

**ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΥΣΗΣ
ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | | |
|----------|---|------------|
| 9 | ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ | 9.2 |
| 9.1 | ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΥΣΗΣ | 9.2 |
| 9.1.1 | Απαιτήσεις απόδοσης λειτουργίας θαλάμου καύσης αεριοστροβίλου | 9.2 |
| 9.1.2 | Βασικά χαρακτηριστικά εξέλιξης και σχεδιασμού των θαλάμων καύσης (Θ/Κ) | 9.2 |
| 9.1.3 | Κατηγορίες θαλάμων καύσης και τα σχετικά τους πλεονεκτήματα | 9.3 |
| 9.2 | ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΥΣΗΣ | 9.5 |
| 9.2.1 | Διαχύτης | 9.5 |
| 9.2.2 | Γεωμετρίες διαχύτη | 9.5 |
| 9.2.3 | Περιοχές λειτουργίας διαχυτών | 9.6 |
| 9.2.4 | Παράμετροι λειτουργίας διαχυτών | 9.6 |
| 9.2.5 | Υπολογισμός χαρακτηριστικών λειτουργίας διαχυτών | 9.7 |
| 9.3 | ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΑΕΡΟΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ – ΕΚΤΟΣ ΤΟΥ ΔΙΑΧΥΤΗ – ΗΤΟΙ : ΤΟΥ ΦΛΟΓΟΣΩΛΗΝΑ ΚΑΙ ΤΟΥ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ | 9.7 |
| 9.3.1 | Υπολογισμός των διαμέτρων | 9.7 |
| 9.3.2 | Η ροή στα δακτυλιοειδή διάκενα και διαμέσου των οπών του φλογοσωλήνα | 9.9 |
| 9.3.3 | Η αεροδυναμική του στροβιλιστή (swirler) | 9.10 |
| 9.4 | Η ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΖΩΝΗ ΚΑΙ Η ΖΩΝΗ ΑΡΑΙΩΣΗΣ (INTERMEDIATE ΚΑΙ DILUTION ZONES) | 9.12 |
| 9.5 | ΟΡΙΑ ΕΥΣΤΑΘΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΝΑΥΣΗΣ ΚΑΥΣΤΗΡΑ | 9.13 |

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Εισαγωγή

(Smith (1968), AFAPL-TR-78-52, Cohen et al (1972), The Jet Engine (Rolls-Royce plc 1987), Lefebvre (1983), VKI (1989), Boyce (2002)).

Εάν αναφερθούμε στο τυπικό P-V διάγραμμα για ένα κύκλο turbo-jet, βλέπουμε ότι μεταξύ της συμπίεσης και της εκτόνωσης υπάρχει ένα στάδιο όπου το εργαζόμενο ρευστό (αέρα) εκτονώνεται υπό $P \approx ct$ (διεργασία 2-3 στο σχήμα 9.1). Αυτή η εκτόνωση επιτυγχάνεται στην πράξη διά της θέρμανσης του αέρα μέσω έγχυσης και καύσης ενός καυσίμου. Μεγάλος βάθος εκτόνωσης (μεγάλη απόσταση μεταξύ 2 και 3) σημαίνει μεγάλο χρήσιμο έργο. Επειδή όμως το αέριο εκτονώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας του, ένα πρακτικό όριο στο βαθμό εκτόνωσης που μπορεί να επιτευχθεί τίθεται από τη μέγιστη θερμική αντοχή των υλικών της μηχανής και ιδιαίτερα του στροβίλου.

9.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΥΣΗΣ

9.1.1 Απαιτήσεις απόδοσης λειτουργίας θαλάμου καύσης αεριοστροβίλου

- (i) Υψηλή απόδοση καύσης, για την πλήρη καύση και απόδοση της θερμογόνου ενέργειας του καυσίμου.
- (ii) Ευστάθεια καύσης σε μεγάλο εύρος λόγων αέρα/καυσίμου.
- (iii) Διευκόλυνση έναυσης επί του εδάφους και εν πτήσει.
- (iv) Χαμηλή απώλεια ολικής πίεσης - η διακεκομμένη γραμμή στο διάγραμμα P-V του σχήματος 9.1 συνιστά ελάττωση του ωφέλιμου έργου.
- (v) Χαμηλή εκπομπή ρύπων.
- (vi) Αποδεκτή θερμοκρασιακή κατανομή στην έξοδο του θαλάμου καύσης ώστε να μεγιστοποιείται η διάρκεια ζωής των πτερυγίων του στροβίλου.

9.1.2 Βασικά χαρακτηριστικά εξέλιξης και σχεδιασμού θαλάμων καύσης

Στο σχήμα 9.2 απεικονίζεται η βασική διάταξη θαλάμου καύσης : Καύσιμο ψεκάζεται στο κέντρο ενός αγωγού. Η ταχύτητα του αέρα, υπό την οποία γίνεται η καύση είναι ίση με την ταχύτητα εκροής από τον συμπιεστή - της τάξης των 150-200 m/s. Το κύριο μειονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι υπάρχει μια πολύ μεγάλη θεμελιώδης πτώση πίεσης (απώλεια εν θερμώ) που εμφανίζεται όταν θερμότητα προστίθεται σε ένα αέριο υψηλής ταχύτητας. Αυτό η θεμελιώδης απώλεια εκτιμάται και εκφράζεται ως εξής:

Κατά μήκος του θαλάμου καύσης (2-3), υποθέτοντας μια επιφάνεια αναφοράς A_{ref} , έχουμε:

$$\text{εξίσωση της ορμής: } A_{ref} (p_3 - p_2) + m_2 (U_3 - U_2) = 0 \Leftrightarrow (p_3 - p_2) = -\frac{m_2}{A_{ref}} (U_3 - U_2)$$

$$\text{πιέσεις λίμνασης (ασυμπιέστη ροή): } p_{03} - p_{02} = (p_3 - p_2) + \frac{1}{2} (\rho_3 U_3^2 - \rho_2 U_2^2)$$

$$\text{εξίσωση συνέχειας: } m = \rho_2 A_{ref} U_2 = \rho_3 A_{ref} U_3$$

Συνδυάζοντας λαμβάνουμε:

$$p_{03} - p_{02} = -(\rho_3 U_3^2 - \rho_2 U_2^2) + \frac{1}{2} (\rho_3 U_3^2 - \rho_2 U_2^2) = -\frac{1}{2} (\rho_3 U_3^2 - \rho_2 U_2^2) \Leftrightarrow$$

$$\frac{p_{03} - p_{02}}{\frac{\rho_2 U_2^2}{2}} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_3} - 1 \right) = \underbrace{\left[\mu \varepsilon \rho \propto \frac{1}{T} \right]}_{\text{ασυμπιέστο}} = \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right) \approx 1 - 2$$

$$\text{και } \Delta P_{\text{fundamental}} = \frac{1}{2} \rho_2 U_2^2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right) \approx 25\% \text{ της πίεσης εισόδου} \quad [1]$$

Για $U = 150 \text{ m/s}$ και τυπικές τιμές των T_3 , T_2 και ρ , το ΔP είναι λοιπόν περίπου το 25% της πίεσης εισόδου.

Στο σχήμα 9.2b ένας διαχύτης (diffuser) χρησιμοποιείται για να ελαττώσει τη U σε κάποια τιμή που μας δίνει ένα ανεκτό ΔP_{fund} . Ελάττωση της ταχύτητας κατά 20% σημαίνει ότι το ΔP_{fund} ελαττώνεται κατά 4%. Αλλά ακόμη και με την προσθήκη του διαχύτη η ταχύτητα στην περιοχή καύσης εξακολουθεί να είναι πολύ υψηλή για ευσταθή καύση διότι είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από τη θεμελιώδη ταχύτητα φλόγας των περισσότερων καυσίμων. Έτσι, στο σχήμα 9.2c, ένας σταθεροποιητής έχει προστεθεί πίσω από τον ψεκαστή και λόγω της δημιουργούμενης ροϊκής ανακυκλοφορίας η φλόγα «αγκιστρώνεται».

Παρ' όλα αυτά όμως το σύστημα του σχήματος 9.2c εξακολουθεί να μην είναι αποδεκτό για πρακτικές εφαρμογές θαλάμων καύσης αεριοστροβίλων. Για να προσδοθεί η επιθυμητή θερμοκρασιακή αύξηση στην αεριοροή διαμέσου του θαλάμου, ο θάλαμος πρέπει να εργάζεται με λόγο αέρα/καυσίμου (Air Fuel Ratio- AFR) περίπου 60, ενώ γνωρίζουμε από τη χήμεια ότι μίγματα αέρα-υδρογονάνθρακα καίγονται μόνο όταν το AFR είναι μεταξύ 8-30. Είναι αναγκαίο, λοιπόν, να εισάγουμε μέρος μόνο του αέρα στην πρωτεύουσα ζώνη καύσης (primary zone) κοντά στο ψεκαστήρα έτσι ώστε το τοπικό AFR να είναι βέλτιστο και κοντά στο στοιχειομετρικό AFR (≈ 15 για τα περισσότερα καύσιμα αεριοστροβίλων). Έτσι στο σχήμα 9.2d παρατίθεται ένας φλογοσωλήνας (flame tube) προσαρμοσμένος στο

σταθεροποιητή με σπές εισαγωγής πρωτεύοντα και δευτερεύοντα αέρα (primary and dilution holes-jets). Το κύριο μέρος του αέρα εισάγεται στη ζώνη αραίωσης (dilution zone) και χρησιμοποιείται για την ελάττωση της θερμοκρασίας των θερμών καυσαερίων σε θερμοκρασίες αποδεκτές για τα πτερύγια του στροβίλου. Στη ζώνη αραίωσης δε γίνεται καύση κάτω από κανονικές συνθήκες αλλά μόνο τυρβώδης ανάμιξη μεταξύ θερμών καυσαερίων και αέρα αραίωσης (dilution air). Στην πράξη και σε σύγχρονα συστήματα θαλάμων καύσης (σχήμα 9.3α) εισάγεται και μια ενδιάμεση (intermediate) ζώνη. Ένα μικρό κλάσμα του αέρα αραίωσης εισάγεται εδώ ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας και χρησιμεύει για την αποπεράτωση της καύσης που ξεκίνησε στην πρωτεύουσα ζώνη. Έτσι ελαττώνεται η θερμοκρασία των καυσαερίων για να επιτραπεί στα προϊόντα που παρήχθησαν κατά τις δευτερεύουσες χημικές διάσπασεις (dissociation) όπως: NO_x, SO_x, CO να επανασυντεθούν και να απελευθερωθεί η περίσσεια ενέργειας. Το σχήμα 9.3γ δείχνει ροϊκά πεδία αέρα-καυσαερίων σε σύγχρονους σωληνοειδείς θαλάμους καύσης.

9.1.3 Κατηγορίες θαλάμων καύσης και τα σχετικά πλεονεκτήματά τους (Smith (1968), AFAPL-TR-78-52, The Jet Engine (Rolls-Royce plc 1987), Lefebvre (1983), VKI (1989)).

Γενικά οι θάλαμοι καύσης διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες :

- α) Σε αυτούς που είναι σχετικά απομακρυσμένοι από τον συμπιεστή και το στρόβιλο και αποτελούν ξεχωριστή μονάδα (κυρίως για βιομηχανικές χρήσεις και κάπως παλαιών σχεδιαστικών τάσεων),
- β) Σε αυτούς που μαζί με το στρόβιλο και το συμπιεστή αποτελούν ενιαία κατασκευή και οι οποίοι συναντώνται σχεδόν σε όλες τις σύγχρονες κατασκευές και οπωσδήποτε στις εφαρμογές πρόωσης.

Οι ενιαίου τύπου κατασκευές χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- (i) Σε αυτές που αποτελούνται από πολλαπλούς ξεχωριστούς θαλάμους σωληνοειδούς μορφής και ονομάζονται σωληνοειδείς (tubular) όπως φαίνεται στο σχήμα 9.4α.

Προτερήματα αυτού του τύπου:

- (1) Ευκολία στην ανάπτυξη και το σχεδιασμό.
- (2) Το ψεκαζόμενο καύσιμο «ταιριάζει» στον ατομικό στροβιλιστή (swirler) και στα πρωτεύοντα jets.
- (3) Έχει μικρή διάμετρο (ο καθένας) και η απαιτούμενη δομική αντοχή επιτυγχάνεται εύκολα - μικρο βάρος.

- (4) Ευκολότερη συντήρηση - η εξάρμοση του ενός θαλάμου δεν προϋποθέτει αποσύνδεση των υπολοίπων.

Μειονεκτήματα :

- (1) Πολύπλοκες και βαριές σωληνώσεις χρειάζονται για να διοχετευθεί ο αέρας από το συμπιεστή στο θάλαμο και από εκεί στο στρόβιλο με ομοιόμορφο εγκάρσιο προφίλ ταχυτήτων και θερμοκρασίας και χαμηλές απώλειες πίεσης.
- (2) Συγκρινόμενο με θάλαμο της δεύτερης κατηγορίας, για την ίδια παροχή αέρα, το σωληνοειδές σύστημα είναι βαρύτερο και οδηγεί σε μηχανή με μεγαλύτερη διάμετρο εξωτερικού κελύφους.

(ii) **Θάλαμος μορφής περιφερειακού δακτυλίου (annular) όπως φαίνεται στο σχήμα 9.4γ.**

Προτερήματα :

- (1) «Καθαρή» αεροδυναμική κατασκευή και συνεπώς μικρότερη πτώση πίεσης. Οι σωληνώσεις από το συμπιεστή προς το στρόβιλο είναι απλές.
- (2) Προσφέρει ελάχιστο μήκος, βάρος και διάμετρο.
- (3) Προβλήματα ανομοιόμορφης περιφερειακής έναυσης αποφεύγονται.

Μειονεκτήματα:

- (1) Δυσκολία ερευνητικής ανάπτυξης λόγω απαίτησης υψηλών παροχών αέρα
- (2) Προβλήματα μηχανικής αντοχής λόγω λυγισμού σε υψηλές θερμοκρασίες (μέγιστο μήκος ≈ 1 m).
- (3) Δύσκολο να «ταιριάζουν» τα χαρακτηριστικά του ψεκαζόμενου καυσίμου (spray) με τα προτεύοντα jets.
- (4) Δύσκολο να επιτευχθεί σταθερά ομοιόμορφη θερμοκρασία εξόδου.

(iii) **Θάλαμος καύσης συνδυασμού των ανωτέρω σωληνο-δακτυλιοειδής (tubo-annular) όπως φαίνεται στο σχήμα 9.4β.**

Προτερήματα :

- (1) Εύκολη ανάπτυξη και πειραματικός έλεγχος.
- (2) Καλή συμπεριφορά στο ροϊκό συνδυασμο ψεκασμου και jets.

