναι σημαντικό ιδιαίτερα για τους μεγάλους δακτυλιοειδείς θαλάμους. Το βασικό μειονέκτημα της διάταξης είναι το σημαντικά υψηλό αρχικό κόστος. Στο τέλος όμως αυτό αποσβένεται από το πολύ μεγαλύτερο όριο ζωής του θαλάμου, που επιτυγχάνεται.

### **7.3. ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΨΥΞΗΣ ΤΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ**

Όσο οι λόγοι συμπίεσης αυξάνουν, το ποσό του αέρα που απαιτείται, για να ψύξει ικανοποιητικά τα τοιχώματα, αυξάνει σε σημείο που να προκαλεί σοβαρή έλλειψη αέρα στη ζώνη αραιώσης. Η διαπίστωση της σοβαρότητας του προβλήματος οδήγησε, τελευταία, στην επανάκτηση του ενδιαφέροντος γύρω από την ανάπτυξη νέων διατάξεων ψύξης και καινούργιων μεθόδων κατασκευής των θαλάμων καύσης, που θα απαιτούν λιγότερο αέρα για να λειτουργούν ομαλά.

#### **7.3.α. ΦΙΛΜ ΨΥΞΗΣ ΜΕ ΑΥΞΗΜΕΝΗ ΣΥΝΑΓΩΓΗ**

Μελέτες που έχουν γίνει απέδειξαν ότι μπορεί να επιτευχθεί σημαντική μείωση, στην απαιτούμενη ροή του αέρα ψύξης, με αύξηση της μετάδοσης θερμότητας μέσω συναγωγής στην πλευρά ψύξης του θαλάμου: Στο σχ. 7.2 φαίνεται η χρήση θαλάμου καύσης με διπλά τοιχώματα που παρέχει ψύξη με φιλμ αέρα και αυξημένη εξωτερική συναγωγή.

Στις ίδιες μελέτες διαπιστώθηκε ότι υπάρχει ένας βέλτιστος λόγος παροχής αέρα ψύξης/ ροή συναγωγής, ο οποίος επιτυγχάνει την ελάχιστη θερμοκρασία των τοιχωμάτων. Σε ένα σχετικό πείραμα, η αυξημένη συναγωγή μείωσε την  $T_w$  (θερμοκρασία τοιχωμάτων) κατά 50 K με μικρή μεταβολή στη ροή του αέρα ψύξης. Σε άλλο πείραμα η  $T_w$  δε μεταβλήθηκε αλλά η παροχή αέρα ψύξης μειώθηκε κατά 75%.

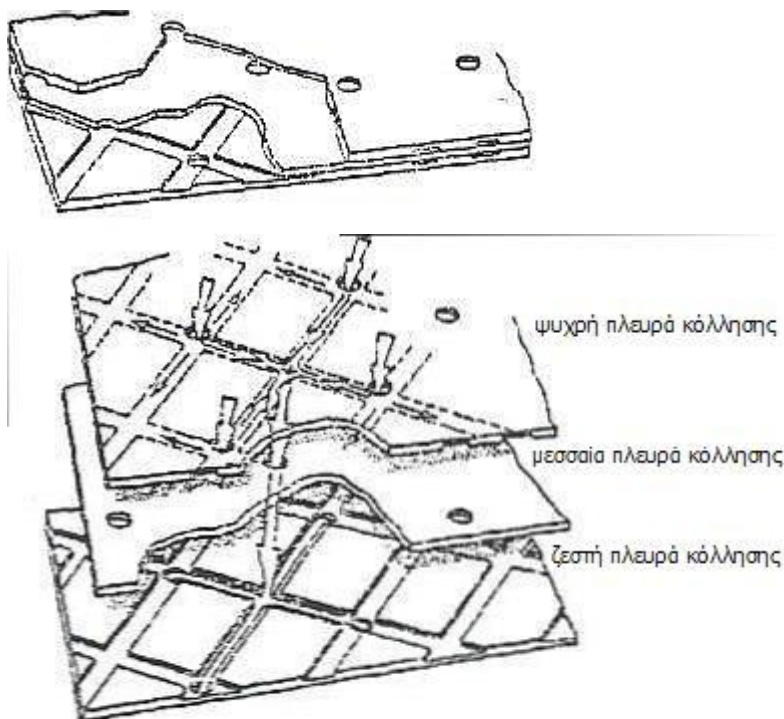
Μεγαλύτερη αύξηση του συντελεστή συναγωγής της θερμότητας από τα τοιχώματα στον αέρα (C2), με τη δημιουργία τραχειών εσωτερικών επιφανειών, του θαλάμου καύσης με τα διπλά τοιχώματα (π.χ. με χημική προσβολή) είχε σαν αποτέλεσμα επιπρόσθετη βελτίωση της απόδοσης της ψύξης.

#### **7.3.β. ΨΥΞΗ ΜΕ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗ ΤΟΥ ΑΕΡΑ**

Μια άλλη μέθοδος βελτίωσης της ψύξης, με συμβατικές διαδικασίες, είναι, όπως φαίνεται στο σχ. 7.2 και η μέθοδος της ψύξης με πρόσκρουση. Είναι πανομοιότυπη με τη μέθοδο που αναφέραμε προηγουμένως, εκτός από το γεγονός ότι η διόδος ανάμεσα στα δύο τοιχώματα είναι φραγμένη στο μπροστά άκρο και το εξωτερικό τοίχωμα είναι διάτρητο. Οι πολλαπλοί πίδακες του αέρα, που εκρέουν από τις οπές, ψύχουν το εσωτερικό τοίχωμα και κατόπιν αναμειγνύονται μεταξύ τους δημιουργώντας ένα δακτυλιοειδές στρώμα ψύξης.

### **7.3.γ. ΨΥΞΗ ΜΕ "ΑΝΑΠΝΟΗ"**

Με τη γνώση των ιδιοτήτων των υλικών, στις υψηλές θερμοκρασίες, και των μηχανικών και θερμικών καταπονήσεων, που υπόκειται ο θάλαμος καύσης, είναι δυνατό να υπολογισθεί η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία των τοιχωμάτων. Ένα ιδανικό σύστημα ψύξης θα καθιστούσε δυνατή τη διατήρηση αυτής της μέγιστης θερμοκρασίας, σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα, αφού οι ψυχρότερες περιοχές στα τοιχώματα σημαίνουν πρακτικά σπατάλη του αέρα ψύξης. Από αυτή την πλευρά, αναμφίβολα η καλύτερη μέθοδος, αυτή που κάνει τη Βέλτιστη και πιο οικονομική χρήση του αέρα ψύξης, είναι η ψύξη με "αναπνοή". Στη μέθοδο αυτή ο θάλαμος καύσης είναι κατασκευασμένος από πορώδες υλικό με συνέπεια ποσότητα ψυχρού αέρα, να ρέει μέσα από τους πόρους, προς τα καυσαέρια (σχ. 7.2). Οι πόροι των τοιχωμάτων αποτελούν ένα πλήθος μικρών περασμάτων, παρέχοντας έτσι μεγάλη επιφάνεια πάνω από την οποία λαμβάνει χώρα η μετάδοση θερμότητας, από το θερμά αέρια στον αέρα ψύξης. Επιπλέον επειδή η διασπορά των πόρων είναι ομοιόμορφη πάνω στην επιφάνεια των τοιχωμάτων, οι μικροί πίδακες, που σχηματίζονται, αμέσως συνεργάζονται για το σχηματισμό ενός λεπτού προστατευτικού στρώματος αέρα ψύξης, πάνω σε όλη την επιφάνεια των τοιχωμάτων. Με αυτόν τον τρόπο η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή από τα ζεστά καυσαέρια προς τα τοιχώματα, μειώνεται δραστικά.



### **7.3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ROLLS ROYCE TRANSPLY**



Ένα βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει η μέθοδος είναι το εξής : για τη δημιουργία ενός σταθερού οριακού στρώματος ψύξης, στα εσωτερικά τοιχώματα του θαλάμου, η ροή του αέρα ψύξης πρέπει να πηγάζει μέσα από τους πόρους με όσο το δυνατό μικρότερη ταχύτητα. Όμως για μέγιστη μετάδοση θερμότητας μέσα στα τοιχώματα απαιτείται μεγάλη ταχύτητα.

### **7.3.γ.1. ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΨΥΞΗΣ ΜΕ ΑΝΑΠΝΟΗ"**

Ενώ η μέθοδος της ψύξης με τη χρήση πορωδών υλικών είναι η πιο αποτελεσματική, η εφαρμογή της δυσχεραίνεται λόγω των περιορισμένων διαθέσιμων κατάλληλων υλικών. Τα ήδη υπάρχοντα πορώδη υλικά δεν επέδειξαν την απαιτούμενη διάρκεια ζωής, κυρίως εξαιτίας της έμφραξης των λεπτών διόδων από ξένα σωματίδια και της μικρής αντίστασης στην οξείδωση της επιφανείας.

Η έρευνα για εναλλακτικές μεθόδους αύξησης της εσωτερικής μετάδοσης θερμότητας, μέσα στο φλογοσωλήνα, οδήγησε στην ανάπτυξη και χρήση υλικών αποτελούμενων από πολλά ελάσματα, από τα οποία μπορεί να κατασκευαστεί μία διάταξη " ημιψύξης με αναπνοή". Αυτά τα υλικά κατασκευάζονται με τη συγκόλληση με ορείχαλκο δύο ή περισσότερων ελασμάτων, από υλικό που αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες και διαθέτει πλήθος από διόδους που συνδέουν το ένα έλασμα με το άλλο (σχ. 7.3).

Το βασικότερο πλεονέκτημα της ψύξης με "αναπνοή" είναι η μείωση των εκπομπών των ρύπων, αφού τα τοιχώματα δεν υπερθερμαίνονται και εξασφαλίζεται περισσότερος αέρας για καλύτερη κατανομή της ροής. Ωστόσο απαιτούνται περαιτέρω έρευνες για τη μείωση του κόστους και την επίτευξη τις μη έμφραξης των διόδων.

### **7.3.δ. ΨΥΞΗ ΜΕ ΕΚΡΟΗ ΑΕΡΑ**

Μια πιο πρακτική διάταξη, που ακολουθεί τη φιλοσοφία των πορωδών τοιχωμάτων, είναι η χρήση τοιχωμάτων πάνω στα οποία είναι σχηματισμένο μεγάλο πλήθος οπών (σχ. 7.2). Οι οπές αυτές θα έχουν τέτοια διάμετρο ώστε να μη φράζουν από τη σκόνη αλλά όχι τόσο ώστε να επιτρέπουν την εισαγωγή περίσσειας αέρα. Δεδομένου ότι η διεισδυτικότητα των πιδάκων είναι μικρή, δημιουργείται ένα ομοιογενές στρώμα ψύξης, κατά μήκος της εσωτερικής επιφάνειας του φλογοσωλήνα. Εάν όμως η διείσδυση του αέρα είναι μεγάλη, αυτός αναμειγνύεται με τα καυσαέρια με αποτέλεσμα την ανεπαρκή ψύξη του θαλάμου καύσης. Η μέθοδος παρά το γεγονός ότι μπορεί να έχει γενική εφαρμογή, χρησιμοποιείται σε ορισμένες περιοχές του θαλάμου, όπου η ύπαρξη του ψυχρού αέρα υπαγορεύεται και από άλλους λόγους εκτός την ψύξη. Κάτω από αυτές τις συνθήκες είναι φανερό ότι ο αέρας συνεισφέρει στην

ψύξη πριν την εισαγωγή του στη διαδικασία της καύσης ή της αραιώσης.

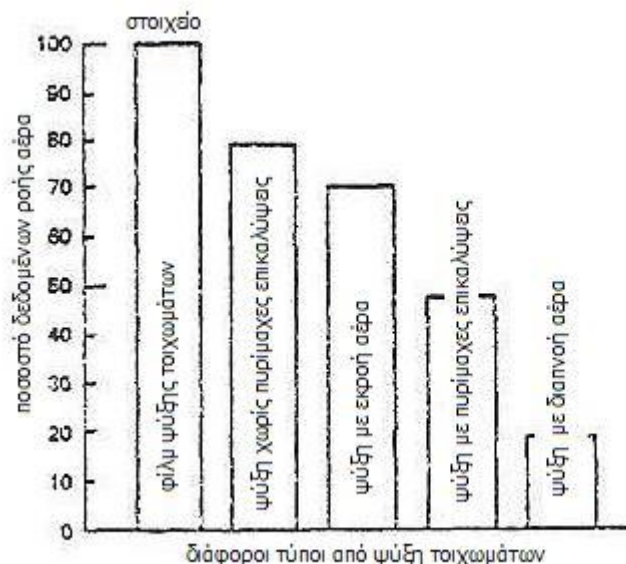
Η αποτελεσματικότητα της ψύξης με εκροή μπορεί να αυξηθεί σημαντικά σε συνδυασμό με τη χρήση των συμβατικών οπών ψύξης, στην είσοδο του φλογοσωλήνα. Τα σχετικά πλεονεκτήματα των μεθόδων ψύξης φαίνονται στο σχ. 7.4.