Μειονεκτήματα :

- (1) Κακή αεροδυναμική συμπεριφορά.
- (2) Προβληματική ομοιόμορφη περιφερειακή έναυση.

9.2 ΣΧΕΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΥΣΗΣ

(Smith (1968), AFAPL-TR-78-52, The Jet Engine (Rolls-Royce plc 1987), Lefebvre (1983), VKI (1989)).

9.2.1 Διαχύτης

Ο διαχύτης περιλαμβάνει κυρίως τα τμήματα 2-3' (σχήμα 9.3) όπου η ταχύτητα του παρεχόμενου από το συμπιεστή αέρα επιβραδύνεται κατά 5 περίπου φορές. Επιπλέον επιβράδυνση, και συνεπώς περαιτέρω ανάκτηση στατικής πίεσης, επιτυγχάνεται στα δακτυλιοειδή διάκενα (annuli) που περιβάλλουν το φλογοσωλήνα (σχήμα 9.3). Έτσι επιτυγχάνεται ευκολότερη και σταθερότερη παροχή πρωτεύοντα και δευτερεύοντα αέρα, μέσω των διαφόρων οπών του φλογοσωλήνα. Η παράμετρος που κατά κύριο λόγο ρυθμίζει τη διάχυση (επιβράδυνση) μέσα στο διαχύτη είναι η γωνία του διαχύτη. Όσο μεγαλύτερη είναι τόσο μεγαλύτερη επιβράδυνση επιτυγχάνεται-όμως δε μπορεί να υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή, πέραν της οποίας έχουμε αποκόλληση του ρευστού από τα τοιχώματα του διαχύτη και τότε η ανάκτηση πίεσης ελαττώνεται απότομα, λόγω απώλειας ενέργειας στις περιοχές ανακυκλοφορίας του ρευστού. Όπως φαίνεται στο σχήμα 9.5 έχει ευρεθεί πειραματικά ότι η βέλτιστη συνολική γωνία διαχύτη είναι $\approx 8^\circ$. Συνήθως όμως για κάθε ιδιαίτερη εφαρμογή και για αυτή τη γωνία, η ανάκτηση πίεσης και η περιοχή λειτουργίας του διαχύτη υπολογίζονται από τεχνικά διαγράμματα.

9.2.2 Γεωμετρίες διαχύτη

Σύνηθες μέγεθος περιγραφής των διαφόρων ειδών διαχύτη (σχήμα 9.6α) που χρησιμοποιούνται, είναι ο λόγος διατομής $A_{\text{εξόδου}}/A_{\text{εισόδου}} = AR$. Η έκφραση του AR (area ratio) για τους διαχύτες του σχήματος 9.6β είναι :

(α)

$$AR = 1 + 2 \frac{L}{W_1} \sin \theta \quad (\text{διδιαστατος})$$

(β)

$$AR = 1 + 2 \frac{L}{R_1} \sin \theta + \left(\frac{L}{R_1} \sin \theta \right)^2 \quad (\text{κωνικός})$$

(γ)

$$AR = 1 + 2 \frac{L}{\Delta R_i} \frac{\sin \theta_i + (R_i / R_0) \sin \theta_0}{1 + R_i / R_0} + \frac{(L^2 / \Delta R_i^2)(1 - R_i / R_0)(\sin^2 \theta_i - \sin^2 \theta_0)}{1 + R_i / R_0}$$

(δακτυλιοειδής)

όπου $\Delta R_i =$ ύψος δακτυλιοειδούς διακένου διακένου (annulus height) = $R_0 - R_i$

9.2.3 Περιοχές λειτουργίας διαχυτών

Διακρίνονται διάφορες περιοχές λειτουργίας διαχυτών.

- (i) Περιοχή χωρίς απώλεια στήριξης (no stall).
- (ii) Περιοχή ασταθούς ανακυκλοφορίας - με παλλόμενη ανακυκλοφορία ροής.
- (iii) Ανακυκλοφορία σε μερική ανάπτυξη στη μια πλευρά του διαχύτη.
- (iv) Ανακυκλοφορία σε πλήρη ανάπτυξη.

Οι τέσσερις περιοχές παρουσιάζονται στο σχήμα 9.7. Η εμφάνιση τους σαν συνάρτηση της θ και του χαρακτηριστικού μήκους (N/W_1) για διδιάστατους διαχύτες δίδεται στο σχήμα 9.8. Περιοχές λειτουργίας κατά την έναρξη της ανακυκλοφορίας δίδονται στο σχήμα 9.9 για διαχύτες που συναντώνται στην πράξη.

9.2.4 Παράμετροι λειτουργίας διαχυτών

Οι κυριώτεροι παράμετροι που περιγράφουν τη λειτουργία του διαχύτη είναι :

- Ο συντελεστής ανάκτησης πίεσης (pressure recovery coefficient)

$$c_p = \frac{P_2 - P_1}{1/2 \rho_1 u_1^2}, \quad P \text{ στατική πίεση, } 1\text{-είσοδος, } 2\text{-έξοδος και για ιδανικό (χωρίς}$$

απώλειες τριβών) σύστημα είναι $c_{p_{ideal}} = 1 - \frac{1}{AR^2}$

- Η συνολική αποτελεσματικότητα (overall effectiveness)

$$\eta = \frac{c_p}{1 - 1/AR^2}$$

- Ο συντελεστής απωλειών (loss coefficient)

$$\lambda = 1 - \eta = 1 - \frac{c_p}{1 - 1/AR^2} \quad \text{με } \lambda \approx 0.3 \text{ για καμπυλόγραμμους (faired) διαχύτες}$$

και $\lambda \approx 0.45$ για βηματικής εκτόνωσης (dump) διαχύτες (σχήμα 9.6α)

9.2.5 Υπολογισμός χαρακτηριστικών λειτουργίας διαχυτών

Ο υπολογισμός της συμπεριφοράς δεδομένου διαχύτη γίνεται είτε με επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes με ταυτόχρονη χρήση τυρβώδων μοντέλων, ή εμπειρικά, μέσω διαγραμμάτων (performance charts), διά επαναληπτικής δοκιμής και σχεδιασμού (trial and error). Συνδυασμός των δύο ανωτέρω μεθόδων οπωσδήποτε επιταχύνει τα αποτελέσματα. Ορισμένα διαγράμματα λειτουργίας για διάφορες γεωμετρίες διαχύτη δίδονται στα σχήματα 9.10 έως 9.14.

9.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΑΕΡΟΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ - ΕΚΤΟΣ ΤΟΥ ΔΙΑΧΥΤΗ - ΗΤΟΙ: ΤΟΥ ΦΛΟΓΟΣΩΛΗΝΑ ΚΑΙ ΤΟΥ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ

9.3.1 Υπολογισμός των διαμέτρων

Η ολική διάμετρος του θαλάμου καύσης (του δακτύλιου) είναι υψίστης σημασίας διότι όλες οι άλλες διαστάσεις κλιμακοποιούνται βάσει αυτής. Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις για τον αρχικό υπολογισμό (Smith (1968), AFAPL-TR-78-52, Cohen et al (1972), The Jet Engine (Rolls-Royce plc 1987), Lefebvre (1983), VKI (1989)):

1) Προσέγγιση με βάση την απώλεια πίεσης

Πρώτα ορίζουμε τις ποσότητες u_{ref} , q_{ref} (δυναμική πίεση) και M_{ref} όπου ref αναφέρεται στη μέγιστη διάμετρο του κελύφους του θαλάμου καύσης (σχήμα 9.3) σα να μην υπάρχει ο φλογοσωλήνας. Είναι δε :

$$u_{ref} = \frac{m_2}{\rho_2 A_{ref}}, q_{ref} = \frac{\rho_2 u_{ref}^2}{2}, M_{ref} = \frac{u_{ref}}{(\gamma RT_2)^{0.5}} \quad [2]$$

Η εμπειρία έχει δείξει ότι οι απώλειες πίεσης μπορεί να εκφραστούν κατάλληλα μέσω μιας παραμέτρου που λέγεται παράγων απωλειών πίεσης, ΠΑΠ (pressure

loss factor PLF) και ορίζεται ως:

$$\text{ΠΑΠ/PLF} = \frac{\Delta p_{023}}{q_{\text{ref}}} = \frac{\Delta p_{023}}{\frac{1}{2\rho_2} \left(\frac{m_2}{A_{\text{ref}}} \right)^2} = K_1 + K_2 \underbrace{\left(\frac{T_{03}}{T_{02}} - 1 \right)}_{\Delta P_{\text{Fundamental}}} \quad [3]$$

$$\frac{\Delta p_{023}}{p_{02}} = \frac{\overbrace{\left(\frac{\Delta p_{023}}{m_2^2} \right)}^{\text{ΠΑΠ/PLF}}}{\frac{2\rho_2 A_{\text{ref}}^2}{p_{02}}} = \text{PLF} \cdot \frac{m_2^2}{2\rho_2 A_{\text{ref}}^2} \approx \text{PLF} \cdot \frac{2 \frac{p_{02}}{RT_{02}} A_{\text{ref}}^2}{p_{02}} = \text{PLF} \cdot \frac{R}{2} \cdot \left(\frac{m_2 \sqrt{RT_{02}}}{A_{\text{ref}} p_{02}} \right)^2 \quad [4]$$

όπου R=σταθερά του αερίου.

Το $\frac{\Delta p_{023}}{p_{02}}$ λέγεται συνολική απώλεια πίεσης-ΣΑΠ (overall pressure loss) και είναι

το κλάσμα απωλειών πίεσης το οποίο συζητήθηκε στο κεφάλαιο 2. Οι τυπικές τιμές του για προωστικές εφαρμογές είναι από 4% έως 10%. Το $\frac{\Delta p_{023}}{q_{\text{ref}}}$ λέγεται

παράγοντας απώλειας πίεσης - ΠΑΠ (pressure loss factor, PLF) όπως προαναφέρθηκε. Είναι μέτρο της «αντίστασης» του αέρα για να παροχετευθεί από το συμπιεστή στο στρόβιλο. Τυπική τιμή είναι 25%. Αποτελείται δε από την πτώση πίεσης στο διαχύτη και στο φλογοσωλήνα (liner):

$$\frac{\Delta p_{023}}{q_{\text{ref}}} = \frac{\Delta p_{\text{diffuser}}}{q_{\text{ref}}} + \frac{\Delta p_{\text{liner}}}{q_{\text{ref}}} \quad [5]$$

Εν γένει για χαμηλή κατανάλωση καυσίμου πρέπει να έχουμε χαμηλό ΣΑΠ. Από το δεύτερο σκέλος της εξίσωσης (1) αυτό σημαίνει μεγάλο A_{ref} . Η εμπειρία όμως

δείχνει ότι το ΠΑΠ πρέπει να είναι υψηλό (κυρίως το μέρος που ανήκει στο $\frac{\Delta p_{\text{liner}}}{q_{\text{ref}}}$), για να έχουμε καλή ανάμιξη και ευστάθεια καύσης. Έτσι π.χ. για κινητήρες που χρησιμοποιούνται σε πτήσεις μεγάλων αποστάσεων όπου η τιμή του sfc είναι σημαντική συνήθως χρησιμοποιούνται μεγάλες διαμέτροι (A_{ref}) με μικρό ΣΑΠ. Τυπικές τιμές των συντελεστών απωλειών πίεσης δίνονται στον πίνακα 9.1. Έτσι με δεδομένα τις ροϊκές συνθήκες στην έξοδο του συμπιεστή και με επιλογή των συντελεστών απωλειών πίεσης υπολογίζονται οι κύριες διαστάσεις του θαλάμου καύσης.

2) Προσέγγιση με βάση τη διεργασία της καύσης

Κατ'αυτήν θεωρούμε την καύση μέσα στο φλογοσωλήνα σύμφωνα με τη θεωρία του πλήρως αναδευμένου αντιδραστήρα (well stirred reactor). Εδώ υποτίθεται ότι η πρωτεύουσα ζώνη καύσης αποτελείται, κατ'ουσία, από μια στρωτή φλόγα η οποία είναι «συρρικνωμένη» λόγω τύρβης. Η ταχύτητα της φλόγας (ο ρυθμός καύσης) S_T θα είναι συνεπώς μεγαλύτερη απ'ότι στη στρωτή φλόγα λόγω της τύρβης. Αυξημένο S_T σημαίνει αυξημένη διάδοση της φλόγας εντός του φλογοσωλήνα και για την ίδια παροχή η απόδοση καύσης (η_c ή η_b) αυξάνει. Μπορούμε να πούμε ότι η απόδοση της καύσης $\eta_c \sim S_T$ και $\eta_c \sim 1/u_{\text{ref}}$ επειδή αυξανόμενο του u_{ref} ελαττώνεται ο χρόνος παραμονής (residence time) του μίγματος μέσα στο φλογοσωλήνα. Μεγάλος αριθμός πειραματικών δεδομένων από ήδη σχεδιασμένους θαλάμους καύσης έχει δείξει ότι ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\eta_c = f \left[\frac{P_2^{1.75} \cdot A_{\text{ref}} \cdot D_{\text{ref}}^{0.75} \cdot \exp(T_2/300)}{\dot{m}_{\text{ref}}} \right] = f(\Theta) \quad [6]$$

όπου η παράμετρος Θ λέγεται συντελεστής φόρτισης (loading parameter). Η σχέση αυτή χρησιμοποιείται μέσω του διαγράμματος του σχήματος 9.15, όπου με επιλογή του η_c (από εμπειρία) και παραμένοντας μέσα στη διαγραμμισμένη περιοχή (όπου συνήθως εμπίπτουν όλες οι σύγχρονες κατασκευές), παίρνουμε μια τιμή του Θ και με γνωστά τα υπόλοιπα μεγέθη της παρένθεσης υπολογίζουμε το $A_{\text{ref}} \times D_{\text{ref}}^{0.75}$ και συνεπώς τη διάμετρο του κελύφους.

Οι τιμές της διαμέτρου του κελύφους από τις μεθόδους των απωλειών πίεσης και καύσης συνήθως διαφέρουν. Μια συντηρητική προσέγγιση τότε είναι

να διαλέξουμε τη μεγαλύτερη τιμή. Με βάση την A_{ref} μπορούμε να υπολογίσουμε τη διατομή του φλογοσωλήνα A_L από τη σχέση :

$$A_L = k_{optimum} \cdot A_{ref}$$

όπου : [7]

$$k_{opt} = 1 - \left[\frac{(1 - \dot{m}_{sn})^2 - \lambda}{\frac{\Delta P_{023}}{q_{ref}} - \lambda \cdot r^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

όπου :

m_{sn} = ο λόγος του αέρα που εισέρχεται στο ρύγχος (ή προφύσιο) (σχήμα 9.3) προς τον ολικό αέρα που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης.

λ = ο συντελεστής απωλειών του διαχύτη.

r = $A_{ref}/A_{swirler}$

9.3.2 Η ροή στα δακτυλιοειδή διάκενα και διαμέσου των οπών του φλογοσωλήνα

Η ροή στο δακτυλιοειδές διάκενο (annulus) και μέσα από τις οπές στην πρωτεύουσα ζωνή αραίωσης φαίνεται διαγραμματικά στο σχήμα 9.16. Μέσω της χρήσης του συντελεστή εκροής C_D (discharge coefficient), που δίνει ένα μέτρο της πραγματικής παροχής προς την ιδανική παροχή μέσα από την οπή, έχουμε ότι:

$$\dot{m}_h = C_D \cdot A_{hg} \cdot [2 \cdot \rho_2 \cdot (P_{oan} - P_j)]^{0.5} \quad [8]$$

όπου: P_{oan} = ολική πίεση στο διάκενο (annulus) και P_j = η πίεση μέσα στην οπή του φλογοσωλήνα. Επίσης, με αναφορά στο σχήμα 9.16, ισχύει η σχέση, $\frac{\alpha}{A_r} = C_D \cdot k^{0.5}$, όπου

$\alpha = \frac{\dot{m}_h}{\dot{m}_{an}}$, $A_r = \frac{A_{hg}}{A_{an}}$ και $k = \left(\frac{P_{oan} - P_j}{q_{an}} \right)^{0.5}$. Το σχήμα 9.17 δίνει απ'ευθείας τη σχέση $C_D = f(k)$

και συνήθως λαμβάνεται $C_D = 0.6 - 0.8$. Η ροή της δέσμης (jet) που εισέρχεται μέσα στο φλογοθάλαμο δείχνεται στο σχήμα 9.18. Εκείνο που ενδιαφέρει το σχεδιαστή είναι κυρίως η

τροχία (trajectory) και η μέγιστη διείσδυση (penetration) του jet. Μέσω των περιφερειακών jets ο σχεδιαστής μπορεί να ελέγξει την έκταση των διάφορων ζωνών και την ποιότητα των καυσαερίων σ'αυτές.

Πειραματικά έχει ευρεθεί ότι η τροχιά x, y (σχήμα 9.18) ενός jet δίνεται από τον τύπο

$$\frac{y}{d_{jet}} = 0.82 \cdot \left(\frac{\rho_j \cdot u_{jet}^2}{\rho_g \cdot u_g^2} \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{x}{d_{jet}} \right)^{0.33} \quad \text{για jet με είσοδο κάθετη προς το τοίχωμα (\theta=90^\circ) \quad \text{και}$$

$$\frac{y}{d_{jet}} = \left(\frac{y}{d_{jet}} \right)_{\theta=90^\circ} \cdot \sin \theta \quad \text{για jet υπό κλίση (\theta \neq 90^\circ).$$

$$\text{Η μέγιστη διείσδυση για ένα μόνο jet είναι, } \frac{y_{max}}{d_{jet}} = 1.15 \cdot \left(\frac{\rho_j \cdot u_j^2}{\rho_g \cdot u_g^2} \right)^{0.5} \cdot \sin \theta \quad \text{και για}$$

$$\text{πολλαπλά jets είναι, } \frac{y_{max}}{d_{jet}} = 1.25 \cdot \left(\frac{\rho_j \cdot u_j^2}{\rho_g \cdot u_g^2} \right)^{0.5} \cdot \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_g + \dot{m}_j}.$$

Η μέγιστη διείσδυση μας ενδιαφέρει για να μπορέσουμε να επιβεβαιώσουμε 1) ότι τα πρωτεύοντα jets (δεδομένης της παροχής τους και της γεωμετρίας της οπής) διεισδύουν πλήρως για να σταματήσουν τη φλόγα πριν την ενδιάμεση ζώνη και 2) ότι τα δευτερεύοντα jets διεισδύουν επαρκώς, δηλαδή τόσο όσο είναι αναγκαίο για να ελαττώσουν τη θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων μέσω της έντονης τυρβώδους ανάμιξης.

9.3.3 Η αεροδυναμική του στροβιλιστή (swirler)

Στροβιλιστές χρησιμοποιούνται στους θόλους των περισσότερων, σχεδόν, σύγχρονων φλογοσωλήνων για την αύξηση της ανάμιξης του καυσίμου με τον αέρα και την σταθεροποίηση της καύσης διά ανακυκλοφορίας (σχήματα 9.19, 9.20, 9.21).

Η ένταση της περιστροφής που προσδίδεται στη ροή, δίνεται-για τον τυπικό στροβιλιστή του σχήματος 9.19-από τον τύπο :

$$S_N = \frac{2}{3} \frac{1 - (D_{hub}/D_{sw})^3}{1 - (D_{hub}/D_{sw})^2} \cdot \tan \theta, \quad \text{όπου } \theta = \text{γωνία των πτερυγίων} \quad [9]$$

Ανακυκλοφορία επιτυγχάνεται όταν ο αριθμός στροβιλισμού (swirl number), $S_N > 0.6$. Το ποσοστό μάζας που ανακυκλοφορεί, συναρτήσει του S_N , δίδεται από τα διαγράμματα των σχημάτων 9.22 και 9.23. Η πτώση πίεσης στο στροβιλιστή δίνεται από το διάγραμμα 9.24.

Συνήθως ο στροβιλιστής, σε σύγχρονες κατασκευές, υποβοηθείται στη δημιουργία της

ανακυκλοφορίας στην πρωτεύουσα ζώνη, με σειρά αντιταγμένων (opposed) jets όπως φαίνεται στο σχήμα 9.25. Τα πρωτεύοντα αυτά jets τίθενται, συνήθως, σε απόσταση από το στροβιλιστή $\approx 0.5D_L$. Εάν δεν χρησιμοποιείται στροβιλιστής η παροχή που ανακυκλοφορεί στην πρωτεύουσα ζώνη δίδεται από τον τύπο :

$$\frac{\dot{m}_{pzone}}{\dot{m}_{pjets}} = 0.5 \cdot \sin\theta \cdot \left(\frac{T_{pz}}{T_{an}} \right)^{-0.5} \quad [10]$$

Όταν συνεργάζεται στροβιλιστής με αντιταγμένα jets τότε ο αέρας που διατίθεται στην πρωτεύουσα ζώνη για υποβοήθηση της καύσης και δημιουργία ανακυκλοφορίας δίδεται από τον τύπο:

$$m_{pzone} = m_{sw} + m_{at} + 0.5 (m_c + m_{pj})$$

$$m_{sw} = \text{αέρας στροβιλιστή}$$

$$m_{at} = \text{αέρας ψεκαστή (atomizer)}$$

m_c = αέρας ψύξης μέσω της διάτρητης επιφάνειας (transplay) του θόλου μέχρι και τα πρωτεύοντα jets.

$$m_{pj} = \text{αέρας των πρωτεύοντων jets}$$

Ο αριθμός των οπών, n , που απαιτούνται στην πρωτεύουσα ζώνη μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$nd_{jp}^2 = \frac{15.25 \cdot \dot{m}_{jp}}{(P_2 \cdot \Delta P_L / T_2)^{\frac{1}{2}}} \quad [11]$$

όπου : \dot{m}_{jp} η μάζα του αέρα που περνά από τις οπές και n ο αριθμός των οπών.

Τότε, η γεωμετρική διάμετρος των οπών δίνεται από τον τύπο :

$$d_h = \frac{d_j}{C_D^{0.5}} \quad [12]$$

όπου C_D ο συντελεστής εκροής.

Επειδή, όμως, στην πρωτεύουσα ζώνη επικρατούν πολύπλοκες αεροθερμοδυναμικές συνθήκες συνήθως ο αριθμός των οπών προσδιορίζεται με βάση πειραματικά δεδομένα και εμπειρία. Για δακτυλοειδείς θαλάμους καύσης ο αριθμός των οπών τίθεται συνήθως διπλάσιος των ψεκαστών του καυσίμου.

9.4 Η ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΖΩΝΗ ΚΑΙ Η ΖΩΝΗ ΑΡΑΙΩΣΗΣ (INTERMEDIATE KAI DILUTION ZONES)

Η ενδιάμεση ζώνη (η περιοχή μεταξύ πρωτεύοντων και δευτερεύοντων jets) εξυπηρετεί κυρίως την επανασύνθεση μερικών από τα ενδιάμεσα προϊόντα διάσπασης (dissociation products) της καύσης στην πρωτεύουσα ζώνη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ελάττωση των ρύπων και την πλήρη απόδοση της θερμικής ενέργειας του καυσίμου. Για σωληνοειδείς θαλάμους καύσης το μήκος της λαμβάνεται περίπου ίσο με D_L .

Στη ζώνη αραιώσης (dilution zone) περαιτέρω τυρβώδης ανάμιξη μεταξύ των καυσαερίων και των εγκάρσιων jets αραιώσης επιτυγχάνει ελάττωση της θερμοκρασίας των καυσαερίων, ώστε να εξέλθουν από το ακροφύσιο του θαλάμου καύσης προς το στρόβιλο με θερμοκρασία επιτρεπτή για το υλικό των πτερυγίων. Η παράμετρος που εκφράζει τη θερμοκρασιακή ποιότητα των καυσαερίων που εξέρχονται από το ακροφύσιο του φλοφοσωλήνα είναι ο παράγοντας κατανομής (pattern factor), PF που δίδεται από την έκφραση

$$PF = \frac{T_{\max} - T_3}{T_3 - T_2} \quad [13]$$

όπου T_{\max} = η μέγιστη θερμοκρασία στο προφίλ θερμοκρασίας στην έξοδο του ακροφυσίου, T_2 = η μέση θερμοκρασία στη ζώνη αραιώσης, T_3 = η μέση θερμοκρασία των εξερχόμενων καυσαερίων (σχήμα 9.26α).

Ο σχεδιασμός της ζώνης αραιώσης και η κατανομή των οπών γίνεται με βάση πειραματικά δεδομένα ή διαγράμματα, όπως φαίνεται στα σχήματα 9.26, 9.27, 9.28, 9.29,

9.30. Τα σχήματα 9.27, 9.28 δίνουν τη σχέση $\frac{D_L}{nd_j} = f\left(\frac{m_j}{m_g}, \frac{T_g}{T_3}\right)$ που απαιτείται για να επιτευχθεί ο βέλτιστος παράγοντας κατανομής (PF) για σωληνοειδείς και δακτυλοειδείς θαλάμους καύσης. Ο παράγοντας κατανομής επίσης σχετίζεται με το μήκος του θαλάμου καύσης και την απώλεια πίεσης που υφίσταται ο αέρας κατά την πορεία του από τον διαχύτη

μέχρι και την έξοδο του θαλάμου καύσης. Ανάλογος συσχετισμός δίδεται στα σχήματα 9.29, 9.30 για σωληνοδακτυλιοειδείς και δακτυλιοειδείς θαλάμους καύσης. Ο παράγοντας κατανομής είναι σημαντικό λειτουργικό χαρακτηριστικό του θαλάμου καύσης, ιδιαίτερα σε σχέση με την ασφαλή λειτουργία του κατάντι στροβίλου και επηρεάζει τις προδιαγραφές συντήρησης ολόκληρου του στροβιλοκινητήρα.

9.5 ΟΡΙΑ ΕΥΣΤΑΘΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΝΑΥΣΗΣ ΚΑΥΣΤΗΡΑ

Για κάθε θάλαμο καύσης υπάρχει ένα πλούσιο και ένα πτωχό όριο λόγου αέρα/καυσίμου πέραν του οποίου η φλόγα στην πρωτεύουσα ζώνη γίνεται ασταθής ή και σβήνει. Συνήθως ως όρια ευστάθειας (stability limits) λαμβάνονται οι λόγοι αέρα/καυσίμου στους οποίους η φλόγα σβήνει τελείως, αλλά αστάθειες στην ροή και στην καύση παρατηρούνται αρκετά πριν από αυτά τα ακραία όρια. Υπό ασταθή λειτουργία ο θάλαμος καύσης παράγει θόρυβο, δονήσεις και αστάθεια στην συνολική ροή του όλου συστήματος με δραματικές, πολλές φορές, επιπτώσεις στα διάφορα τμήματα του αεριοστροβίλου όπως π.χ. επικίνδυνες για τα υλικά δονήσεις στις πτερυγώσεις των στροβίλων και των συμπιεστών.

Το εύρος των λόγων αέρα/καυσίμου μεταξύ πλουσίων και πτωχών ορίων ελαττώνεται με την αύξηση της ταχύτητας του αέρα και εάν η παροχή του αέρα αυξηθεί πέραν ενός σημείου η έναυση είναι τελείως αδύνατη. Ένα τυπικό διάγραμμα ευστάθειας δείχνεται στο σχήμα 9.31 Για την σωστή επιλογή ενός θαλάμου καύσης θα πρέπει το απαιτούμενο εύρος λόγων αέρα/καυσίμου και παροχών αέρα για τη λειτουργία του αεριοστροβίλου να καλύπτεται ασφαλώς από τα διαγράμματα ευστάθειας του συγκεκριμένου θαλάμου. Επιπλέον πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι συνθήκες κατά την επιτάχυνση και την επιβράδυνση του κινητήρα. Επί παραδείγματι κατά την επιτάχυνση θα υπάρξει μια γοργή αύξηση στην ροή του καυσίμου ενώ η παροχή του αέρα δεν θα ισορροπήσει αμέσως αλλά μόνο όταν οι στροφές της μηχανής σταθεροποιηθούν στην νέα τιμή. Έτσι στιγμιαία το σύστημα καύσης θα λειτουργεί με πολύ χαμηλό λόγο αέρα/καυσίμου. Συνήθως ο ρυθμός μεταβολής της ροής του καυσίμου ελέγχεται ώστε να μην ξεπερνά μια μέγιστη τιμή για την αποφυγή της σβέσης της φλόγας και για να αποφευχθούν μεταβαλλόμενες υψηλές θερμοκρασίες στον στροβίλο. Το διάγραμμα ευστάθειας εξαρτάται από την πίεση λειτουργίας και τα όρια του ελαττώνονται με την ελάττωση της. Εν γένει μηχανές με υψηλό λόγο συμπίεσης έχουν τα λιγότερα προβλήματα από αυτή την άποψη.