### **7.3.ε. ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΜΕ ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ (LOUVERED WALLS)**

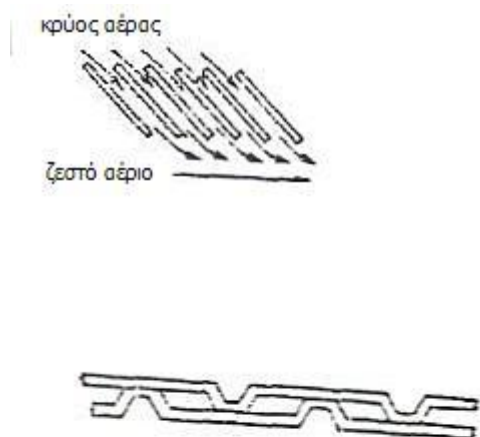
Μια ακόμη προσπάθεια για την επίτευξη μιας μορφής ψύξης με "αναπνοή" είναι τα τοιχώματα με σωληνώσεις, που φαίνονται στο σχ. 7.5. Τα τοιχώματα αυτά αποτελούνται από μεταλλικές πλάκες σχήματος "Π" ή μία τοποθετημένη δίπλα στην άλλη, που σχηματίζουν διάκενα. Τα διάκενα αυτά επιτρέπουν τη ροή στον κρύο αέρα και του απαγορεύουν να αναμειχθεί με τα καυσαέρια.

Το βασικό πλεονέκτημα της διατάξεως αυτής είναι ότι η επιφάνεια που διατίθεται για απαγωγή της θερμότητας είναι πολύ μικρότερη από την επιφάνεια που διαβρέχουν τα καυσαέρια. Ορισμένες μέθοδοι που αυξάνουν τους ρυθμούς απαγωγής της θερμότητας περιλαμβάνουν τη μείωση του πάχους του μετάλλου, τη μείωση του ύψους των διακένων και μείωση του μεγέθους των "Π" για να αυξηθεί το πλήθος των σχηματιζόμενων σωληνώσεων, στην περίμετρο του φλογοσωλήνα. Ωστόσο οι διατάξεις αυτές αυξάνουν τη δυσκολία και το κόστος της κατασκευής ενώ ταυτόχρονα έχουν μειωμένη μηχανική αντοχή και αξιοπιστία.

Άλλο ένα πρόβλημα που προκύπτει με τη χρήση της συγκεκριμένης διάταξης είναι η απαίτηση για ύπαρξη αυξημένης πτώσης πίεσης έτσι ώστε να ελέγχεται η κατανομή του ψυχρού αέρα σε όλες τις περιοχές του φλογοσωλήνα. Αν τα διάκενα μεταξύ των σωληνώσεων γίνουν πολύ μικρά μπορεί να δημιουργηθούν θερμά σημεία εξαιτίας αστοχιών στην κατασκευή. Από την άλλη αν τα διάκενα γίνουν πολύ μεγάλα, η πτώση πίεσης θα είναι τόσο μικρή ώστε θα υπάρξει πρόβλημα στην ψύξη. Γενικά τα πειράματα που έγιναν με τη χρήση της διατάξεως ήταν απογοητευτικά.



#### 7.4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΨΥΞΗΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ



#### 7.5. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΜΕ ΓΡΙΛΙΕΣ

#### **7.3.στ. ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΜΕ ΠΤΕΡΥΓΙΑ**

Οι έρευνες που έγιναν για την αύξηση του συντελεστή συναγωγής της θερμότητας από το θάλαμο καύσης στον αέρα ( $C_2$ ), έδειξαν ενδεικνυται η χρήση πτερυγίων, ή άλλων μορφών δευτερευόντων επιφανειών, οι οποίες τελικά αυξάνουν τη διαθέσιμη επιφάνεια για τη μετάδοση θερμότητας. Οι δευτερεύουσες επιφάνειες δεν είναι 100% αποτελεσματικές γιατί στα πτερύγια πρέπει να ισχύει κάποια διαφορά θερμοκρασίας, ώστε να επιτραπεί η μετάδοση θερμότητας. Η απόδοση των πτερυγίων ορίζεται ως :

$n_f = \text{ΜΕΣΗ } \Delta T \text{ (μετάλλου-αέρα) στην επιφάνεια των πτερυγίων} / \text{ΜΕΣΗ } \Delta T \text{ (μετάλλου-αέρα) στην επιφάνεια αναφοράς.}$

Η τιμή του  $n_f$  εξαρτάται μόνο από τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού των πτερυγίων και τις διαστάσεις τους.

Οι βοηθητικές αυτές επιφάνειες δεν έχουν αεροπορικές εφαρμογές εξαιτίας του αυξημένου βάρους αλλά και λόγω της μικρής θερμικής αγωγιμότητας των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των θαλάμων καύσης.

### **7.3.ζ. ΠΥΡΙΜΑΧΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ**

Μια πολύ καλή λύση για την επίλυση του προβλήματος της ψύξης των θαλάμων καύσης είναι η επικάλυψη των εσωτερικών τοιχωμάτων του φλογοσωλήνα με πυρίμαχα υλικά. Ένα υλικό με χαμηλό συντελεστή εκπομπής και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα θα μειώνει τη θερμοκρασία του θαλάμου με δύο τρόπους: α) με την ανάκλαση μεγάλου μέρους της προσπίπτουσας ακτινοβολίας των αερίων και β) παρέχοντας ένα στρώμα θερμικής μόνωσης μεταξύ των θερμών αερίων και των τοιχωμάτων.

Η πιο προφανής εφαρμογή των πυρίμαχων επικαλύψεων στους αεροκινητήρες είναι στο ακροφύσιο. Στην περιοχή αυτή η ακτινική μετάδοση θερμότητας είναι χαμηλή και οι συνθήκες στις οποίες εκτίθεται η επικάλυψη είναι κατά πολύ λιγότερο επίπονες από ότι πιο μπροστά. Άλλος ένας λόγος χρήσης της πυρίμαχης επικάλυψης στο ακροφύσιο είναι ότι η ψύξη με φιλμ αέρα είναι δύσκολη εξαιτίας της καμπύλης μορφής των τοιχωμάτων.

Όμως η χρήση τους δεν είναι πού διαδεδομένη αφενός γιατί δεν έχουν προσδιοριστεί με ακρίβεια οι ιδιότητες των επικαλύψεων και αφετέρου γιατί είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί η άριστη επαφή μεταξύ της επικάλυψης και του τοιχώματος. Εάν σε κάποιο σημείο η επικάλυψη αποχωριστεί από το τοίχωμα θα έχουμε τοπική υπερθέρμανση και κύρτωση του φλογοσωλήνα. Τα προβλήματα αυτά πρόκειται να βρουν σύντομα λύσεις με αποτέλεσμα την ευρύτατη χρήση των επικαλύψεων.

### **7.3.η. ΥΛΙΚΑ ΥΨΗΛΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ**

Παρά το γεγονός ότι γνωρίζουμε πολύ καλά τη συμπεριφορά των κραμάτων νικελίου, που χρησιμοποιούμε στην κατασκευή των θαλάμων καύσης και εξασφαλίζουν θαυμάσια μηχανική αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες έχει παρατηρηθεί σημαντική πρόοδος, όσον αφορά

τις δυνατότητες σε υψηλές θερμοκρασίες, στη μελέτη των πυρίμαχων μετάλλων αλλά και των μη οξειδωτικών κεραμικών. Τα πυρίμαχα μέταλλα, όπως το χρώμιο, το νιόβιο, το ταλάντιο και το μολυβδαίνιο εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερη αντοχή από τα κράματα του νικελίου, στους 1200 K. Όμως κάποια είναι δύσκολο να εξωρυχθούν ενώ όλα υποφέρουν από οξείδωση, ακόμα και με βραχεία έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες. Προτάθηκε η χρήση τους ως επικαλύψεις αλλά μέχρι σήμερα δεν είναι κατάλληλα για μακροχρόνια εφαρμογή.

Ακόμα όμως και να βρισκόταν η κατάλληλη επικάλυψη θα ήταν πολύ δύσκολη η τοποθέτηση της σε ένα πολύπλοκο σε σχήμα θάλαμο.

Μία εναλλακτική λύση είναι τα κεραμικά υλικά τα οποία είναι και ανθεκτικά στην οξείδωση και παρουσιάζουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι ενώσεις της σιλικόνης (Si) είναι πολλά υποσχόμενες και ανάμεσα τους τα καρβίδια και τα νιτρίδια του πυριτίου.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των νιτρίδιων του πυριτίου είναι ότι μπορεί να λάβει πολύ εύκολα περίπλοκα σχήματα με πολύ καλές αNOχές στις διαστάσεις. Αυτό συμβαίνει γιατί το υλικό δεν παρουσιάζει σχεδόν καθόλου συρρίκνωση κατά τις θερμικές κατεργασίες.

Το βασικό μειονέκτημα των νιτρίδιων του πυριτίου αλλά και των άλλων κεραμικών υλικών είναι ότι αν και ανθεκτικά δεν παρουσιάζουν την απαιτούμενη σκληρότητα και τραχύτητα των συνήθων μετάλλων. Σήμερα η χρήση των κεραμικών υλικών είναι σε πειραματική φάση αλλά υπάρχει έντονο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη και βελτίωση τους.

### **7.3.Θ. ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ**

Μια μέθοδος μέτρησης της θερμοκρασίας των τοιχωμάτων είναι η χρήση θερμοστοιχείων, τα οποία τοποθετούνται πάνω στα τοιχώματα του θαλάμου. Ειδικά τα θερμοζεύγη Cr-Al, που έχουν απόκλιση της τάξης των 10 K, χρησιμοποιούνται ευρύτατα. Είναι προφανές ότι ο αριθμός των θερμοζεύγων που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είναι περιορισμένος, αφού η τοποθέτηση πρέπει να γίνει χωρίς να επέλθει διατάραξη της ροής. Για αυτό το λόγο προτιμότερη είναι η χρήση των θερμικών βαφών, οι οποίες αλλάζουν χρώμα σε καθορισμένη θερμοκρασία. Παρέχουν γρήγορα και με ακρίβεια μια πλήρη εικόνα της θερμοκρασίας των τοιχωμάτων του θαλάμου καύσης χωρίς την απαίτηση συσκευών μετρήσεων, καταγραφικών μηχανημάτων και πολύπλοκων καλωδιώσεων.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>

## ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ

## **8.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Είναι σαφές και κοινά αποδεκτό ότι η μόλυνση από την καύση (γενικά) είναι απειλή για το περιβάλλον, Όσον αφορά τους αεροκινητήρες υπάρχουν δύο βασικοί τομείς που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον: (1) μόλυνση των αστικών περιοχών στην ευρύτερη ζώνη των αεροδρομίων και (2) μόλυνση της στρατόσφαιρας. Μετρήσεις έχουν δείξει ότι το μισό ποσοστό της μόλυνσης της στα αεροδρόμια έχει προκληθεί από τα αεροσκάφη. Το υπόλοιπο αποδίδεται στις επίγειες μεταφορές και μέσα. Ακριβώς λοιπόν επειδή ο έλεγχος της μόλυνσης από τα επίγεια οχήματα γίνεται ολοένα και πιο αποτελεσματικός, οι ανεξέλεγκτες εκπομπές από τους αεροπορικούς κινητήρες θα αποτελέσουν, στο μέλλον την κύρια πηγή μόλυνσης.