Επίσης ένας άλλος σημαντικός παραγοντας λειτουργίας των θαλάμων καύσης είναι και η εύκολη έναυση κατά το ξεκίνημα της μηχανής και η επανέναυση σε κάποιο ύψος πτήσης όταν για κάποιο λόγο σβήσει η φλόγα. Όταν ξεκινά ο αεριοστροβίλος επιταχύνεται κατ'

αρχήν ο συμπιεστής μέχρι τις στροφές εκείνες που δίνουν παροχή αέρα ικανή να διατηρήσει την καύση. Μερικές φορές αυτό επιτυγχάνεται τροφοδοτώντας συμπιεσμένο αέρα από εξωτερική παροχή κατευθείαν στο στρόβιλο που κινεί τον συμπιεστή. Συνηθέστερα όμως χρησιμοποιείται ένας ηλεκτρικός κινητήρας ή μικρός βοηθητικός στρόβιλος συνδεδεμένος με τον κύριο άξονα μέσω μειωτήρα ο οποίος πάλι τροφοδοτείται εξωτερικά με συμπιεσμένο αέρα. Κατά την επιτάχυνση του αέρα ξεκινά και η τροφοδοσία καυσίμου στους καυστήρες. Η έναυση γίνεται μέσω σπινθηριστών τοποθετημένων σε ένα ή δύο φλογοθαλάμους αν πρόκειται για σύστημα πολλαπλών σωληνοειδών θαλάμων ή σε μία μόνο θέση όταν πρόκειται για δακτυλιοειδή θάλαμο. Σε συστήματα πολλαπλών σωληνοειδών θαλάμων η περιφερειακή έναυση επιτυγχάνεται με περιφερειακή διασύνδεση των σωληνοειδών καυστήρων (σχήμα 9.4 α,β).

Η συμπεριφορά έναυσης των θαλάμων καύσης δίδεται μέσω ενός διαγράμματος έναυσης όπως αυτό του σχήματος 9.31. Το διάγραμμα έναυσης εξαρτάται σημαντικά από την πίεση του θαλάμου και όσο χαμηλότερη είναι η πίεση τόσο δυσκολότερη είναι η έναυση. Η επανέναυση (relight) της μηχανής σε κάποιο υψόμετρο πτήσης αποτελεί και την πλέον αυστηρή απαίτηση της κατασκευής του θαλάμου. Το πρόβλημα αμβλύνεται κάπως με την χρήση ισχυρότατων σπινθηριστών και καλού σχεδιασμού του θαλάμου και του συστήματος έγχυσης. Διαγράμματα ευσταθούς λειτουργίας και έναυσης κατασκευάζονται για ένα συγκεκριμένο τύπο θαλάμου καύσης, για διαφορετικές ροϊκές συνθήκες και για τα διάφορα καύσιμα που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στον καυστήρα αυτόν. Τυπικά αεροπορικά καύσιμα και οι κυριότερες ιδιότητες τους δίνονται στους πίνακες 9.1 και 9.2.

ΠΙΝΑΚΑΣ 9.1

Απώλειες πίεσης σε τυπικούς θαλάμους καύσης

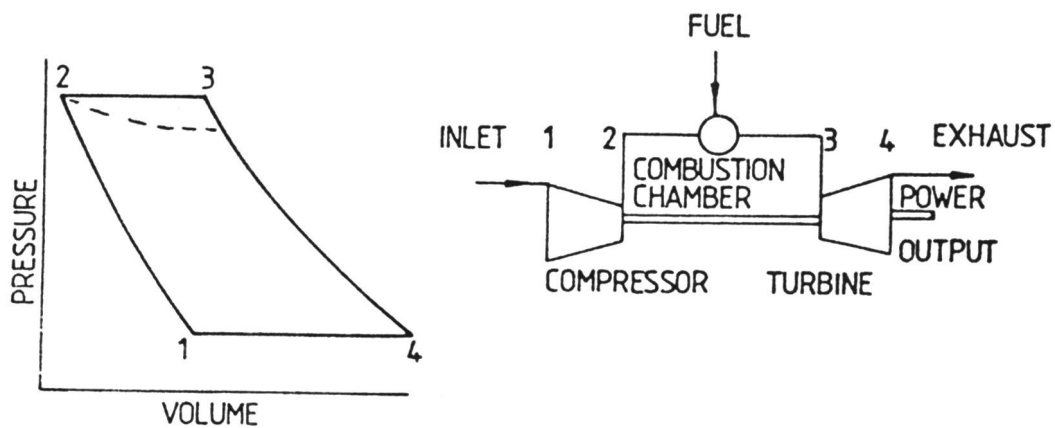
| Τύπος καυστήρα | $\frac{\Delta P_{2-3}}{P_2}$ | $\frac{\Delta P_{2-3}}{q_{ref}}$ | $\frac{m_2 T_2^{0.5}}{A_{ref} P_2}$ |
|---------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Σωληνοειδής | 7% | 37.5% | 0.035% |
| Σωληνοδακτυλιοειδής | 6% | 25% | 0.04% |
| Δακτυλιοειδής | 7% | 18% | 0.05% |

ΠΙΝΑΚΑΣ 9.2

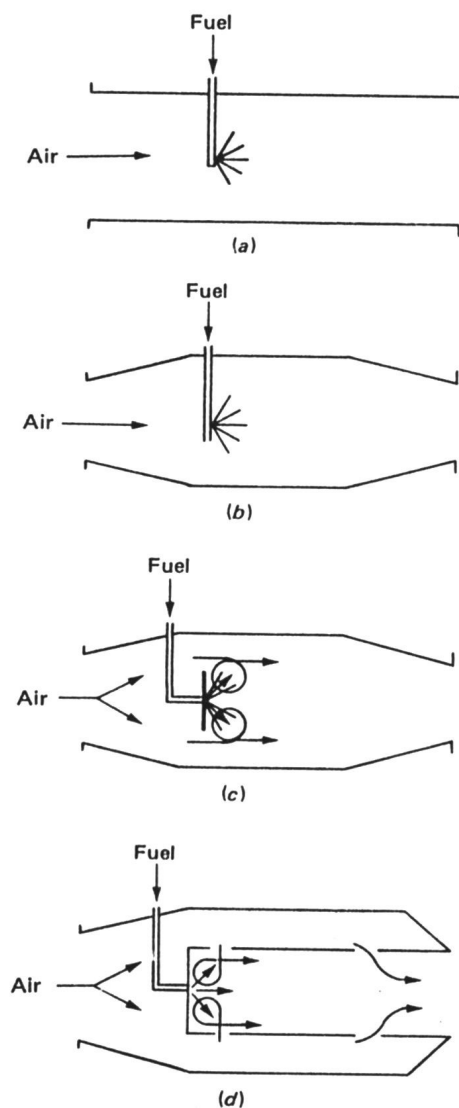
Τυπικές ιδιότητες και αναλογίες του αερίου στις διάφορες ζώνες
σύγχρονων θαλάμων καύσης

| <i>Ιδιότητα στην είσοδο της ζώνης</i> | <i>Πρωτεύουσα</i> | <i>Ενδιάμεση</i> | <i>Αραίωσης</i> |
|--|-------------------|------------------|-----------------|
| T ¹ | 2300 K | 1850 K | 1200 K |
| AFR (σχεδιασμού) | 15 | 25 | 60 |
| AFR (λειτουργικά όρια) | 8 - 30 | | 45 – 160 |
| η_c (απόδοση καύσης για πτήση σε χαμηλό ύψος) | 90% | 95% | 99% |
| η_c (απόδοση καύσης για πτήση σε μεγάλο ύψος) | 50% | 80 – 90% | 95% |
| Χρόνος παραμονής καυσίμου (residence time) | 2 – 3 ms | 2 ms | 2 – 3 ms |

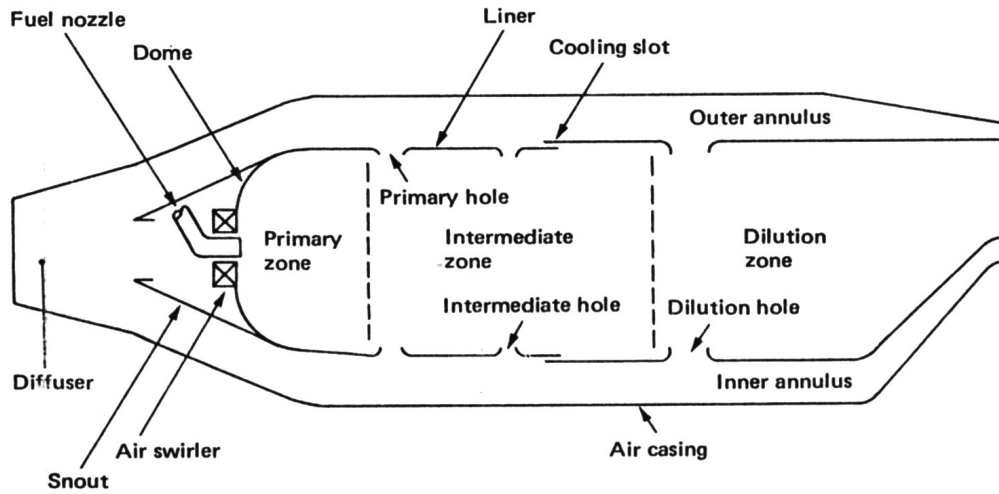
¹ Για θερμοκρασία εισόδου αέρα στο θάλαμο καύσης 450 K.



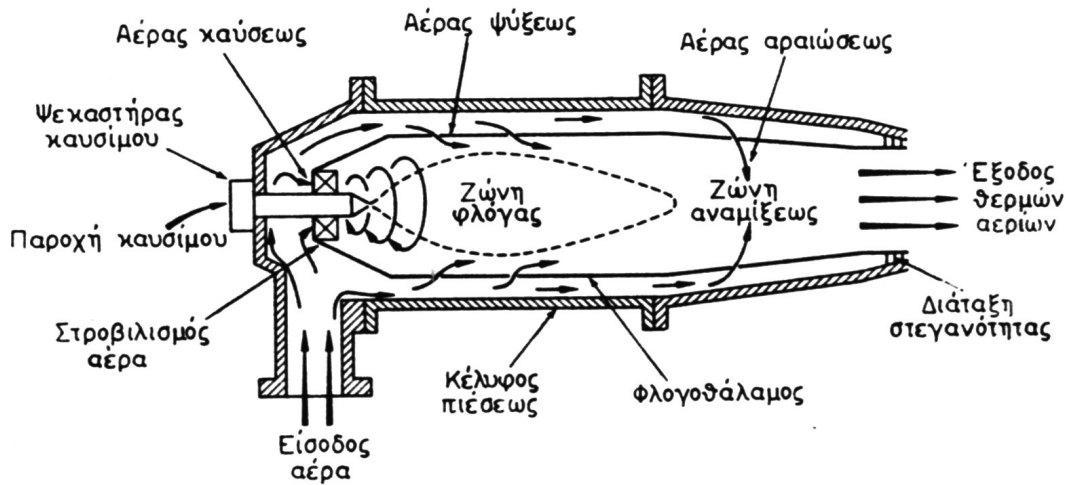
Σχήμα 9.1 Αρχή λειτουργίας κύκλου αεριοστροβίλου



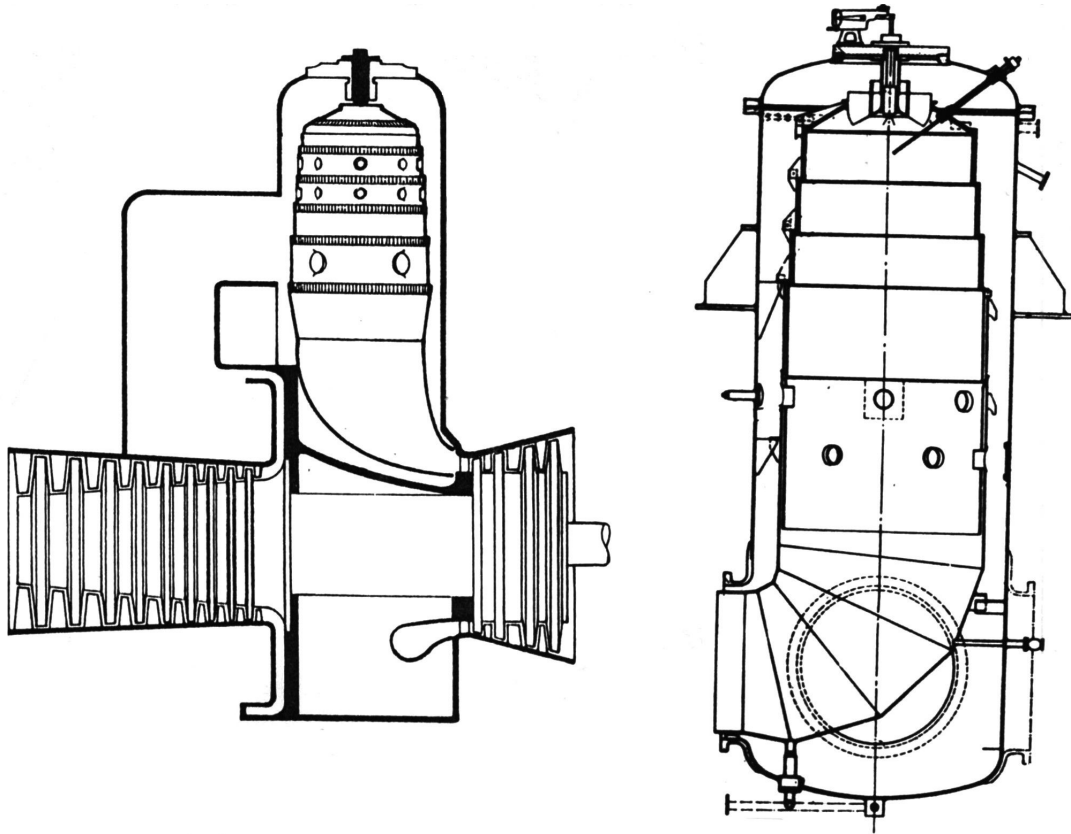
Σχήμα 9.2 Στάδια στην εξέλιξη των θαλάμων καύσης αεριοστροβίλων



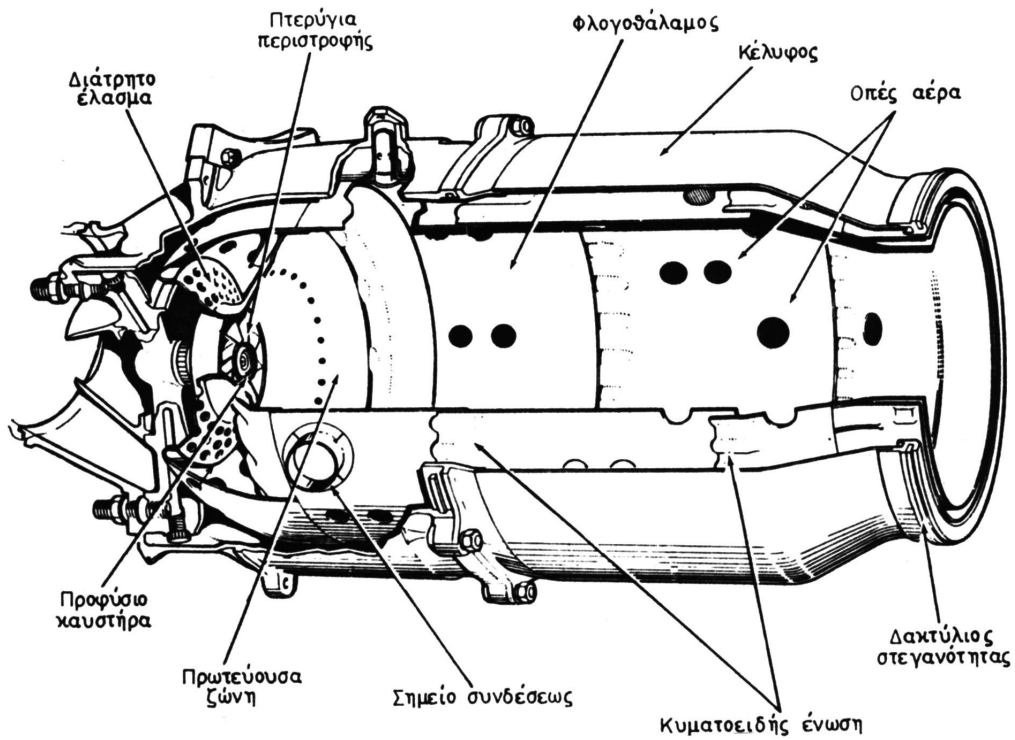
Diffuser=Διαχυτής, Snout=Προφύσιο, Swirler=Στροβιλιστής, Dome=θόλος, Primary zone=Πρωτεύουσα ζώνη, Primary holes=Πρωτεύουσες οπές, Intermediate zone =Ενδιάμεση ζώνη, Dilution zone=Ζώνη αραιώσεως, Annulus=Δακτυλιοειδές διακενο, Fuel nozzle=Ακροφύσιο εγχύσεως καυσίμου



Σχήμα 9.3α Κύρια τμήματα και λειτουργία τυπικών θαλάμων καύσης αεριοστροβίλου

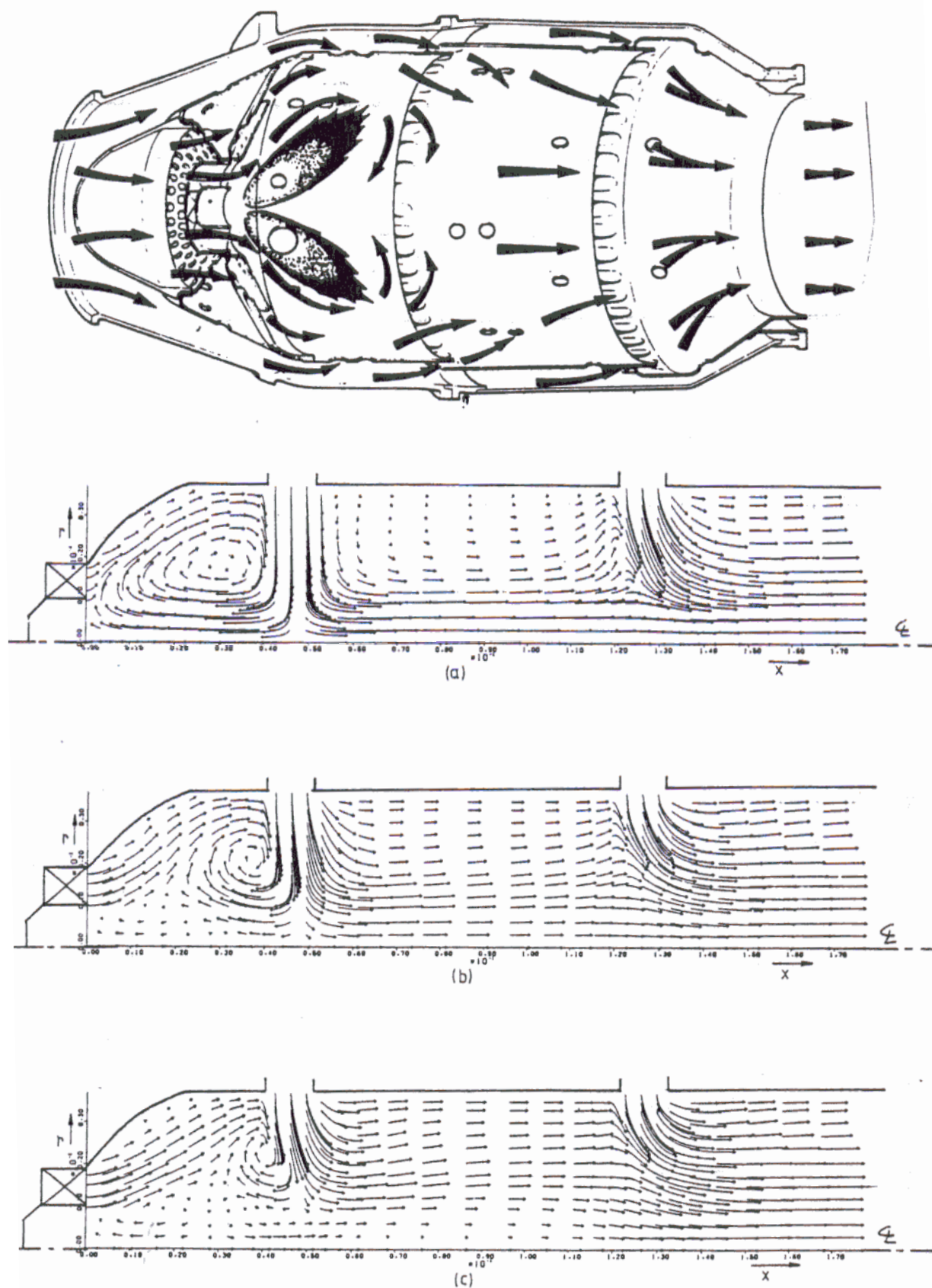


Θαλαμοί καύσης αεριοστροβίλων ισχύος

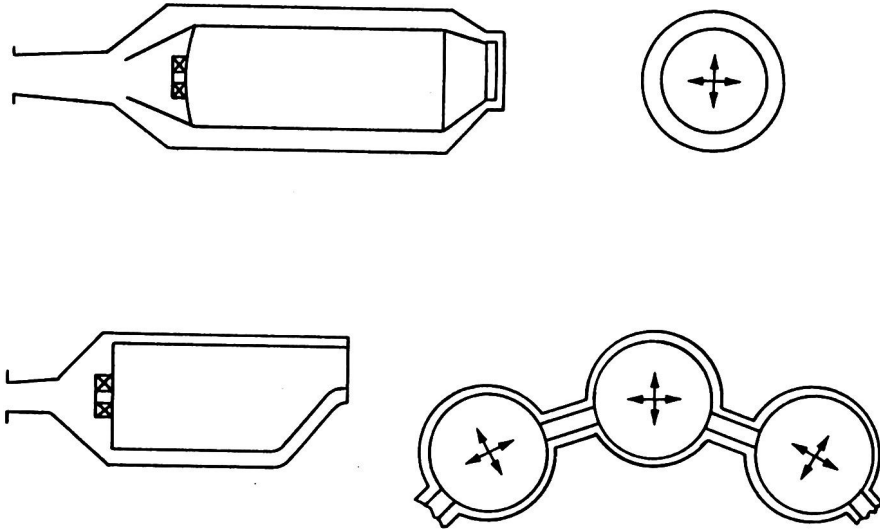


Θαλαμος καύσης στροβιλοκινητήρα

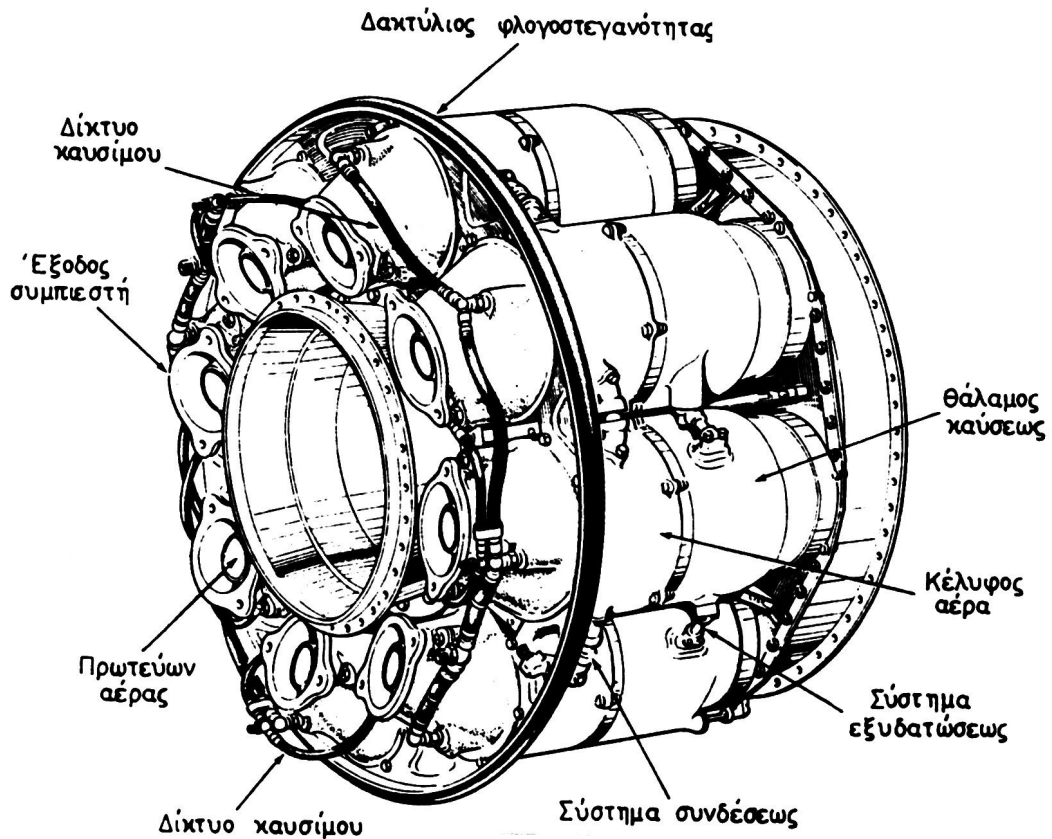
Σχήμα 9.3β Διάφοροι τύποι θαλάμων καύσης



Σχήμα 9.3γ Ροή αέρα και καυσασερίων στον θάλαμο καύσης

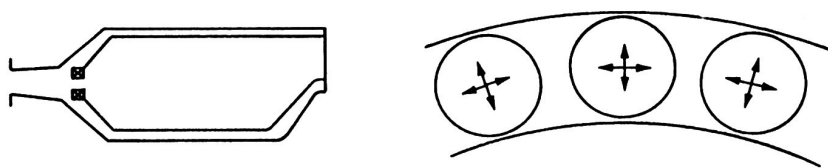


Συστημα καυσης πολλαπλων θαλαμων σωληνοειδους τυπου

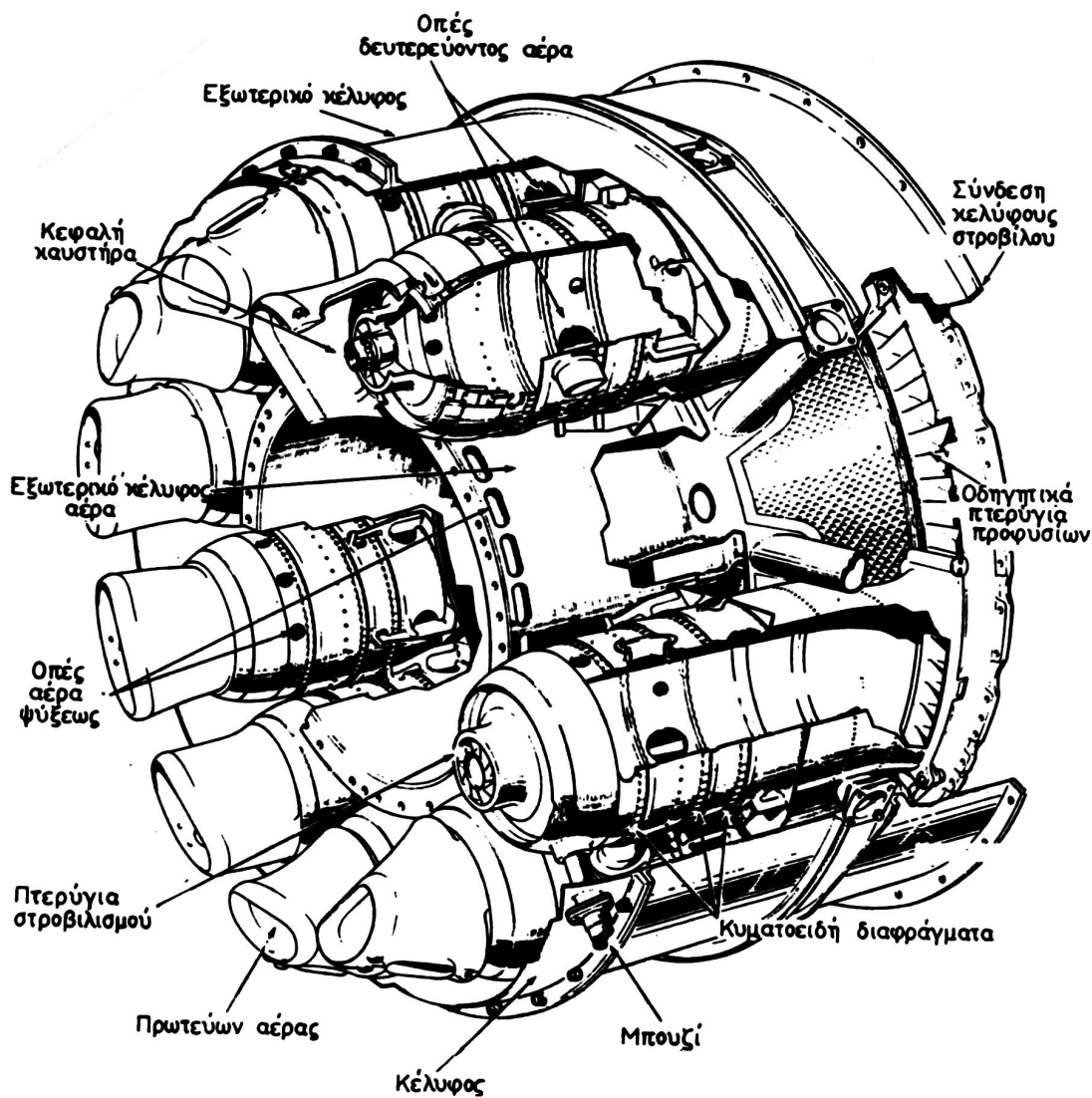


α)

Σχήμα 9.4. Τύποι θαλάμων καύσης στροβιλοκινητήρων α) σωληνοειδής, β) σωληνοδακτυλιοειδής, γ) περιφερειακού δακτυλίου