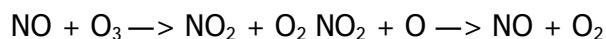
Ο καπνός είναι η πιο γνωστή μολυσματική ουσία, που εκλύει η καύση των καυσίμων, επειδή μπορεί να γίνει αισθητή με το γυμνό μάτι. Άλλες ουσίες με αντίστοιχα αποτελέσματα και επιπτώσεις είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), οι άκαυτοι υδρογονάνθρακες (UHC), τα οξείδια του αζώτου (NOx) και το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>). Τα επικίνδυνα και οδυνηρά αποτελέσματα των CO και NOx είναι γνωστά στα ζώα εδώ και καιρό. Οι εκπομπές του καπνού, οι οποίες εγκαθίστανται στην ατμόσφαιρα είναι ανεπιθύμητες διότι μπορεί να περιέχουν καρκινογόνες ουσίες. Οι UHC είναι η κύρια πηγή των οσμών που χαρακτηρίζουν την περιοχή των αεροδρομίων. Τα οξείδια του θείου, που είναι κυρίως τα SO<sub>2</sub> και SO<sub>3</sub>, σχηματίζονται όταν θειούχες ενώσεις, που περιέχονται στο καύσιμο, αντιδρούν με το οξυγόνο του αέρα της καύσης. Αυτά είναι τοξικά και διαβρωτικά και μπορούν να μετατραπούν σε θειικό οξύ, στην ατμόσφαιρα. Εφόσον τελικά όλο το θείο που περιέχει το καύσιμο οξειδώνεται σε οξείδια, η μόνη αποτελεσματική μέθοδος για τον έλεγχο αυτών των ρύπων είναι η κατεργασία του καυσίμου στο διυλιστήριο. Για αυτό το λόγο για τα SOx δεν θα συζητήσουμε περισσότερο.

Οι εκπομπές του κινητήρα που φαίνεται να εγκυμονούν κινδύνους για τη μόλυνση της στρατόσφαιρας είναι :

1. Υδρατμοί και CO<sub>2</sub> που μπορούν να προκαλέσουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα της γης.
2. Οι θειούχες ενώσεις που δέχονται ειδικούς μετασχηματισμούς που μπορούν να εκτρέψουν την ηλιακή ακτινοβολία μακριά από τη γη.
3. Τα NOx τα οποία καταστρέφουν τη ζώνη του όζοντος και διευκολύνουν τη διείσδυση της υπέρυθρης ηλιακής ακτινοβολίας.

Το πρώτο πρόβλημα πλέον δεν θεωρείται αρκετά σημαντικό. Όσον αφορά το δεύτερο ζήτημα μπορεί να αντιμετωπισθεί με αφαίρεση του θείου από το καύσιμο στο διυλιστήριο. Για αυτό και μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι εκπομπές των NOx και οι αντιδράσεις τους με το

όζον της ατμόσφαιρας. Ο μηχανισμός της αντίδρασης, είναι:

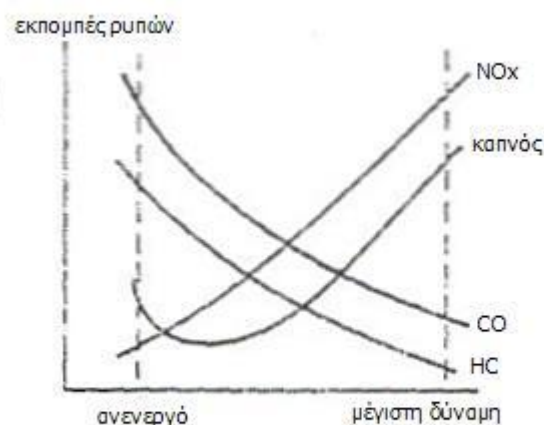


Η πρώτη αντίδραση δείχνει την καταστροφή του όζοντος ( $\text{O}_3$ ) και η δεύτερη πως το  $\text{NO}$  παράγεται προκειμένου να ξανά αντιδράσει.

Το πόσο ακριβώς οι παραπάνω αντιδράσεις ευθύνονται για την καταστροφή του όζοντος είναι άγνωστο. Είναι όμως στις κύριες σχεδιαστικές επιδιώξεις η μείωση των εκπομπών των  $\text{NO}_x$ .

## **8.2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΡΥΠΩΝ**

Τα επίπεδα συγκέντρωσης των πιο ρυπαρών εκπομπών στις εξαγωγές των αεροκινητήρων μπορούν να σχεδιασθούν άμεσα σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, το χρόνο και τη συγκέντρωση που είναι χαρακτηριστικά. Αυτά τα χαρακτηριστικά αλλάζουν από τον ένα θάλαμο καύσης στον άλλο και για ένα συγκεκριμένο θάλαμο αλλάζουν με τις αλλαγές στις συνθήκες λειτουργίας. Η φύση του σχηματισμού των ρύπων είναι τέτοια ώστε οι συγκεντρώσεις  $\text{CO}$  και  $\text{HC}$  να είναι υψηλότερες σε συνθήκες μικρής ισχύος και ελάχιστες έως ανύπαρκτες με την αύξηση της ισχύος.



### 8.1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΤΟΥΡΜΠΟΜΗΧΑΝΩΝ

Αντίθετα τα  $\text{NO}_x$  και ο καπνός είναι σχεδόν ανύπαρκτα στις λίγες και λαμβάνουν μέγιστες τιμές στις υψηλότερες. Τέτοιες χαρακτηριστικές τάσεις φαίνονται στο σχ. 8.1.



### **8.2.α. ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ**

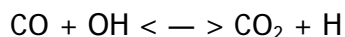
Εάν η πρωτογενής ζώνη του θαλάμου καύσης του αεροκινητήρα είναι σχεδιασμένη να λειτουργεί με περίσσεια καυσίμου, τότε θα σχηματισθούν μεγάλα ποσά CO εξαιτίας της έλλειψης αρκετού οξυγόνου, για να ολοκληρώσει την αντίδραση για σχηματισμό CO<sub>2</sub>. Εάν όμως το μείγμα στην πρωτογενή ζώνη είναι στοιχειομετρικό ή αρκετά φτωχό σε καύσιμο, τότε σημαντικά ποσά CO θα εμφανιστούν εξαιτίας της διάσπασης του CO<sub>2</sub>. Γενικά θα ήταν δυνατό να μειωθεί το CO σε αμελητέο ποσό, με τη σταδιακή υποδοχή επιπλέον αέρα μετά την πρωτογενή ζώνη, προκειμένου να επιτευχθεί βαθμιαία μείωση της θερμοκρασίας των καυσαερίων.

Πρακτικά οι εκπομπές του CO βρέθηκαν υψηλότερες από ότι είχε προβλεφθεί από τους υπολογισμούς και πολύ υψηλές σε συνθήκες μικρής ισχύος, όπου οι μέγιστες θερμοκρασίες είναι μικρές. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις προβλέψεις της θεωρίας της ισορροπίας και υποτίθεται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό του CO προκύπτει από την ατελή καύση του καυσίμου. Αυτό μπορεί να προκληθεί από ένα ή περισσότερα εκ των επομένων:

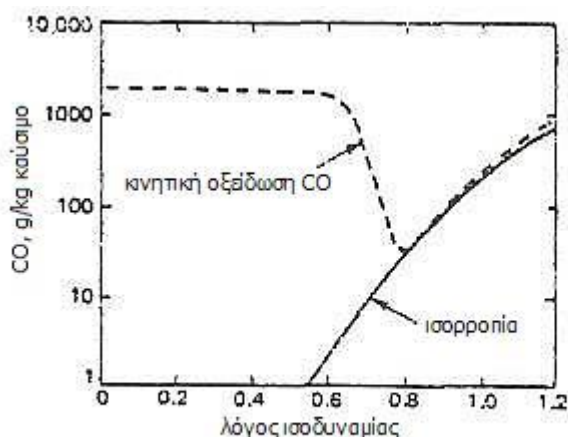
1. Ανεπαρκείς ρυθμούς καύσης στην πρωτογενή ζώνη, εξαιτίας του πολύ μικρού λόγου καυσίμου/ αέρα και/ ή του ανεπαρκούς χρόνου παραμονής εκεί.
2. Ανεπαρκής μείξη καυσίμου-αέρα, η οποία εμφανίζει περιοχές στις οποίες το μείγμα είναι πολύ φτωχό, για να διατηρήσει την καύση και άλλες όπου υπάρχει περίσσεια καυσίμου, με αποτέλεσμα μεγάλες συγκεντρώσεις CO.
3. Σβέση των μετά τη φλόγα προϊόντων εξαιτίας της εισόδου στο θάλαμο καύσης αέρα ψύξεως. (Οι δακτυλιοειδείς θάλαμοι εξαιτίας του μικρότερου λόγου επιφάνειας/ όγκο γενικά δίνουν λιγότερες εκπομπές CO από τους σωληνοειδείς).

Στο σχ. 8.2 φαίνεται ότι χαμηλά επίπεδα σχηματισμού CO μπορούν να επιτευχθούν μόνο σε ένα αρκετά στενό εύρος λόγων ισοδυναμίας, περίπου από 0.7 έως 0.9. Σε μικρότερες τιμές του λόγο ισοδυναμίας ( $\varphi$ ) τα επίπεδα του CO είναι υψηλά εξαιτίας του αργού ρυθμού οξειδωσης. Για μεγαλύτερους ισοδύναμους λόγους είναι υψηλότερα γιατί παίρνουν τιμές ισορροπίας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί το ισορροπημένο CO μπορεί να μειωθεί σε αποδεκτά επίπεδα με τη βαθμιαία εισαγωγή επιπλέον αέρα μετά την πρωτογενή ζώνη.

Το CO είναι σχετικά ανθεκτικό σε οξειδωση και σε απλές εφαρμογές ο ρυθμός της καθορίζεται σε σχέση με τον ελάχιστο χρόνο παραμονής και τη μέση θερμοκρασία που απαιτούνται για τέλεια καύση. Σε μεγάλες θερμοκρασίες η αντίδραση διάλυσης του CO είναι:



Για χαμηλότερες θερμοκρασίες ισχύει:  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$



## 8.2. ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΆΝΘΡΑΚΑ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

### 8.2.β. ΑΚΑΥΤΟΙ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ (UHC)

Οι UHC περιλαμβάνουν καύσιμα τα οποία μετατρέπονται στην έξοδο του θαλάμου καύσης στη μορφή σταγόνων ή ατμών, όσο και τα προϊόντα της θερμικής διάσπασης του αρχικού καυσίμου, που μετατρέπονται σε ενώσεις μικρότερου μοριακού βάρους, όπως το μεθάνιο και η ασετιλίνη. Οι UHC σχετίζονται συνήθως με τον κακό ψεκασμό, τους ανεπαρκείς ρυθμούς καύσης, τις επιδράσεις του αέρα ψύξης ή οποιονδήποτε συνδυασμό των παραπάνω. Αύξηση της ισχύος του κινητήρα μειώνει εν μέρει τις εκπομπές των UHC εξαιτίας της βελτίωσης του ψεκασμού αλλά κυρίως λόγω των επιδράσεων της υψηλότερης πίεσης και θερμοκρασίας του εισαγόμενου αέρα σε συνδυασμό με την αύξηση του ρυθμού πραγματοποίησης των αντιδράσεων στην πρωτογενή ζώνη. Η επίδραση της πίεσης στο σχηματισμό CO και UHC φαίνεται στο σχ. 8.3.

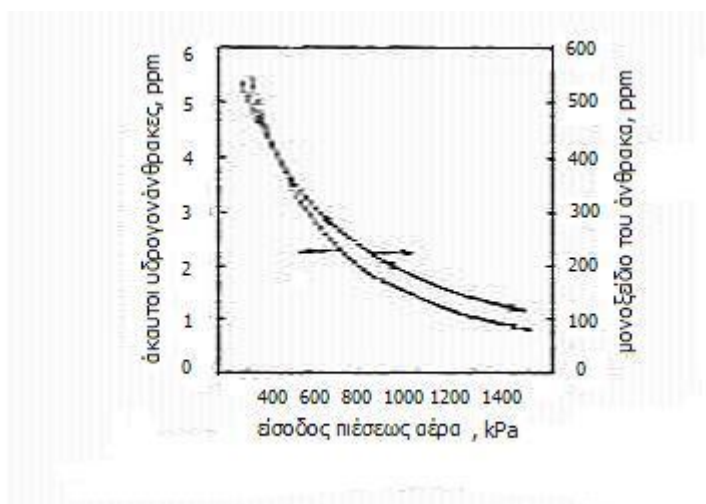
### 8.2.γ. ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ (NOx)

Τα NOx, εκ των οποίων το μεγαλύτερο μέρος στις εκπομπές των καυσαερίων κατέχει το NO, παράγονται από την οξείδωση του αζώτου της ατμόσφαιρας σε περιοχές υψηλής θερμοκρασίας κοντά στη φλόγα. Η διαδικασία είναι ενδόθερμη και πραγματοποιείται με αξιόλογους ρυθμούς μόνο σε θερμοκρασίες πάνω από τους 1200 K. Για αυτό σε αντίθεση με το CO και τους UHC, το NO εμφανίζεται μόνο στις θερμές περιοχές του θαλάμου καύσης και το

ποσό του αυξάνεται σε συνθήκες πλήρους ισχύος

Το NO μπορεί να σχηματισθεί με τρεις διαφορετικούς μηχανισμούς :

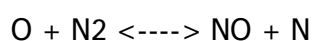
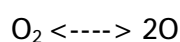
1. Το θερμικό NO παράγεται από την οξειδωση του ατμοσφαιρικού αζώτου στα καυσαέρια.
2. Το "ταχύ" NO παράγεται από ταχείες αντιδράσεις στο μέτωπο της φλόγας.
3. Το NO καυσίμου παράγεται από την οξειδωση του αζώτου που περιέχει το καύσιμο.