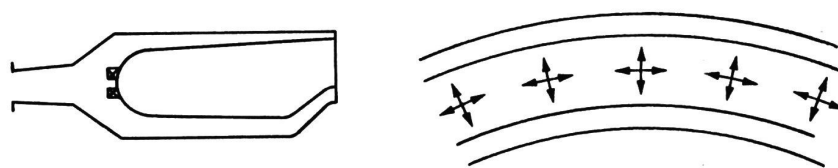


Θαλαμος καυσης συνδυασμενου τυπου (σωληνοδακτυλιοειδης)

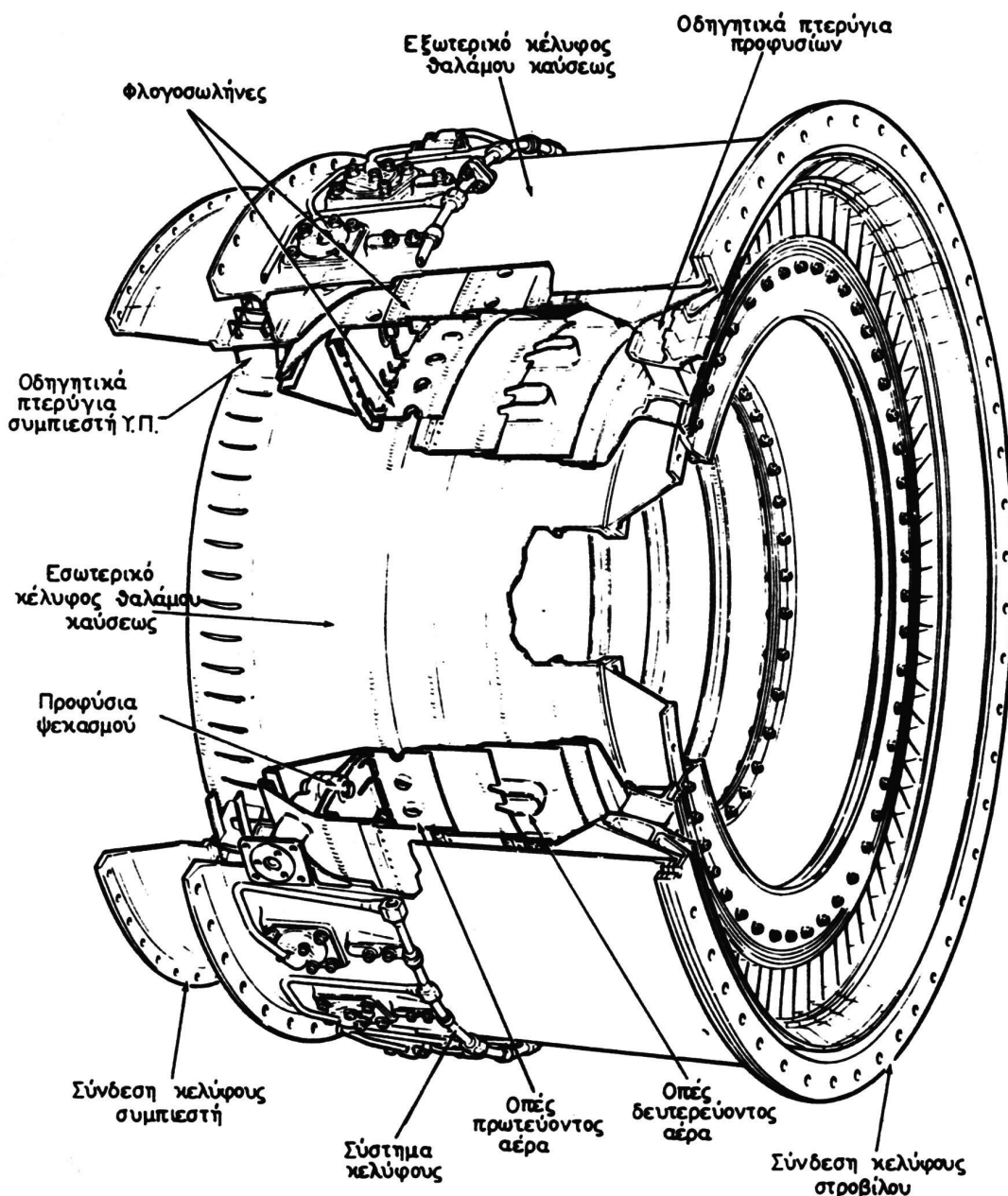


β)

Σχήμα 9.4 Συνεχίζεται

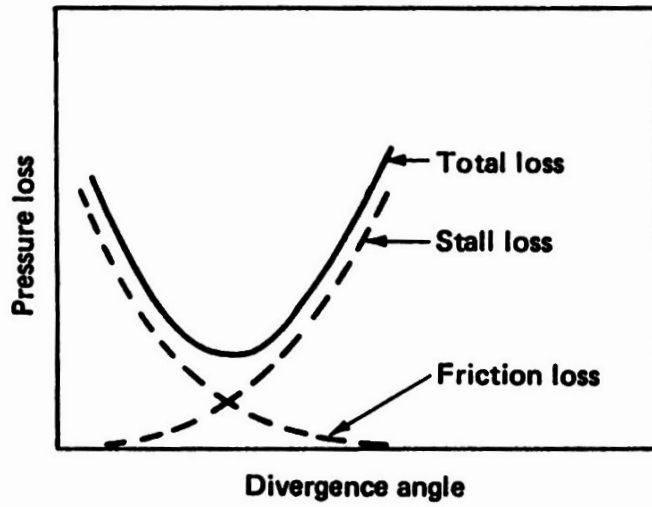


Θαλαμος καυσης τυπου περιφερειακου δακτυλιου

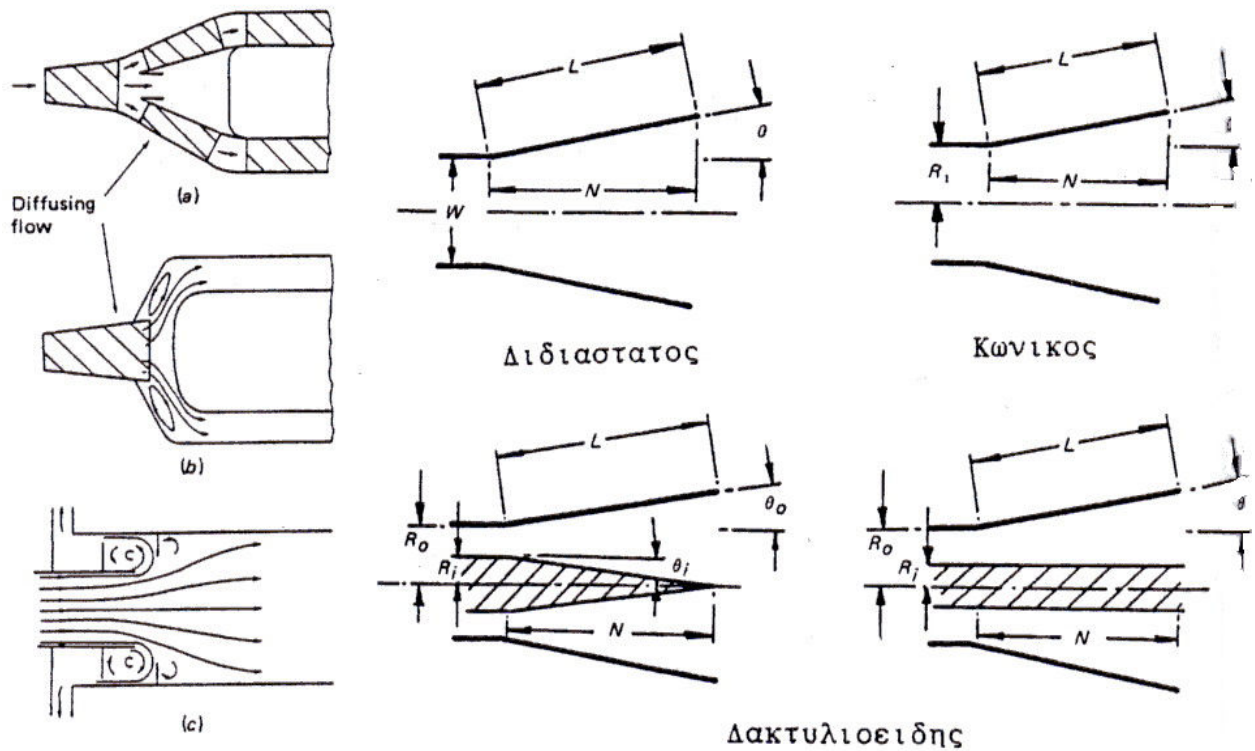


γ)

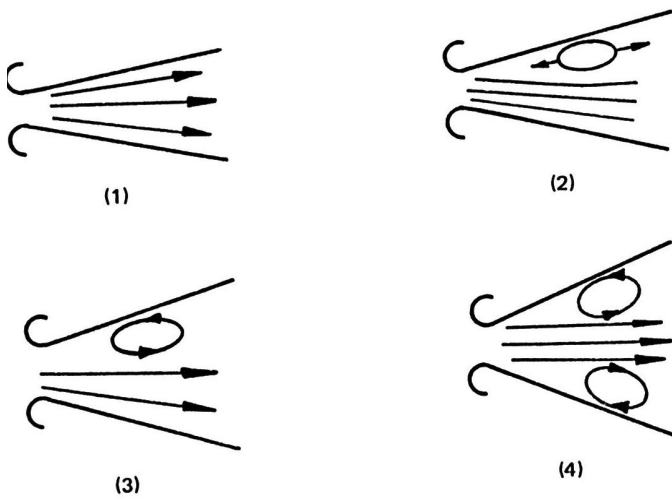
Σχήμα 9.4 Συνεχίζεται



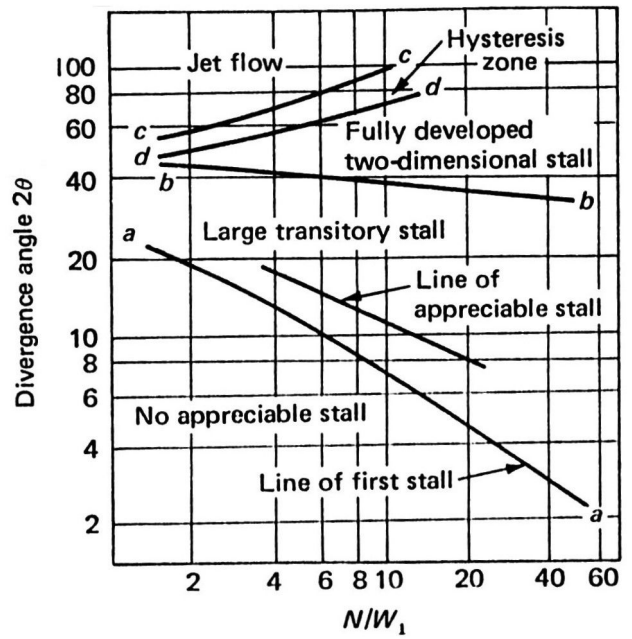
Σχήμα 9.5 Επίδραση γωνίας διαχύτη επι των απωλειών πίεσης



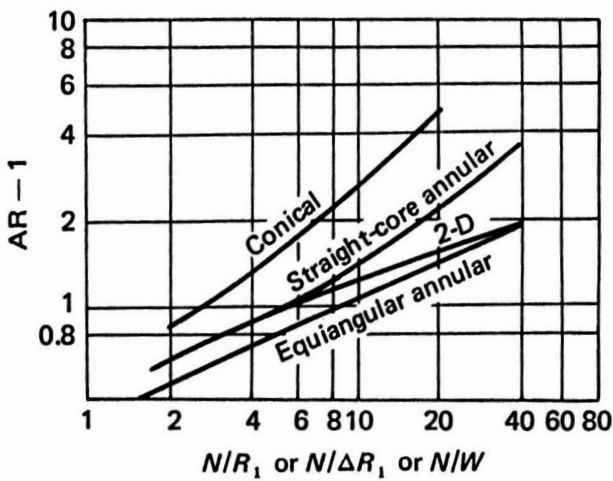
Σχήμα 9.6 α) Τύποι διαχυτών/προφυσίων χρησιμοποιούμενων σε σύγχρονους θαλάμους καύσης στροβιλοκινητήρων, β) Τυπικές γεωμετρίες διαχυτών



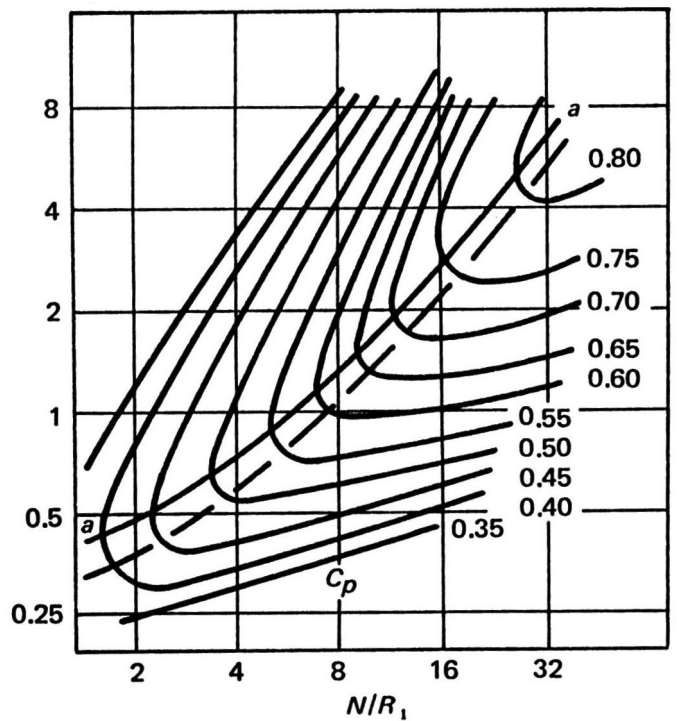
Σχήμα 9.7 Λειτουργία διαχύτη υπό διαφορετικές ροϊκές συνθήκες



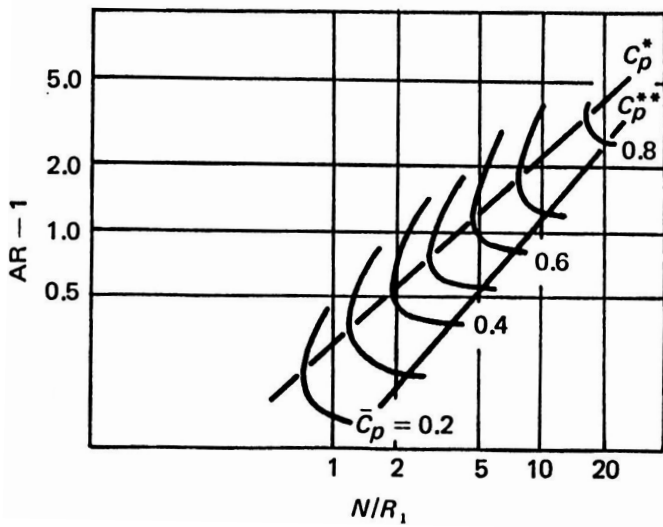
Σχήμα 9.8 Διάγραμμα περιοχών λειτουργίας διδιάστατων διαχυτών