### 8.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΣΕ ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO ΚΑΙ UHC

#### **8.2.γ.1. ΘΕΡΜΙΚΟ NO**

Είναι διαπιστωμένο ότι ο σχηματισμός του NO ακολουθεί τον αλυσιδωτό μηχανισμό του Zeldovich που περιγράφεται ως εξής :



Τα πειράματα απέδειξαν την ξεκάθαρη σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και των εκπομπών NOx σε διάφορους κινητήρες. Άλλοι μελετητές εξέτασαν τις επιδράσεις της θερμοκρασίας και πίεσης καύσης στο σχηματισμό και εκπομπή NOx, χρησιμοποιώντας μείγματα προπανίου-αέρα. Τα αποτελέσματα συμπεριλαμβάνονται στη σχέση :

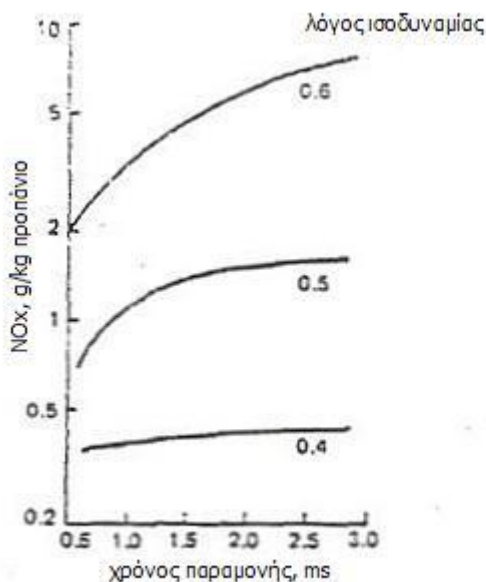
$$\ln(\text{NO}/t) = -72.28 + 2.80(T)^{0.5} - (T/38)$$

όπου T η αδιαβατική θερμοκρασία φλόγας (K)

t χρόνος παραμονής στο θάλαμο καύσης (msec)

Δεν παρατηρήθηκε καμία επίδραση της πίεσης για τιμές από 0.5 έως 3 MPa. Το γεγονός αυτό έρχεται σε συμφωνία με τις προσδοκίες μας αφού κατά την αντίδραση  $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}$  δεν συμβαίνει αλλαγή στον όγκο.

Οι συνέπειες του χρόνου παραμονής στο θάλαμο καύσης, στην εκπομπή NOx, είναι προφανείς στο σχ. 8.4. Τα αποτελέσματα αυτά εξήχθησαν σε πειράματα με θαλάμους προ-ανάμειξης, προ-εξαέρωσης, που χρησιμοποιούσαν για καύσιμο αέριο προπάνιο. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι οι εκπομπές NOx αυξάνουν με αύξηση του χρόνου παραμονής, εκτός από την περίπτωση που έχουμε πολύ φτωχά μείγματα ( $\phi=0.4$ ) στα οποία ο ρυθμός σχηματισμού είναι τόσο χαμηλός ώστε να θεωρείται πρακτικά ανεξάρτητος του χρόνου.



#### 8.4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ NOx ΣΕ ΠΡΟΑΝΑΜΕΙΓΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΕΡΑ-ΚΑΥΣΙΜΟΥ

##### **8.2.γ.2. "TAXY" NO**

Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες και ειδικά σε μείγματα με περίσσια καυσίμου, που βρίσκονται σε χαμηλές θερμοκρασίες, το NO βρίσκεται πολύ νωρίς στην περιοχή της φλόγας,

γεγονός που είναι αντίθετο με την επιδίωξη για σχετικά αργή διαδικασία καύσης. Οι μηχανισμοί που εμπλέκονται εξακολουθούν να μην έχουν κατανοηθεί πλήρως, αλλά έχει διαπιστωθεί ότι η αύξηση των ρυθμών πραγματοποίησης των αντιδράσεων είναι αποτέλεσμα των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των πολλών ενδιάμεσων ενώσεων, που παράγονται κατά τη διάρκεια των κυρίως αντιδράσεων των H/C, CO και CO<sub>2</sub>.

Τα επίπεδα σχηματισμού της καύσης του "ταχέως" NO δεν μπορούν να προβλεφθούν. Όμως στις συνθήκες που επικρατούν στους σύγχρονους θαλάμους καύσης οι τιμές τους κυμαίνονται από 0 έως 30 ppm V, με τις μικρές τιμές να εμφανίζονται σε συνθήκες φτωχών μειγμάτων-μεγάλων θερμοκρασιών και τις μεγαλύτερες σε συνθήκες πλούσιων μειγμάτων-μικρών θερμοκρασιών.

### **8.2.γ.3. NO ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

Αν το καύσιμο περιέχει άζωτο οργανικής προέλευσης, τότε κάποιο μέρος από αυτό θα μετασχηματισθεί στο αποκαλούμενο NO καυσίμου. Το ποσοστό του αζώτου που υφίσταται τη μεταβολή αυτή, εξαρτάται από τη φύση της διαδικασίας της καύσης. Τα ελαφρά απεσταγμένα καύσιμα περιέχουν ελάχιστο οργανικό άζωτο, λιγότερο από 0.67%. Τα βαρύτερα όμως απεσταγμένα καύσιμα περιέχουν γύρω στο 1.8% άζωτο. Συνεπώς σε συνάρτηση με το βαθμό του μετασχηματισμού του άζωτο, το NO καυσίμου μπορεί να αποτελεί σημαντικό ποσοστό του ολικού NO.

Ο μηχανισμός που οδηγεί στο σχηματισμό του NO καυσίμου μπορεί να περιγραφεί ως εξής :

1. Η μετατροπή του αζώτου του καυσίμου σε NO πρακτικά συντελείται για μείγματα φτωχά σε καύσιμο, με μικρές συγκεντρώσεις αζώτου καυσίμου ( μικρότερες από 0.5% κατά βάρος).
2. Η μετατροπή δυσχεραίνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης του αζώτου του καυσίμου, ειδικά σε συνθήκες λειτουργίας με περίσσεια καυσίμου.
3. Η μετατροπή γίνεται ευκολότερη με αύξηση της θερμοκρασίας της φλόγας.
4. Η σύνθεση των ενώσεων με βάση το άζωτο δεν έχουν καμία επίδραση στους ρυθμούς μετασχηματισμού.

### **8.2.γ.4. ΕΚΠΟΜΠΕΣ NO<sub>2</sub>**

Έως εδώ μιλήσαμε μόνο για το NO, την κυρίαρχη μορφή των NO<sub>x</sub>. Το NO όμως οξειδώνεται σε NO<sub>2</sub> αμέσως όταν δημιουργηθούν οι συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας που απαιτούνται, αφού τα καυσαέρια απομακρυνθούν από τον κινητήρα. Ο μετασχηματισμός του NO σε NO<sub>2</sub> στην πραγματικότητα, ξεκινά μέσα στο θάλαμο καύσης, σε περιοχές με μεγάλη

περίσσεια αέρα. Σε συνθήκες πλήρους ισχύος το ποσοστό του NO<sub>2</sub> που σχηματίζεται μέσα στο θάλαμο καύσης είναι ελάχιστο σε χαμηλές στροφές όμως το ποσοστό αυτό μπορεί να πλησιάσει το 50% των ολικών εκπομπών NO<sub>x</sub> (NO και NO<sub>2</sub>). Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με το γεγονός ότι το NO<sub>2</sub> είναι πιο ευσταθές από το NO, στις χαμηλές θερμοκρασίες. Προτάθηκε ένα κινητικό μοντέλο προκειμένου να εξηγήσει τα παραπάνω φαινόμενα και χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να προβλέψει ότι ο ρυθμός μετασχηματισμού του NO σε NO<sub>2</sub> θα έφτανε στο 25% σε 1 msec, στους 700 K. Ο ρυθμός μετασχηματισμού ακαριαία πέφτει κάτω από το 6% στους 900 K. Εξακολουθούν βέβαια να παραμένουν βέβαια κάποιες αμφιβολίες για το αν ο μετασχηματισμός λαμβάνει χώρα στο θάλαμο καύσης ή στο ψυχρό μέρος των τοιχωμάτων του.

### **8.2.δ. ΕΚΠΟΜΠΗ ΚΑΠΝΟΥ**

Η εκπομπή καπνού προκαλείται από την παραγωγή τελικά διαιρούμενων μορίων αιθάλης, στις πλούσιες σε καύσιμο περιοχές της φλόγας. Το φαινόμενο μπορεί να γενικευθεί και σε κάθε τμήμα της ζώνης καύσης, όπου η ανάμειξη δεν είναι πλήρης. Με τη χρήση των ψεκαστών πίεσης η περιοχή, στην οποία κυρίως εμφανίζεται ο σχηματισμός αιθάλης, είναι αυτή μέσα στο spray του καυσίμου, στο κέντρο του θαλάμου καύσης. Σε αυτή την περιοχή, η ανακυκλοφορία αναγκάζει τα καμένα προϊόντα να κινούνται προς το άκαυτο καύσιμο και εμφανίζεται συγκέντρωση ατμών καυσίμου σε διάφορες περιοχές, όπου τα αέρια εμφανίζουν έλλειψη οξυγόνου. Κάτω από τέτοιες συνθήκες η αιθάλη σχηματίζεται πολύ εύκολα και σε μεγάλες ποσότητες.

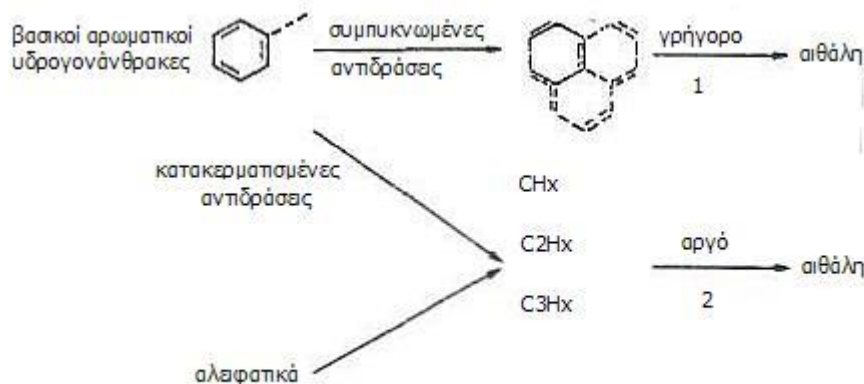
Μεγάλο ποσοστό της αιθάλης, που παράγεται στην πρωτογενή ζώνη, καταναλώνεται πιο κάτω σε περιοχές μεγάλων θερμοκρασιών. Για αυτό από τη σκοπιά της εκπομπής του καπνού, ο θάλαμος καύσης, χωρίζεται σε δύο κύριες ζώνες, χωριστές μεταξύ τους, την πρωτογενή η οποία καθορίζει το ποσό του σχηματισμού της αιθάλης και την ενδιάμεση ζώνη (στους σύγχρονους κινητήρες και τη ζώνη αραιώσης). Η συγκέντρωση της αιθάλης που παρατηρείται στα καυσαέρια είναι μέτρο της κυριαρχίας της μιας ζώνης πάνω στην άλλη.

Η χημική ανάλυση της αιθάλης, των καυσαερίων εξόδου, έδειξε ότι αποτελείται κυρίως από C (96%) και μείγμα H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> και άλλων στοιχείων. Έχει παρατηρηθεί στην πράξη ότι ο σχηματισμός αιθάλης εξαρτάται σε μεγαλύτερο βαθμό από την κανονική διεκπεραίωση του ψεκασμού του καυσίμου και της ανάμειξης του με τον αέρα και λιγότερο από την κινητική των αερίων.

Οι αρωματικοί H/C μπορούν να παράγουν αιθάλη με δύο τρόπους (σχ. 8.5) :

1. Με συμπύκνωση των αρωματικών αλυσίδων σε δομή γραφίτη και
2. Με διάσπαση σε μικρότερες H/C ενώσεις και πολυμερισμό τους, ώστε να σχηματιστούν μεγαλύτερα μόρια χωρίς H<sub>2</sub>, το οποίο και τελικά θα παράγει αιθάλη.

Μελέτες που έγιναν πάνω σε αυτά τα φαινόμενα έδειξαν ότι η μέθοδος της συμπύκνωση είναι πιο ταχεία από τη μέθοδο της διάσπασης και το ποσό της αιθάλης που παράγεται είναι πολύ μεγαλύτερο από ότι με τη διάσπαση.



### 8.5. ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΙΘΑΛΗΣ

Για τους θαλάμους καύσης των αεροκινητήρων, οι κύριοι παράγοντες που επιδρούν στο σχηματισμό αιθάλης και καπνού είναι οι ιδιότητες του καυσίμου, η πίεση και θερμοκρασία καύσης, ο λόγος καυσίμου/ αέρα, η ποιότητα ψεκασμού και ο τρόπος έγχυσης του καυσίμου.

#### **8.2.δ.1. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

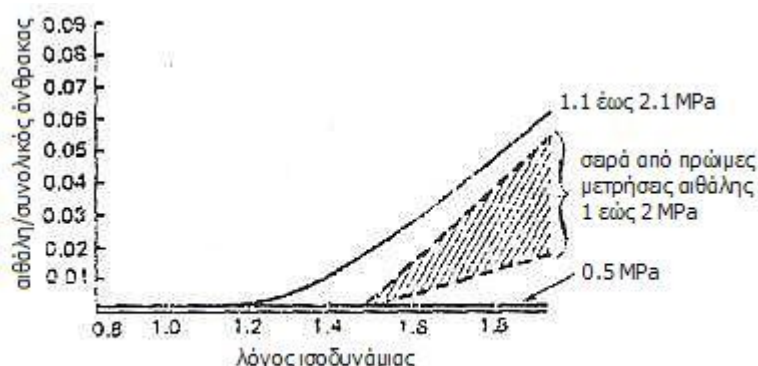
Οι ιδιότητες του καυσίμου μπορούν να επιδράσουν στην παραγωγή καπνού με δύο τρόπους. Πρώτα με τη διευκόλυνση του σχηματισμού αιθάλης στις περιοχές που είναι πλούσιες σε καύσιμο και δεύτερον με την άσκηση μεταβλητής αντίστασης στο σχηματισμό άνθρακα. Το πρώτο εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες όπως το ιξώδες, η πτητικότητα, οι οποίες επηρεάζουν το μέσο μέγεθος σταγόνας, τη διεισδυτικότητα και το ρυθμό εξαέρωσης του καυσίμου, ενώ το δεύτερο από τη μοριακή δομή του καυσίμου. Είναι πλέον διαπιστωμένο ότι η τάση εκπομπής καπνού αυξάνει με τη μείωση της συγκέντρωσης του  $H_2$ . Πειράματα όμως που έχουν γίνει, με πολυκυκλικά αρωματικά καύσιμα, έχουν αποδείξει ότι η εκπομπή καπνού είναι μεγαλύτερη από αυτή που περιμένουμε με τη θεώρηση της συγκέντρωσης του  $H_2$ .

#### **8.2.δ.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΙΕΣΗΣ**

Τα προβλήματα του καπνού και της αιθάλης είναι πιο έντονα σε μεγάλες πιέσεις. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για αυτό. Κάποιοι έχουν να κάνουν με τις χημικές επιδράσεις και κάποιοι άλλοι σχετίζονται με τους φυσικούς παράγοντες που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του spray και συνεπώς την κατανομή του μείγματος. Για προαναμειγμένο καύσιμο κηροζίνης-αέρα, βρέθηκε ότι δε σχηματίζεται αιθάλη σε πιέσεις- κάτω από 0.6 MPa, όπως φαίνεται στο σχ.

8.6. Επίσης διαπιστώθηκε ότι δεν εμφανίζεται σχηματισμός αιθάλης με λόγους ισοδυναμίας

γύρω στο 1.3.

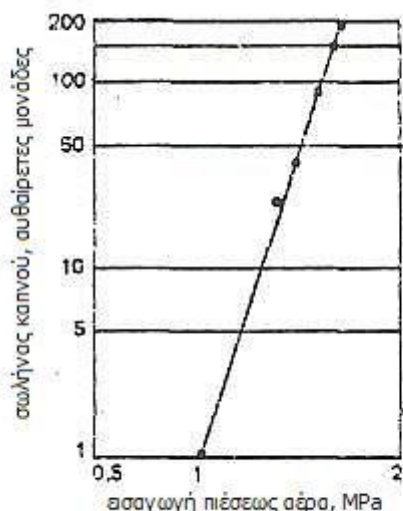


#### 8.6. ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΑΙΘΑΛΗΣ ΣΕ ΠΡΟΑΝΑΜΕΙΓΜΕΝΟ ΜΙΓΜΑ ΚΗΡΟΖΙΝΗΣ-ΑΕΡΑ

Ένα πρόβλημα που εμφανίζεται με την αύξηση της πίεσης είναι η επέκταση των ορίων της ευφλεκτότητας κατά συνέπεια σχηματίζεται αιθάλη σε περιοχές που, σε χαμηλότερες πιέσεις, θα ήταν πολύ πλούσιες σε καύσιμο. Ένα ακόμη πρόβλημα που προκύπτει από την αύξηση της πίεσης είναι η καθυστέρηση της εξαέρωσης των σταγόνων του καυσίμου, παρέχοντας περισσότερο χρόνο στο σχηματισμό αιθάλης στην υγρή φάση. Η αύξηση της πίεσης επιταχύνει ακόμα και τους ρυθμούς εκδήλωσης και ανάπτυξης των χημικών αντιδράσεων, με συνέπεια η καύση να αρχίζει νωρίτερα και ένα μεγάλο ποσοστό του καυσίμου να καίγεται σε περιοχές πλούσιες σε καύσιμο. Με ψεκαστές πίεσης διπλής ή διδυμής οπής, η μείωση της διείδυσης του spray είναι ένας από τους κύριους λόγους εμφάνισης καπνού στις μεγάλες πιέσεις. Για αυτό ενώ σε χαμηλές πιέσεις το καύσιμο κατανέμεται κατά μήκος όλης της ζώνης καύσης, σε μεγάλες πιέσεις τείνει να συγκεντρωθεί στην περιοχή σχηματισμού αιθάλης, δηλαδή λίγο πριν το ακροφύσιο. Ακόμα ένα αρνητικό φαινόμενο της αύξησης της πίεσης είναι η μείωση της γωνίας του κώνου του spray. Το γεγονός αυτό βοηθά στο σχηματισμό αιθάλης κυρίως με την αύξηση της δύναμης του μείγματος, στη ζώνη σχηματισμού αιθάλης και κατά δεύτερο λόγο με την αύξηση του μεγέθους της μέσης σταγόνας.

Το τελικό αποτέλεσμα όλων αυτών των επιδράσεων είναι ότι η εκπομπή καπνού αυξάνει βαθμιαία με την αύξηση της πίεσης (σχ. 8.7). Η χρήση ψεκαστών τύπου "air blast" μειώνουν τις επιδράσεις αυτές γιατί οι σταγόνες που παράγονται βρίσκονται συνεχώς στο ρεύμα του αέρα. Η κατανομή του καυσίμου στη ζώνη καύσης καθορίζεται από την αεροδυναμική του θαλάμου καύσης, η οποία δεν επηρεάζεται από τις μεταβολές πίεσης.





## 8.7. ΕΠΙΠΕΔΑ ΕΠΑΓΟΜΕΝΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΣΕ ΜΕΡΙΚΕΣ ΔΙΑΔΕΔΟΜΕΝΕΣ ΑΕΡΟΤΟΥΡΜΠΙΝΕΣ

### **8.2.δ.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ**

Η θερμοκρασία εισόδου του θαλάμου καύσης επηρεάζει πολλούς παράγοντες στη διαδικασία παραγωγής του άνθρακα αλλά το κύριο αποτέλεσμα, σε μια αύξηση της  $T_3$ , είναι συνήθως η αύξηση του ρυθμού σχηματισμού καπνού. Αυτό συμβαίνει κυρίως για λόγους ισοδυναμίας μεγαλύτερους από 1.6. Αύξηση στη θερμοκρασία εξόδου του θαλάμου μειώνει την εκπομπή του καπνού, αυξάνοντας το χώρο της περιοχής "κατανάλωσης" αιθάλης πριν τη ζώνη αραιώσης, όπου υπάρχει αρκετός αέρας για την καύση της αιθάλης, αν η θερμοκρασία είναι κατάλληλη.

### **8.2.5.4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

Αιθάλη σχηματίζεται μόνο στις περιοχές της φλόγας που είναι πλούσιες σε καύσιμο. Σύμφωνα με το σχ. 8.6 για να εξαλειφθεί ο σχηματισμός αιθάλης και καπνού, πρέπει να εξασφαλισθεί ότι πουθενά, στην περιοχή της φλόγας, ο λόγος ισοδυναμίας δεν ξεπερνά την τιμή 1.3. Όμως όταν ο ολικός λόγος ισοδυναμίας, στην πρωτογενή ζώνη, είναι πολύ κάτω από 1.3, ατέλειες στη μείξη του καυσίμου με τον αέρα μπορούν να δημιουργήσουν μικρές περιοχές όπου αναπτύσσονται πλούσια σε καύσιμο μείγματα, στα αέρια υψηλής θερμοκρασίας όπου υπάρχει έλλειψη οξυγόνου, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένους ρυθμούς σχηματισμού αιθάλης. Η καλύτερη επίδοση του air blast εξαρτάται αφενός από τον καλύτερο ψεκασμό και αφετέρου από την ανάμειξη του καυσίμου με τον αέρα κατά τη διαδικασία του ψεκασμού, γεγονός που εξαλείφει τις περιοχές μείγματος με περίσσια καυσίμου από τη ζώνη καύσης.

Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε ότι ο air blast ψεκαστής σε σχέση με αυτόν της διπλής οπής έχουν εντελώς διαφορετική συμπεριφορά όσον αφορά τη μεταβολή της εκπομπής καπνού με το λόγο αέρα/ καυσίμου. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του καλύτερου ψεκασμού αλλά και

επίδοσης του air blast που εξασφαλίζει ότι η καύση ολοκληρώνεται μέσα στην πρωτογενή ζώνη. Για αυτό κάθε αύξηση του ολικού λόγου αέρα/ καυσίμου, οδηγεί αυτόματα σε καλύτερο αερισμό της καύσης και συνεπώς σε μείωση του καπνού. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τους ψεκαστές πίεσης για τους οποίους μείωση της ροής του καυσίμου έχει σαν αποτέλεσμα κακή ποιότητα ψεκασμού και αύξηση της συγκέντρωσης του καυσίμου στην περιοχή σχηματισμού αιθάλης, πριν το ακροφύσιο.

#### **8.2.δ.5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΗΣ ΣΤΑΓΟΝΑΣ ΤΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

Σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το σχηματισμό αιθάλης είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ των σταγόνων του spray του καυσίμου και του αέρα της καύσης. Όσο το spray του καυσίμου πλησιάζει το μέτωπο της φλόγας, η θερμότητα που εκπέμπεται εξαερώνει τα σταγονίδια. Οι μικρότερες σταγόνες έχουν αρκετό χρόνο για να εξαερωθούν πλήρως, πριν το μέτωπο της φλόγας, και κατόπιν αναμειγνύονται με τον αέρα και καίγονται ως προαναμειγμένο μείγμα. Δυστυχώς όμως οι μεγαλύτερες σταγόνες δεν έχουν τον απαιτούμενο χρόνο για να εξαερωθούν πλήρως και έτσι καίγονται σαν σταγόνες, ενώ γύρω από καθεμία αναπτύσσεται μια φλόγα διάχυσης. Με προαναμειγμένο μείγμα δεν εμφανίζεται σχηματισμός αιθάλης μέχρι το ποσό του διατιθέμενου αέρα να μειωθεί γύρω στο 65% της στοιχειομετρικής τιμής. Όμως για τη φλόγα διάχυσης που κυκλώνει μια σταγόνα καυσίμου, ο σχηματισμός αιθάλης εξαρτάται από τον τύπο του καυσίμου και το μέγεθος της σταγόνας. Για αυτό και αύξηση στον ολικό λόγο αέρα/ καυσίμου έχει ελάχιστες ή σχεδόν ανύπαρκτες συνέπειες στο σχηματισμό της αιθάλης.