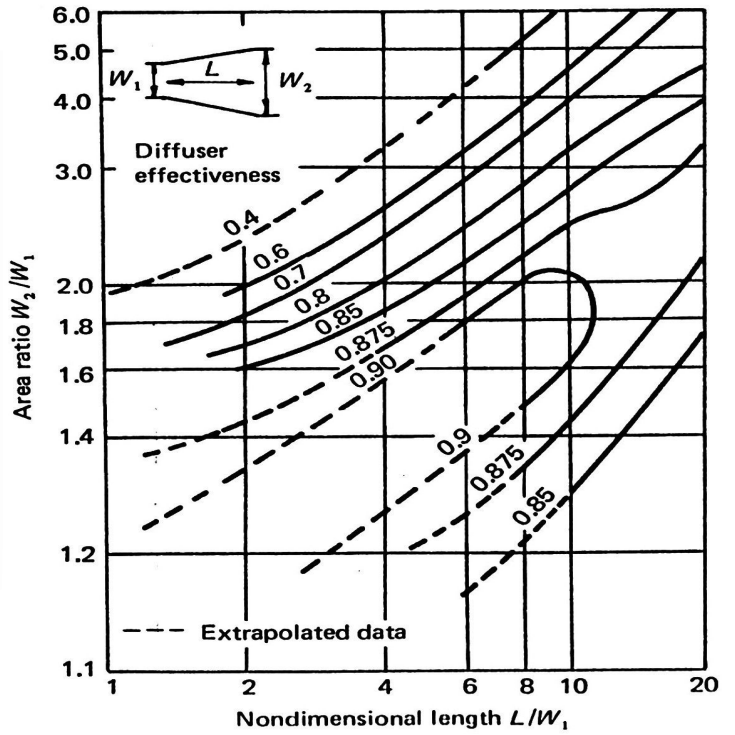
Σχήμα 9.9 Γραμμές εμφάνισης αποκόλλησης της ροής συναρτήσει της γεωμετρίας του διαχύτη



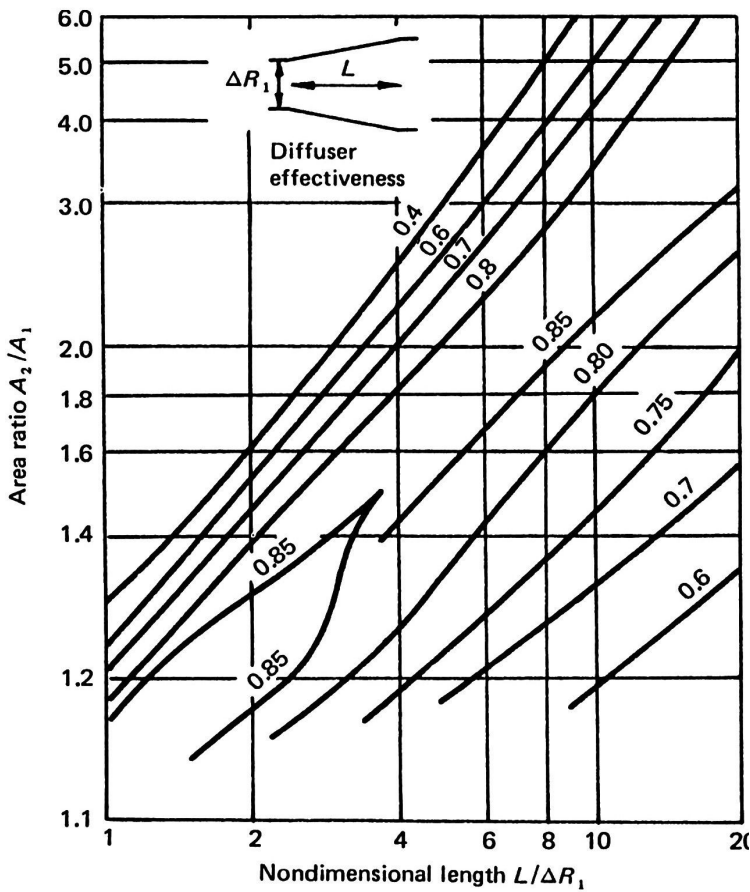
Σχήμα 9.10 Διάγραμμα λειτουργίας κωνικών διαχυτών για μέγιστη ανάκτηση πίεσης



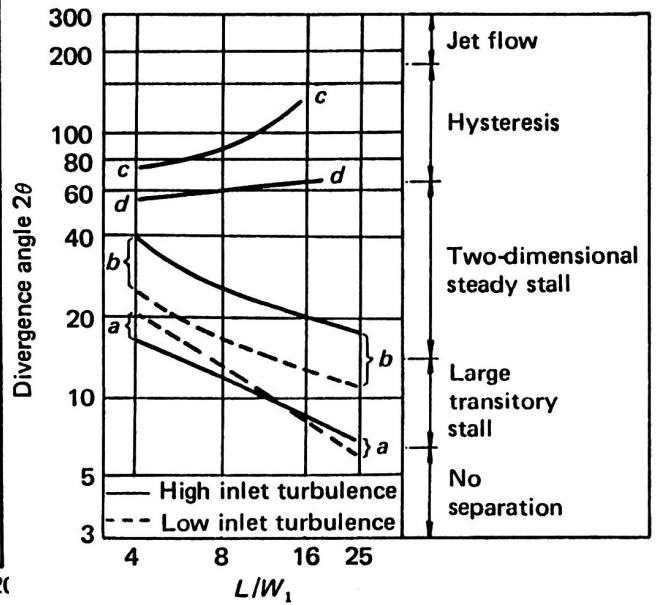
Σχήμα 9.11 Διάγραμμα λειτουργίας κωνικών διαχυτών



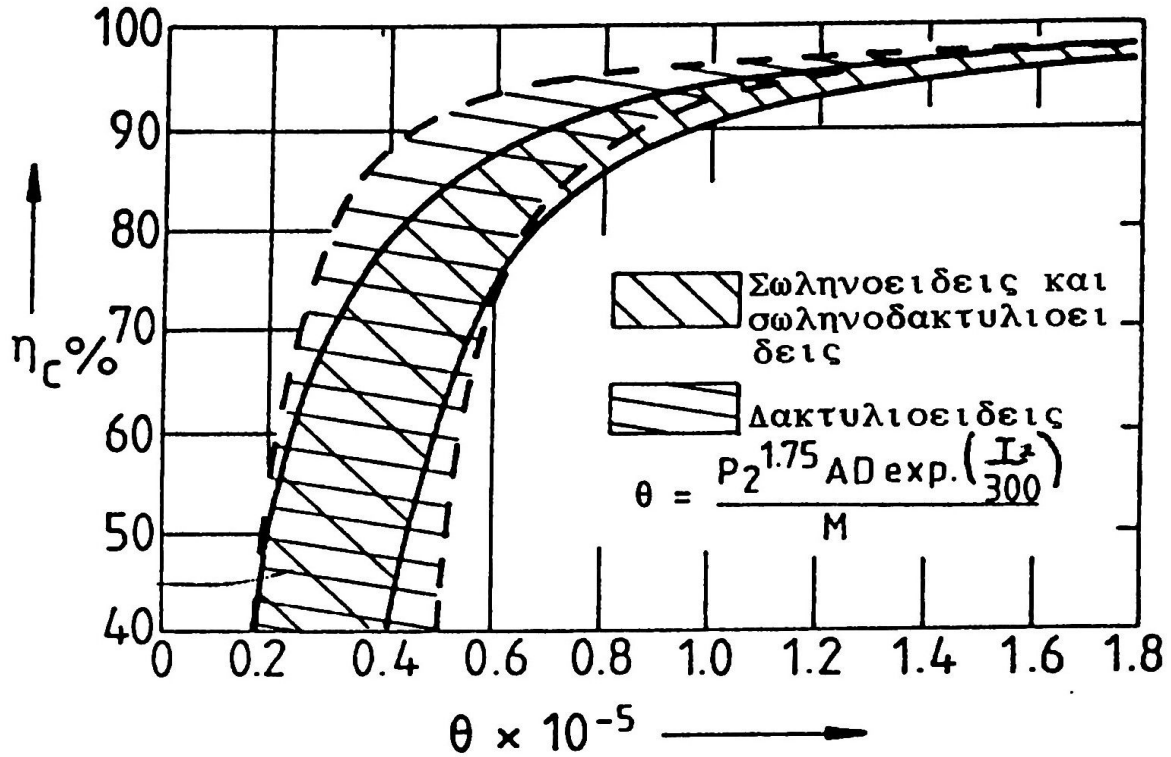
Σχήμα 9.12 Διάγραμμα λειτουργίας διδιάστατων διαχυτών



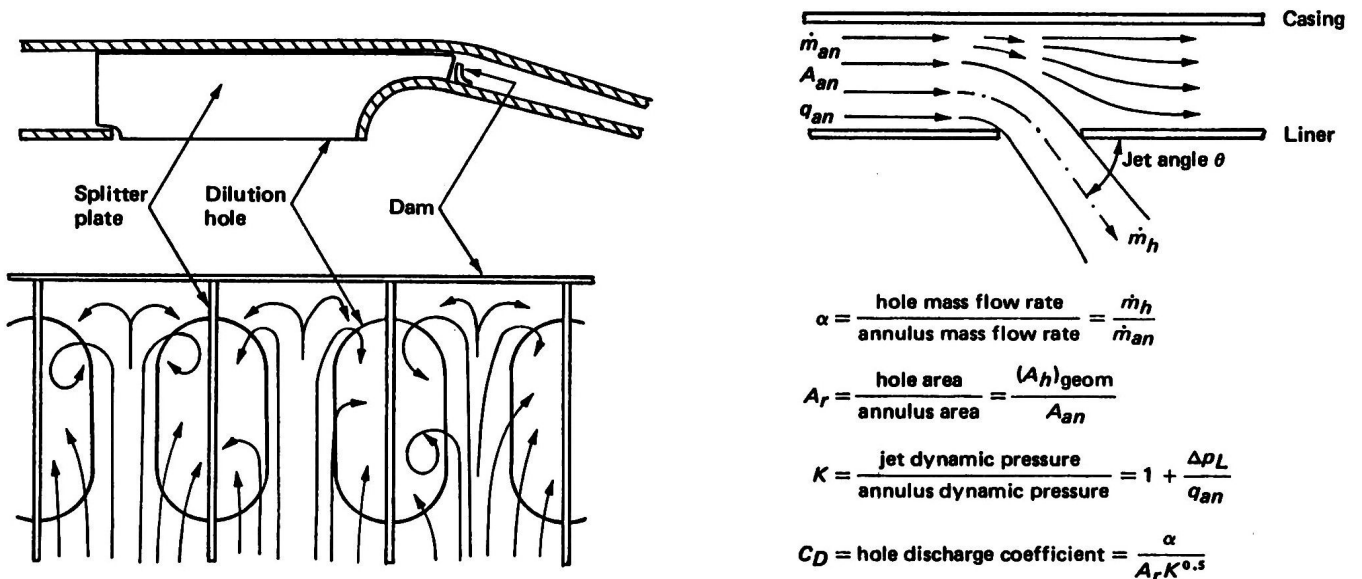
Σχήμα 9.13 Διάγραμμα λειτουργίας διαχυτών περιφερειακού δακτυλίου



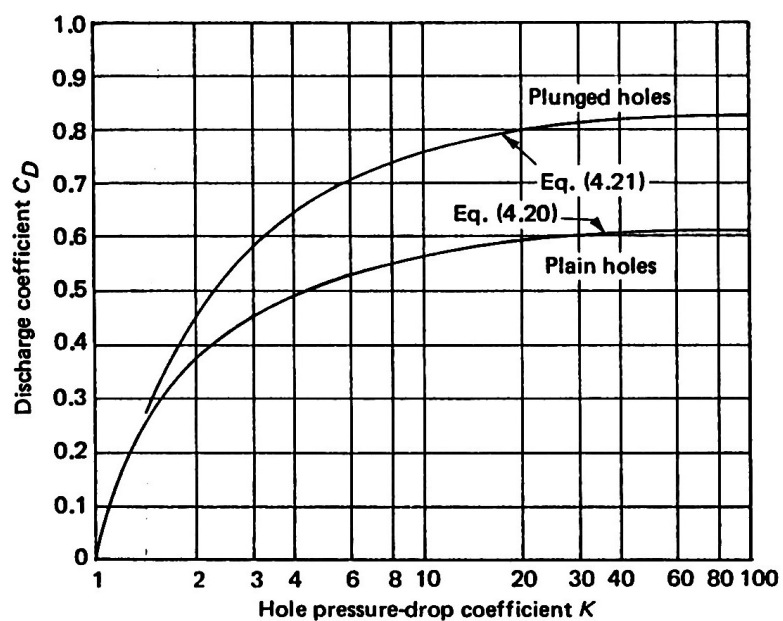
Σχήμα 9.14 Περιοχές λειτουργίας διδιάστατων επίπεδων διαχυτών



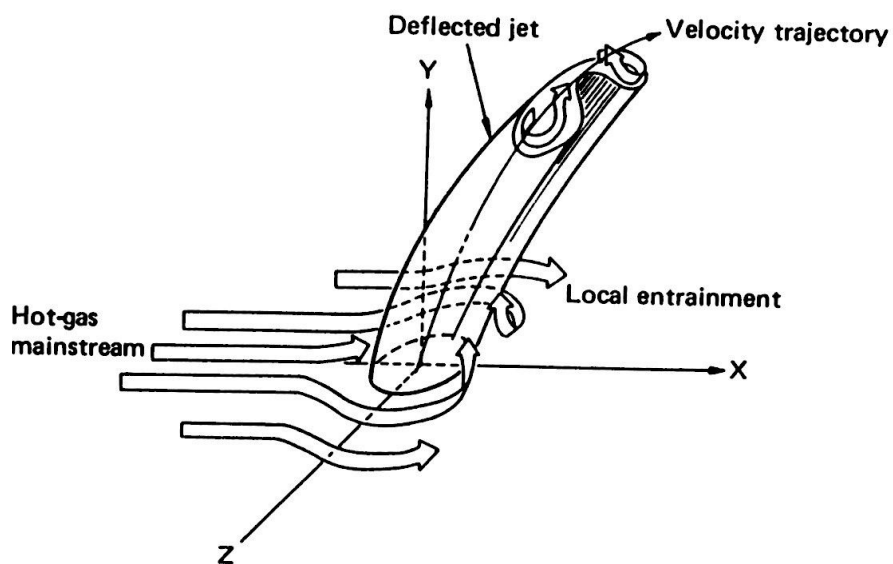
Σχήμα 9.15 Διάγραμμα $\eta_c=f(\theta)$ για θαλάμους καύσης σύγχρονων στροβιλοκινητήρων