Κάτω από αυτές τις συνθήκες είναι βολική η σβέση της φλόγας είτε με την αύξηση της σχετικής ταχύτητας μεταξύ της σταγόνας και του περιβάλλοντα αέρα είτε με τη μετατροπή της σε φλόγα προαναμειγμένου μείγματος που καίει στις περιοχές όπου ήδη έχουν περάσει οι σταγόνες. Σβέση της φλόγας μπορεί να επέλθει όταν η σχετική ταχύτητα της σταγόνας και της ροής του αέρα ξεπεράσει μια ορισμένη κρίσιμη τιμή. Αυτή η τιμή εξαρτάται από το μέγεθος των σταγόνων και τη χημική σύνθεση των αερίων της καύσης. Η ταχύτητα σβέσης αυξάνει με την τετραγωνική ρίζα της διαμέτρου σταγόνας και μειώνεται σημαντικά με τη μείωση της συγκέντρωσης του οξυγόνου.

Πρακτικά, ακόμα και κάτω από τις χειρότερες συνθήκες, μόνο ένα μικρό μέρος από τον άνθρακα του καυσίμου μετατρέπεται σε αιθάλη και σχεδόν όλη οξειδώνεται σε περιοχές αμέσως μετά την πρωτογενή ζώνη καύσης. Ερευνητές ανέπτυξαν εμπειρικές μεθόδους υπολογισμού της μείωσης του μεγέθους ενός ατόμου άνθρακα, όταν αυτό διέρχεται από μείγμα γνωστής πίεσης, θερμοκρασίας και σύνθεσης. Για τυπικές συνθήκες αεροκινητήρων, οι μέθοδοι αυτές υποστηρίζουν ότι μόρια με μέγεθος κάτω από 0.04  $\mu\text{m}$  θα οξειδωθούν και ο μέγιστος ρυθμός οξειδωσης λαμβάνει χώρα με λόγο ισοδυναμίας 0.75. Σύμφωνα με τις ίδιες μελέτες μια καύση στην οποία σχηματίζεται αιθάλη, δεν εκπέμπει καπνό αν τα άτομα του άνθρακα είναι μικρότερα

από 0.01  $\mu\text{m}$ , άσχετα με το πλήθος τους.

### **8.3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ**

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τις εκπομπές των θαλάμων καύσης των αεροκινητήρων είναι:

1. Η θερμοκρασία της πρωτογενούς ζώνης και ο λόγος ισοδυναμίας της.
2. Ο βαθμός ομοιογένειας στη διαδικασία της καύσης στην πρωτογενή ζώνη.
3. Ο χρόνος παραμονής στην πρωτογενή ζώνη.
4. Τα χαρακτηριστικά της ψύξης των τοιχωμάτων του θαλάμου καύσης.
5. Ο ρόλος της ενδιάμεσης ζώνης. Αυτός ο ρόλος μπορεί να είναι θετικός αν οξειδώνονται το CO, οι UHC και η αιθάλη ή αρνητικός αν βοηθά στη ψύξη των καυσαερίων αυτών πριν ολοκληρωθεί η καύση.

Θα αναπτύξουμε παρακάτω πρακτικές μεθόδους μείωσης της εκπομπής των ρύπων, δίνοντας ιδιαίτερη βαρύτητα σε κάθε ρύπο χωριστά. Όμως είναι προφανές ότι για το σχεδιασμό θαλάμων καύσης είναι απαραίτητος ο συμβιβασμός των απαιτήσεων και των λύσεων.

#### **8.3.α. ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ (CO)**

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τις εκπομπές του CO είναι:

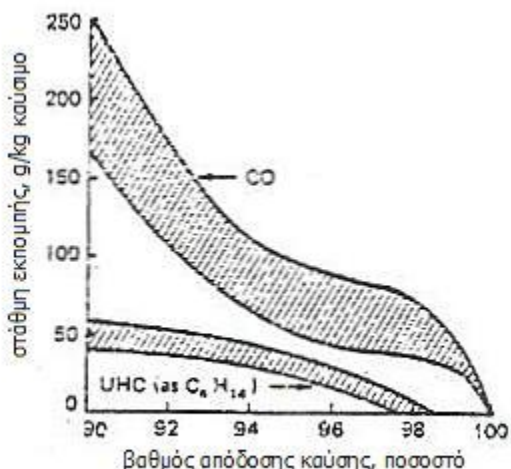
1. Το CO παράγεται σε μεγάλες ποσότητες σε όλους τους λόγους καυσίμου/ αέρα.
2. Σε μικρούς λόγους καυσίμου/ αέρα (π.χ.  $\phi < 0.5$ ) οι θερμοκρασίες είναι πολύ μικρές προκειμένου το CO να καεί και να μετατραπεί σε CO<sub>2</sub>.
3. Σε υψηλούς λόγους καυσίμου/ αέρα (π.χ.  $\phi > 0.9$ ) το CO καίγεται ταχύτατα και μεταβαίνει στην κατάσταση ισορροπίας, η οποία όμως ξεπερνά τις επιτρεπόμενες τιμές των ρύπων. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στον τρόπο με τον οποίο τα αέρια αυτά ψύχονται στη θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου.

Όλες οι μέθοδοι περιορισμού της εκπομπής το CO έχουν να κάνουν με τους παράγοντες που αναφέραμε. Ο μέθοδοι αυτές είναι:

1. Καλή ποιότητα ψεκασμού. Με αυτόν τον τρόπο προάγεται η εξαέρωση αλλά και το επίπεδο ανάμειξης έτσι ώστε να επέλθει η μέγιστη δυνατή ομοιογένεια. Δεν είναι τυχαίο το γεγονός ότι για τέτοια αποτελέσματα χρησιμοποιούνται συστήματα ψεκασμού air blast αλλά αν υπάρχει η δυνατότητα περίσσειας αέρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν εναλλακτική" λύση βοηθητικός αέρας, προκειμένου να βελτιωθεί ο ψεκασμός στις μικρές παροχές καυσίμου.
2. Ανακατανομή της ροής (ανακυκλοφορία) προκειμένου ο λόγος ισοδυναμίας στην πρωτογενή ζώνη να πάρει τη βέλτιστη τιμή 0.7.
3. Αύξηση του όγκου της πρωτογενούς ζώνης ή του χρόνου παραμονής σε αυτήν.

4. Μείωση του αέρα ψύξης. Αυτό γιατί ο αέρας που βγαίνει από την πρωτογενή ζώνη συνήθως έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε H/C και CO. Προτείνεται συνήθως η ψύξη με κεραμικά.
5. Απομάστευση συμπιεσμένου αέρα στις χαμηλές στροφές. Αυξάνεται έτσι ο λόγος καυσίμου/ αέρα και η θερμοκρασία στη ζώνη καύσης, με συνέπεια μείωση της εκπομπής του CO.
6. Με το κόψιμο της παροχής καυσίμου σε ορισμένα ακροφύσια και αύξηση της στα υπόλοιπα. Μειώνονται έτσι οι εκπομπές στις χαμηλές στροφές αφού βελτιώνεται η ποιότητα ψεκασμού και αυξάνεται τοπικά ο λόγος καυσίμου/ αέρα.

Όλες οι παραπάνω προσεγγίσεις στη μείωση της εκπομπής του CO στηρίζονται στη φιλοσοφία της βελτίωσης της απόδοσης καύσης. Μια τυπική έκφραση της απόδοσης της καύσης και των εκπομπών του CO και των UHC φαίνεται στο σχ. 8.8.



#### 8.8. ΤΥΠΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΕΚΠΟΜΠΗΣ CO & UHC

##### **8.3.β. ΑΚΑΥΤΟΙ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ (UHC)**

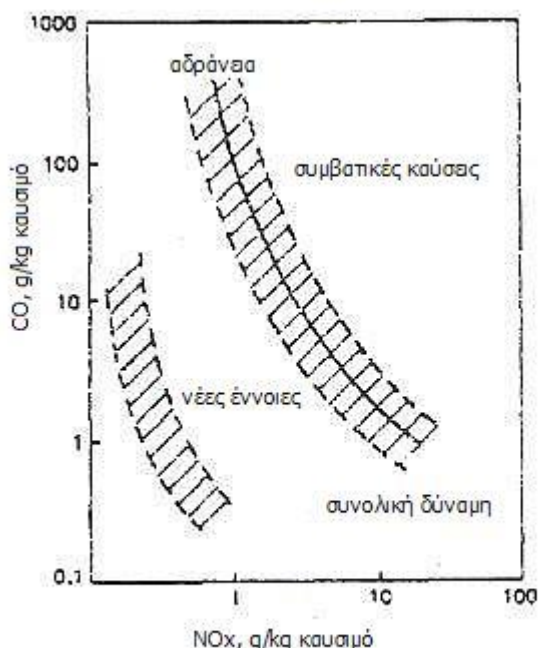
Οι παράγοντες που επηρεάζουν τις εκπομπές του CO σαφώς επιδρούν και στο σχηματισμό των UHC, σχεδόν με τον ίδιο τρόπο. Πα αυτό, όπως προκύπτει και από το σχ. 8.8, οι εκπομπές ακολουθούν την ίδια φιλοσοφία.

Είναι λοιπόν προφανές ότι η μείωση των εκπομπών θα επιτευχθεί με ανάλογες ενέργειες με αυτές των εκπομπών του CO, με λίγο περισσότερη έμφαση στη μείωση του αέρα ψύξης και στη βελτίωση του ψεκασμού. Σε αυτήν την κατεύθυνση οι air blast ψεκαστές και οι αεροβοηθούμενοι ψεκαστές κρίθηκαν αρκετά ικανοποιητικοί.

### **8.3.γ. ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ (NO<sub>x</sub>)**

Ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει το σχηματισμό των NO<sub>x</sub> είναι η θερμοκρασία. Εμπειρικά έχει βρεθεί ότι οι εκπομπές των NO<sub>x</sub> αυξάνουν εκθετικά με τη θερμοκρασία.

Πα πρακτικούς λόγους θα ασχοληθούμε με όλους τους παράγοντες καύσης μόνο όσο αυτοί επηρεάζουν τη θερμοκρασία της φλόγας. Συνεπώς για να μειωθούν οι εκπομπές των NO<sub>x</sub> ο πρωταρχικός στόχος είναι η μείωση της θερμοκρασίας αντίδρασης και δεύτερον η εξάλειψη θερμών σημείων στην περιοχή της καύσης. Τέλος ο διαθέσιμος χρόνος για το σχηματισμό των NO<sub>x</sub> θα πρέπει να παραμείνει ελάχιστος. Η μείωση της θερμοκρασίας της φλόγας αλλά και του χρόνου παραμονής στο θάλαμο καύσης μπορεί να επέλθει με αύξηση της ροής του αέρα μόνο που θα έχει σαν αποτέλεσμα αύξηση των εκπομπών του CO και των UHC όπως φαίνεται στο σχ. 8.9.



### **8.9. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΩΝ ΚΑΥΣΤΗΡΩΝ**

Οι πιο αποτελεσματικές προσεγγίσεις στο πρόβλημα της εκπομπής των NO<sub>x</sub> πραγματοποιήθηκαν ως μικρές τροποποιήσεις σε συμβατικούς θαλάμους καύσης π.χ. αλλαγές στη γεωμετρία και στην αεροδυναμική, καλύτερες μεθόδους ψεκασμού και χρήση νέων μεθόδων ψύξης των τοιχωμάτων. Τα πλεονεκτήματα των παραπάνω μεθόδων είναι ότι δεν απαιτούν ριζικές αλλαγές στη σχεδίαση των θαλάμων καύσης και ούτε η τεχνολογία που χρησιμοποιούν είναι εξεζητημένη. Από την άλλη το βασικό μειονέκτημα είναι ότι το τελικό προϊόν είναι αναπόφευκτα αποτέλεσμα συμβιβασμών όσον αφορά τις εκπομπές των ρύπων αλλά και τους υπόλοιπους παράγοντες της απόδοσης καύσης.

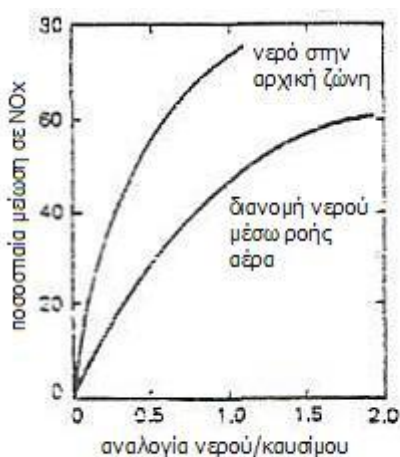
Οι πρακτικές προσπάθειες για μείωση των εκπομπών των ρύπων περιγράφονται παρακάτω :

1. Φτωχή, σε καύσιμο, πρωτογενής ζώνη. Η προσθήκη περισσότερου αέρα μειώνει τη θερμοκρασία της φλόγας γεγονός που προκαλεί σημαντική μείωση των εκπομπών των NOx.

Υπάρχει όμως ένα όριο σε αυτή τη μείωση γιατί περαιτέρω πτώση της θερμοκρασίας ευνοεί το σχηματισμό CO και UHC.

2. Πλούσια, σε καύσιμο, πρωτογενής ζώνη. Περίσσεια καυσίμου αλλά και αέρα έχει σαν αποτέλεσμα μειωμένη θερμοκρασία φλόγας άρα λιγότερες εκπομπές NOx. Οι προσπάθειες που έγιναν δε στέφθηκαν από επιτυχία, αφού είναι απαραίτητο τα πλούσια σε καύσιμο προϊόντα να περάσουν πρώτα από στοιχειομετρικές συνθήκες προκειμένου να εισαχθούν στο στρόβιλο.
3. Πιο ομοιογενής καύση. Η καλύτερη ανάμειξη πριν την καύση, ο καλύτερος ψεκάσμος και η μεγαλύτερη πτώση πίεσης θα στένευαν τα όρια των θερμοκρασιών καύσης. Σε συνδυασμό όμως με φτωχή πρωτογενή ζώνη, ο σχηματισμός των NOx μειώνεται αισθητά.
4. Μειωμένος χρόνος παραμονής. Οι εκπομπές των NOx μπορούν να μειωθούν με την ελαχιστοποίηση του χρόνου που τα αέρια παραμένουν στις υψηλές θερμοκρασίες.
5. Έγχυση νερού. Αφού ο σχηματισμός των NOx εξαρτάται από τη θερμοκρασία η διάλυση του μείγματος με μία μη καύσιμη ύλη θα μείωνε την εκπομπή των NOx. Όπως προκύπτει από το σχ. 8.10 έγχυση νερού απευθείας στην πρωτογενή ζώνη είναι προτιμότερη από την έγχυση στη ροή του αέρα.

6.



#### 8.10. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ NOx

Το γεγονός εάν ή όχι η μείωση του σχηματισμού των NOx συνοδεύεται από αύξηση των CO και UHC, εξαρτάται από τους ρυθμούς εκδήλωσης των χημικών αντιδράσεων, στο θάλαμο

καύσης. Εάν ο ρυθμός είναι τέτοιος ώστε να εξασφαλίζει 100% πλήρη καύση, οι ποσότητες των CO και UHC είναι ελάχιστες. Εάν όμως ο ρυθμός αυτός δεν είναι αρκετός, οι ποσότητες αυτές αυξάνουν σημαντικά.

Το βασικό μειονέκτημα της έγχυσης νερού είναι η άντληση, η αποθήκευση και η διακίνηση των απαιτούμενων ποσοτήτων, πράγμα που κάνει απαγορευτική τη χρήση της μεθόδου στους αεροπορικούς κινητήρες.

6. Ανακυκλοφορία καυσαερίων. Για να είναι αποτελεσματική η μέθοδος θα πρέπει τα καυσαέρια να έχουν ψυχθεί πριν επιστρέψουν στην πρωτογενή ζώνη. Η μέθοδος εμφανίζει δραστική μείωση των NOx αλλά κάποιες φορές αύξηση σχηματισμού του CO. Άλλο ένα μειονέκτημα είναι η αύξηση του βάρους, μεγέθους και της πολυπλοκότητας της συσκευής καύσης.

### **8.3.δ. ΚΑΠΝΟΣ**

Ο σχηματισμός αιθάλης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη διαδικασία ψεκασμού του καυσίμου και την ανάμειξη του με τον αέρα ενώ επηρεάζεται λιγότερο από την κινητική κατάσταση των αερίων. Πρακτικά απουσία αιθάλης επιτυγχάνεται με την έλλειψη περιοχών πλουσίων σε καύσιμο στη ζώνη καύσης. Αυτό πραγματοποιείται με την έγχυση περίσσειας αέρα, στη ζώνη καύσης. Ο αέρας αυτός μειώνει τη θερμοκρασία, βοηθά στην καλύτερη ανάμειξη και αυξάνει τη συγκέντρωση του οξυγόνου, γεγονότα που μειώνουν δραστικά το σχηματισμό αιθάλης και καπνού. Δυστυχώς όμως αυτές οι ενέργειες έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση των εκπομπών των CO και UHC. Χρήση air blast ψεκαστών μειώνει τις εκπομπές καπνού και εξαιτίας του καλύτερου ψεκασμού και εξαιτίας του καλύτερου αερισμού του καυσίμου.

Άλλες μέθοδοι μείωσης του καπνού είναι η έγχυση νερού και η χρήση πρόσθετων στο καύσιμο. Γίνεται χρήση πολλών οργανομεταλλικών ενώσεων του βαρίου και του μαγνησίου προς αυτή την κατεύθυνση όμως το κύριο μειονέκτημα εκτός από το υψηλό κόστος είναι και η τάση δημιουργίας επικαθήσεων στις λεπίδες του στροβίλου. Επίσης πρόβλημα αποτελεί και η τοξικότητα των προσθέτων αυτών.

### **8.4. ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΧΑΜΗΛΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ**

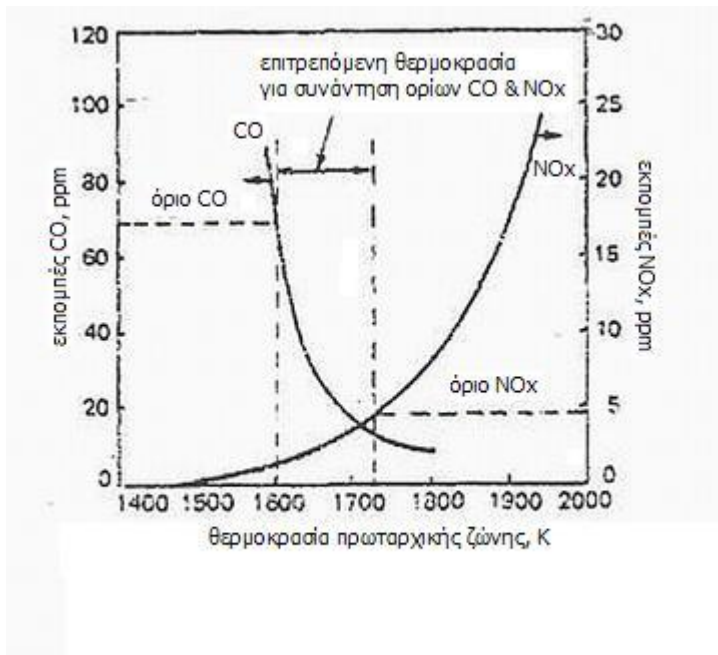
Παρά το γεγονός ότι όλες οι λύσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι ικανοποιητικές και χρήσιμες, υποφέρουν από ένα πολύ μεγάλο μειονέκτημα. Το τελικό αποτέλεσμα είναι αποτέλεσμα συμβιβασμού ανάμεσα στις απαιτήσεις για τις εκπομπές των ρύπων και στους άλλους παράγοντες της καύσης. Αυτό γίνεται φανερό με τη μελέτη του σχ. 8.11, όπου αναγράφονται οι εκπομπές το CO και των NOx σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία στην πρωτογενή ζώνη.

Η βασική αρχή που διέπει όλες τις σχεδιαστικές προσεγγίσεις είναι η διατήρηση

σταθερής τιμής της θερμοκρασίας της ζώνης καύσης, για όλες τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα.

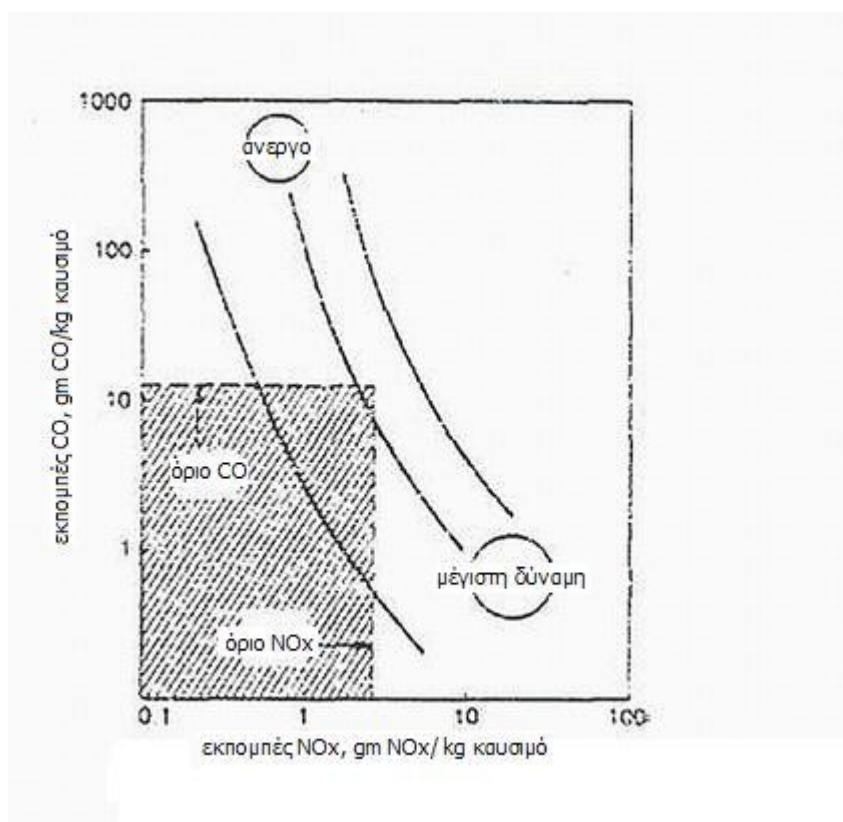
#### **8.4.α. ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ**

Η ιδέα της χρήσης μεταβλητής γεωμετρίας δεν είναι νέα. Αμέσως μετά τον εντοπισμό του προβλήματος των εκπομπών προτάθηκαν διάφορες σχεδιάσεις που εισήγαν τη χρήση μεταβλητής γεωμετρίας στον θάλαμο καύσης, συνήθως για να Βελτιώσουν την απόδοση της επανεκκίνησης στους αεροπορικούς κινητήρες. Οι διατάξεις όμως αυτές δε Βγαίνουν στην παραγωγή γιατί οι κατασκευαστές, αν και εκτιμούσαν τα πλεονεκτήματα που είχαν, δίσταζαν με την εισαγωγή τόσο περιπλοκών διατάξεων στον κινητήρα. Όμως στις μέρες μας τα πολλαπλά οφέλη τόνωσαν το ενδιαφέρον για τη χρήση και εφαρμογή της μεταβλητής γεωμετρίας.



8.11. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΠΡΩΤΑΡΧΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΣΕ ΕΚΠΟΜΠΕΣ NOx & CO





8.12. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΥΣΤΗΡΩΝ

Μια μορφή μεταβλητού συστήματος είναι αυτό στο οποίο μεγάλες ποσότητες αέρα εισάγονται από το μπροστά άκρο του θαλάμου καύσης, στις μέγιστες στροφές, ελαχιστοποιώντας το σχηματισμό αιθάλης και NOx και παρέχοντας αρκετό αέρα για ψύξη. Όταν οι στροφές λιγοστεύουν, ένα μεγάλο ποσοστό του αέρα αυτού οδηγείται στη ζώνη αραιώσης για να διατηρήσει τη θερμοκρασία της πρωτογενούς ζώνης στα επίπεδα των χαμηλών ρύπων, μειώνοντας την παροχή του καυσίμου.

Ο βαθμός της μηχανικής πολυπλοκότητας του κάθε συστήματος μεταβλητής γεωμετρίας διαφέρει για κάθε θάλαμο καύσης. Σε αυτό το σημείο θα αναφερθούμε στο σχ. 8.12, το οποίο δείχνει τις χαρακτηριστικές εκπομπών τριών υποθετικών A, B και C. Η καμπύλη που αντιστοιχεί στο A βρίσκεται εντελώς έξω από τα αποδεκτά όρια των εκπομπών, πράγμα που σημαίνει ότι η μεταβλητή γεωμετρία δεν είναι από μόνη της αρκετή για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις μας. Ένα μικρό μέρος της καμπύλης B βρίσκεται μέσα στα όρια πράγμα που σημαίνει ότι με ένα πολύ καλό σύστημα μεταβλητών γεωμετριών μπορεί ο θάλαμος καύσης να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις για ελάχιστες εκπομπές. Όσο για την καμπύλη C βρίσκεται μέσα στα όρια γεγονός που σημαίνει ότι μια συσκευή δύο ή τριών θέσεων θα ήταν αρκετή.

Ιδανική θα ήταν η χρήση της μεταβλητής γεωμετρίας με συστήματα προ-εξαέρωσης,

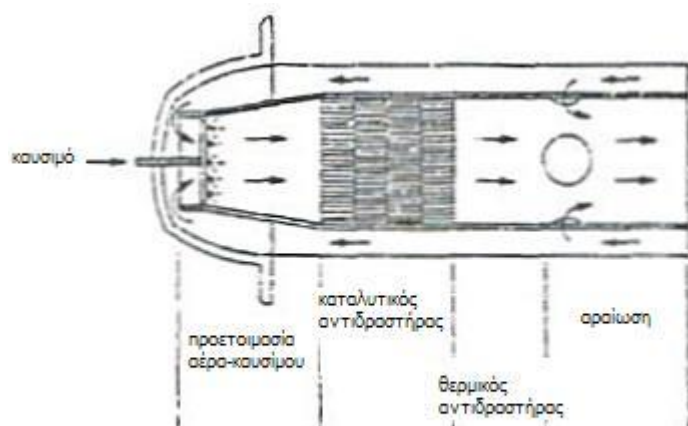
προ-ανάμειξης. Μόνο έτσι θα μπορούσαμε να καταπολεμήσουμε τα θερμά σημεία που διευκολύνουν το σχηματισμό των NOx και τα ψυχρά σημεία που αυξάνουν την εκπομπή του CO.

#### **8.4.β. ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗ ΚΑΥΣΗ**

Οι καταλύτες επιτρέπουν έτσι ώστε η οξειδωση του καυσίμου να πραγματοποιηθεί πολύ κάτω από τα κάτω όρια αναφλεξιμότητας. Για αυτό το λόγο και η χρήση των καταλυτών ως αντικαταστάτες μέρους των ζωνών των θερμικών αντιδράσεων, επιτρέπει ώστε η καύση να γίνεται σε θερμοκρασία και 1000 K κάτω από τις θερμοκρασίες των συμβατών θαλάμων καύσης. Αφού οι εκπομπές των NOx μεταβάλλονται εκθετικά με τη θερμοκρασία, η καύση σε χαμηλότερες θερμοκρασίες αναμένεται ότι θα τις μειώσει θεαματικά.

Ένα σχηματικό διάγραμμα μιας συσκευής καταλυτικής καύσης φαίνεται στο σχ. 8.13. Το καύσιμο εγχύεται πριν την είσοδο του στον καταλύτη προκειμένου να εξαερωθεί και να αναμειχθεί με τον εισαγόμενο. Το μείγμα οδηγείται προς τον καταλύτη. Ο καταλύτης περιλαμβάνει διάφορα στάδια, καθένα σχεδιασμένο ειδικά με διαφορετικό τύπο καταλύτη. Είναι επιθυμητή η χρήση ενός καταλύτη ο οποίος είναι ενεργός σε χαμηλές θερμοκρασίες. Μετά την περιοχή του καταλύτη ακολουθεί η θερμή ζώνη αντιδράσεων που επιτρέπει στις αντιδράσεις που έχουν ήδη ξεκινήσει, να συνεχίσουν. Οι αντιδράσεις αυτές μπορούν να συνεισφέρουν στην επίτευξη του 20% της ολικής θερμοκρασίας που επιτυγχάνεται στο θάλαμο καύσης.

Ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζει η καύση του καταλύτη είναι η τάση για αυτανάφλεξη του καυσίμου πριν την είσοδο του στην περιοχή του καταλύτη. Παρά το γεγονός ότι οι λόγοι καυσίμου/ αέρα είναι πολύ κάτω από τα φτωχά όρια ευφλεκτότητας και συνεπώς δε θα έπρεπε να μας απασχολεί η αυτανάφλεξη ωστόσο τοπικά, γύρω από τον ψεκαστή, υπάρχουν μείγματα πλούσια σε καύσιμο, πριν την επίτευξη τις πλήρους ανάμειξης. Πα αυτό και είναι σημαντικό η ανάμειξη να επιτυγχάνεται σε χρόνο λιγότερο από το χρόνο καθυστέρησης της ανάφλεξης.



8.13. ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ

Η πρακτική εφαρμογή της συσκευής καταλυτικής καύσης σε κάποιο κινητήρα, απαιτεί την ύπαρξη μιας μεθόδου θέρμανσης του καταλύτη προκειμένου να βρεθεί στη θερμοκρασία λειτουργίας του, στις κρύες συνθήκες περιβάλλοντος. Προτάσεις που έγιναν σε αυτό το θέμα περιελάμβαναν τη χρήση αναφλεκτήρων-εκκένωσης ή ηλεκτρικών σωμάτων, που θα αυξάνουν τη θερμοκρασία του ίδιου του καταλύτη ή χρήση H<sub>2</sub> ως καυσίμου για την εκκίνηση.

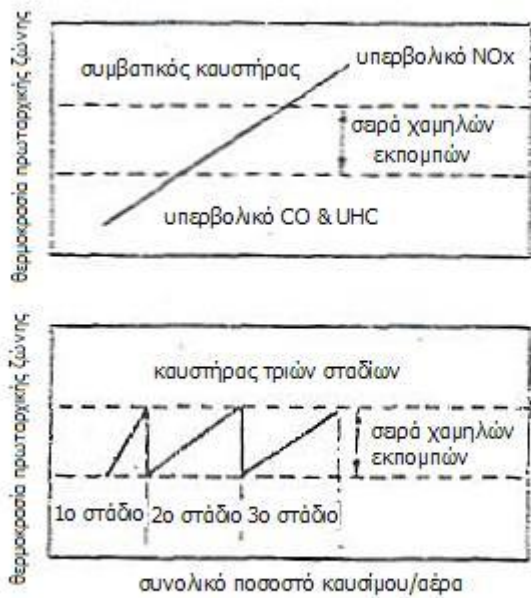
#### **8.4.γ. ΦΤΩΧΗ ΠΡΟΑΝΑΜΕΙΓΜΕΝΗ - ΠΡΟΞΑΕΡΩΜΕΝΗ ΚΑΥΣΗ**

Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι η επίτευξη πλήρους εξαέρωσης του καυσίμου και πλήρους ανάμειξης του με τον αέρα αλλά και λειτουργία της πρωτογενούς ζώνης σε ένα φτωχό λόγο καυσίμου/ αέρα πράγμα που θα μειώσει τις εκπομπές των NO<sub>x</sub>.

Για να είναι πλήρως αποτελεσματική η μέθοδος LPP θα πρέπει να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τη μεταβλητή γεωμετρία. Ωστόσο είναι συχνές οι φορές που το σύστημα λειτουργεί πολύ κοντά στα φτωχά όρια σβέσης. Η επίλυση του προβλήματος απαιτεί κάποια μορφή βοηθητικής συσκευής που θα διευκολύνει την ανάφλεξη και θα διατηρεί την καύση έστω και κάτω από δύσκολες συνθήκες. Ένα ακόμα μειονέκτημα της LPP μεθόδου είναι ότι ο χρόνος, που χρειάζεται το καύσιμο για να εξαερωθεί πριν εισαχθεί στη ζώνη καύσης είναι αρκετός και πιθανόν να σημειωθεί και αυτανάφλεξη ή επιστροφή φλόγας στις υψηλές θερμοκρασίες εισόδου, συνήθως στις περιπτώσεις απογείωσης.

#### **8.4.δ. ΚΑΥΣΗ ΣΕ ΣΤΑΔΙΑ**

Πρόκειται για μια τεχνική στην οποία η καύση γίνεται σε ξεχωριστά στάδια. Τα πειράματα που έγιναν έδειξαν ότι για την επίτευξη της καύσης σε στάδια δεν είναι αρκετή η βαθμιαία έγχυση του καυσίμου γιατί θα προκληθεί αύξηση του σχηματισμού των NO<sub>x</sub>, αλλά απαιτείται η βαθμιαία έγχυση και του αέρα. Με τη χρήση της μεθόδου αυτής δίνεται ιδιαίτερη σημασία στη βέλτιστη κατανομή του καυσίμου, ενώ στη μεταβλητή γεωμετρία ο στόχος είναι η βέλτιστη κατανομή του αέρα. Ο κοινός στόχος και των δύο μεθόδων πάντως είναι η επίτευξη των ελάχιστων εκπομπών ρύπων, σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας καύσης, στη μέθοδο της καύσης σε στάδια, φαίνεται στο σχ. 8.14.



#### 8.14. ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΑΔΙΩΝ ΚΑΥΣΤΗΡΑ ΓΙΑ ΧΑΜΗΛΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ

## ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Οι προκλήσεις στο σχεδιασμό νέων θαλάμων καύσης κινητήρων υψηλής απόδοσης, δεν άλλαξαν σημαντικά τα τελευταία χρόνια, όμως η προσέγγιση του θέματος πλέον μετατοπίστηκε προς μια μοντέρνα αναλυτική μέθοδο. Στις μέρες μας γίνεται πιο τεχνική συζήτηση πάνω σε θέματα καθεστώτος καύσης και αναγκών που υπάρχουν και εμποδίζουν τη στοιχειομετρική καύση. Η αύξηση της θερμοκρασίας καύσης, η ψύξη, η ανάμειξη, η ευστάθεια, η καλή ποιότητα ψεκασμού και οι εκπομπές των ρύπων εξακολουθούν να φέρνουν αντιμέτωπους αεροδυναμικούς και μηχανικούς σχεδιαστές και να θέτουν πληθώρα μηχανικών διλημμάτων. Επιπρόσθετα καινούρια υλικά όπως τα κεραμικά και τα διμεταλλικά ενσωματώνονται σε κάθε καινούρια κατασκευή. Η διαδικασία της καύσης πήρε διαφορετική σημασία με την ανακάλυψη και εφαρμογή καινούριων μέσων σχεδίασης και υπολογισμού της, με αποτέλεσμα να αλλάξει και η προσέγγιση της. Όλοι αυτοί οι παράγοντες πρέπει να μελετηθούν, να κατανοηθούν και να εκτιμηθούν πλήρως προκειμένου να αναπτυχθούν προηγμένα και ικανά συστήματα καύσης. Γεγονός πάντως αδιαμφισβήτητο είναι ότι, ανεξάρτητα με την όποια τεχνολογική πρόοδο πρόκειται να επιτευχθεί, η σχεδίαση των θαλάμων καύσης και όχι μόνο, είναι και θα είναι αποτέλεσμα συμβιβασμών ανάμεσα στους διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν την καύση.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Arthur H. Lefebvre "Gas Turbine Combustion", McGraw – Hill, 1983
2. Stephen D. Clouser & Richard A. Kamin "Combustion Technology Needs For Advanced High Pressure Cycle Engines" Naval Air Warfare Center Aircraft Division, 1993
3. Dr. B. W. Lowrie "Combustion For Future Supersonic Transport Propulsion", 1993
4. R. W. Stickles & W. J. Dodds "Fuel Injector Design For High Temperature Aircraft Engine", 1993
5. G. E. Andrews, A. M. Al Dabagh, A. A. Asere & A. Nagari "Impingement/ Effusion Cooling", 1993
6. A. K. Jasuja "Spray Performance of a Vaporizing Fuel Injector", Cranfield Institute of Technology, 1993