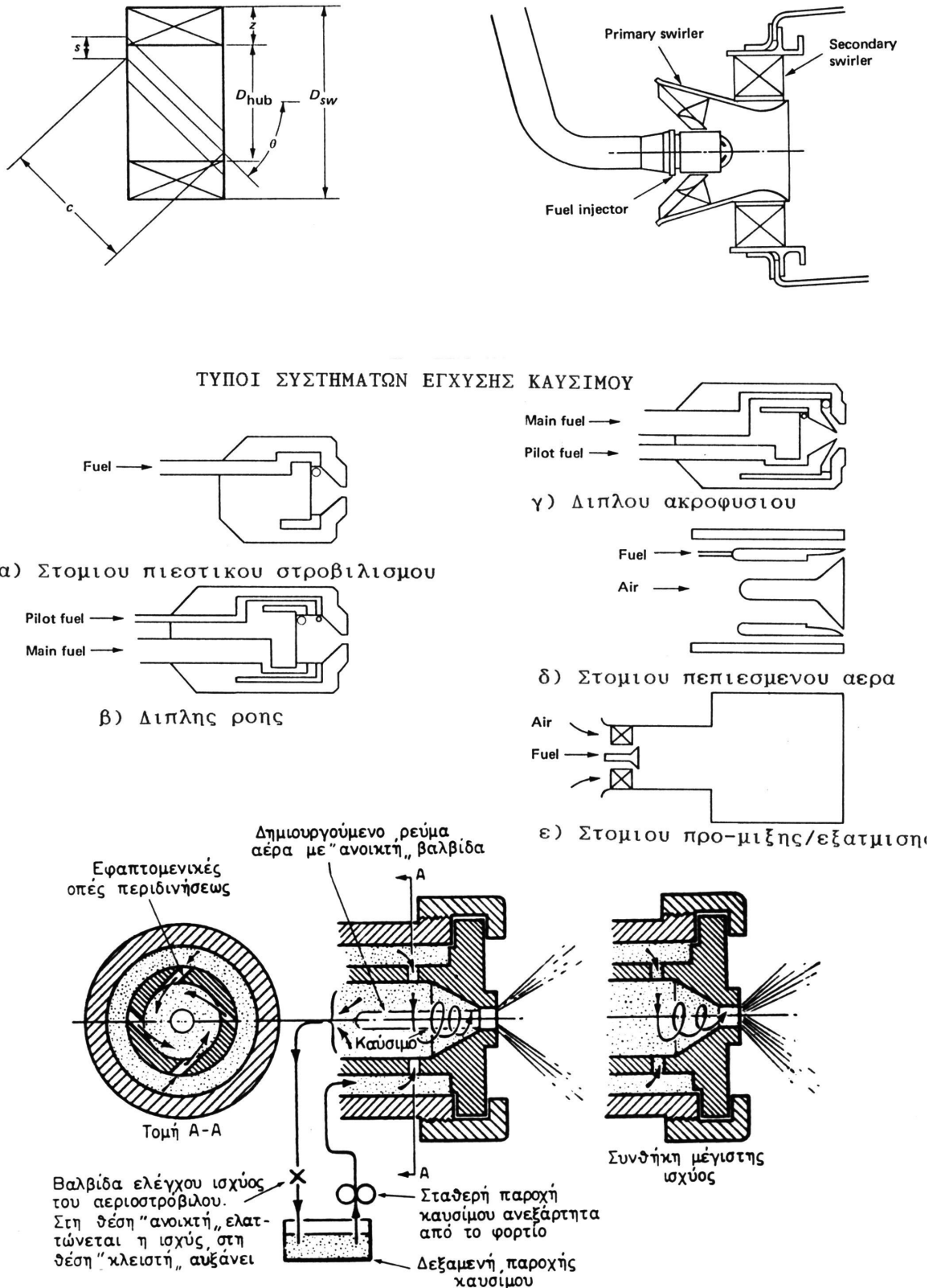
Σχήμα 9.16 Ροή στο διάκενο και μέσω των οπών του φλογοσωλήνα



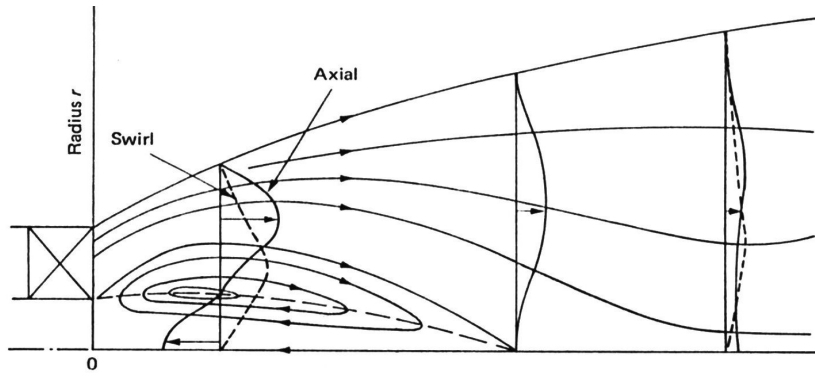
Σχήμα 9.17 Συντελεστής εκροής οπών φλογοσωλήνα



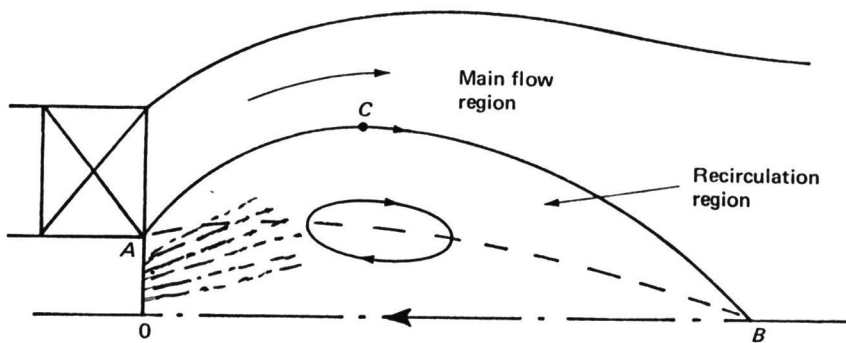
Σχήμα 9.18 Ροή jet σε εγκάρσιο ρεύμα



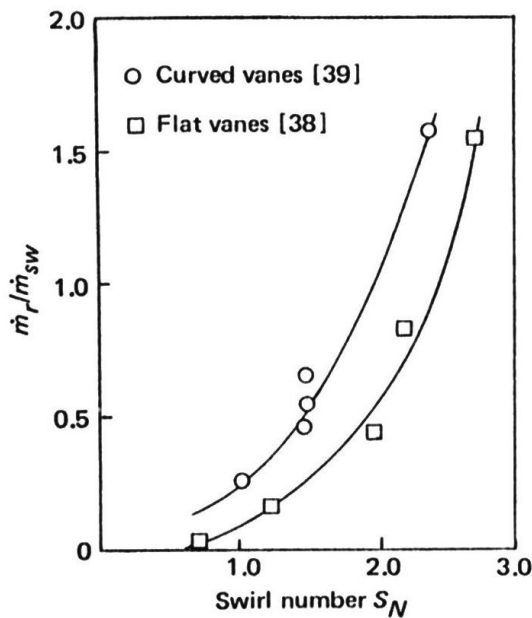
Σχήμα 9.19 Τυπικές γεωμετρίες στροβιλιστή και διατάξεις εγχυτήρων καυστήρων (εκνεφωτές)



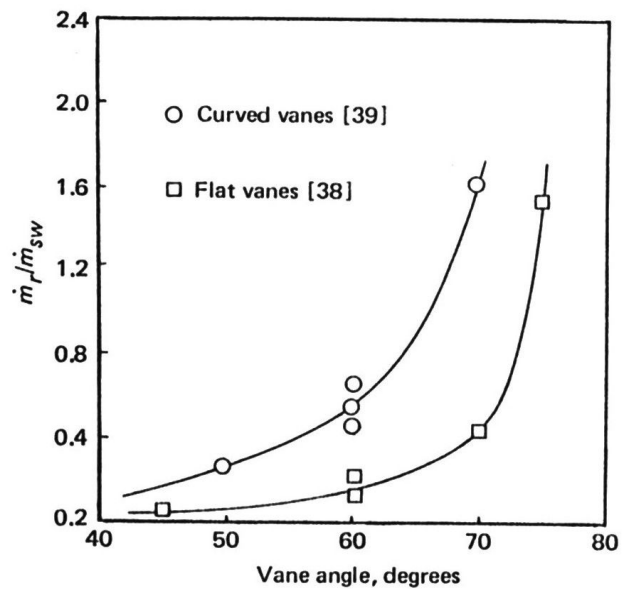
Σχήμα 9.20 Τυπικά προφίλ ταχυτήτων κατάντι του στροβιλιστή



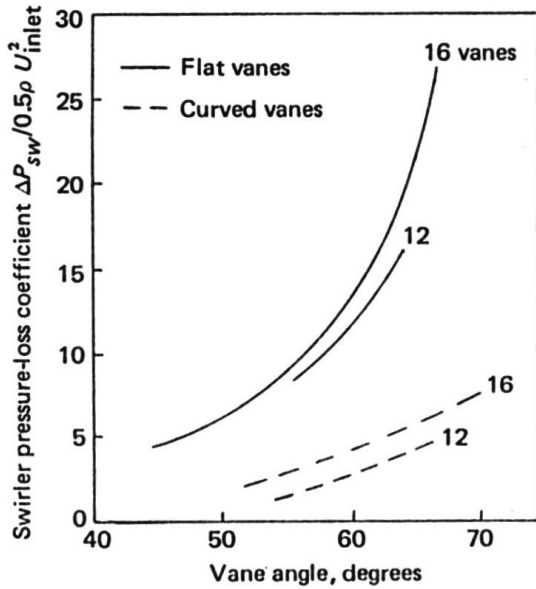
Σχήμα 9.21 Ζώνη ανακυκλοφορίας αέρα – καυσίμου κατάντι στροβιλιστή



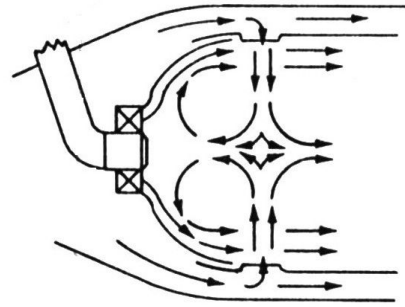
Σχήμα 9.22 Επίδραση του αριθμού στροβιλισμού επι του ποσοστού ανακυκλοφορούσης μάζης



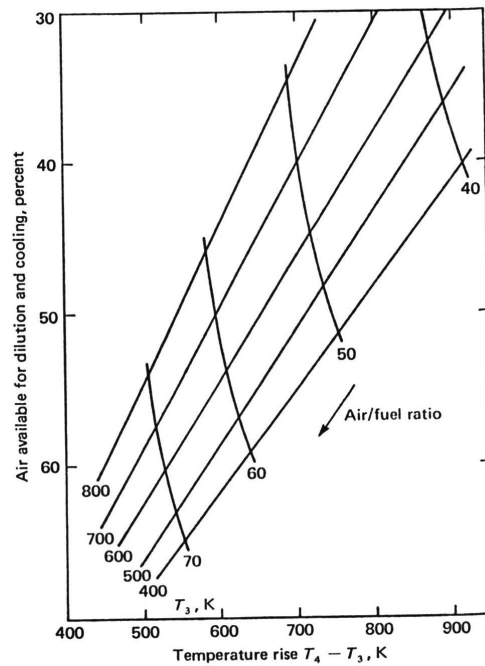
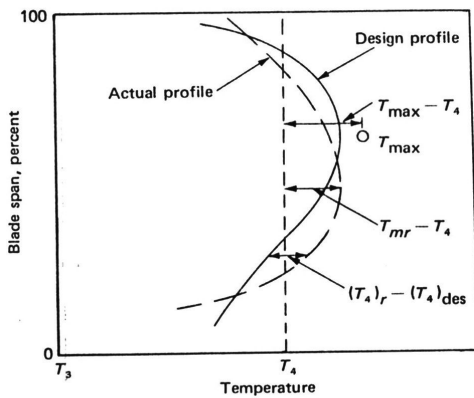
Σχήμα 9.23 Επίδραση της γωνίας των πτερυγίων του στροβιλιστή επι του ποσοστού της ανακυκλοφορούσης μάζης



Σχήμα 9.24 Πτώση της πίεσης δια μέσου του στροβιλιστή συναρτήση της γωνίας των πτερυγίων

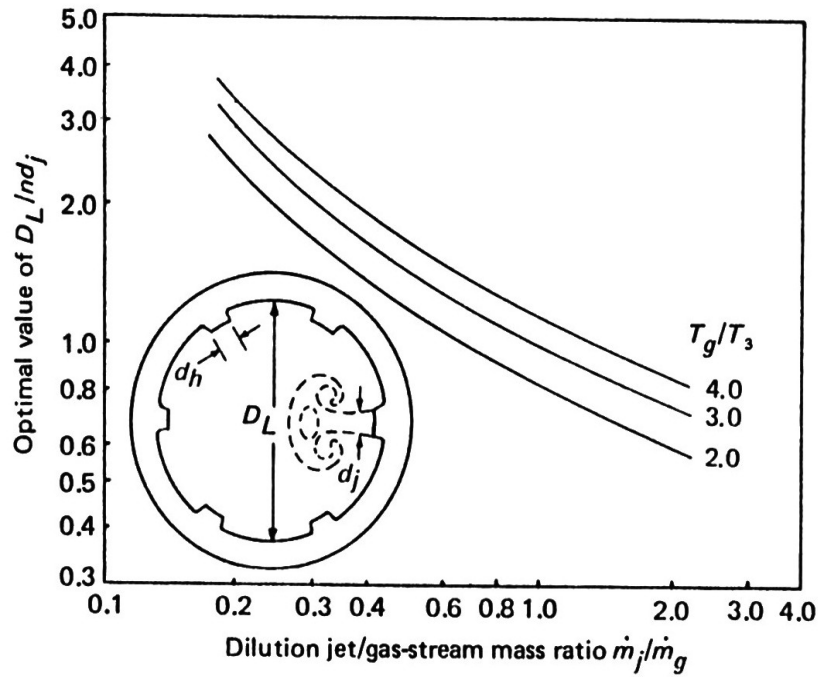


Σχήμα 9.25 Πρωτεύουσα ζώνη με συνδυασμό στροβιλιστή και αντιταγμένων jets

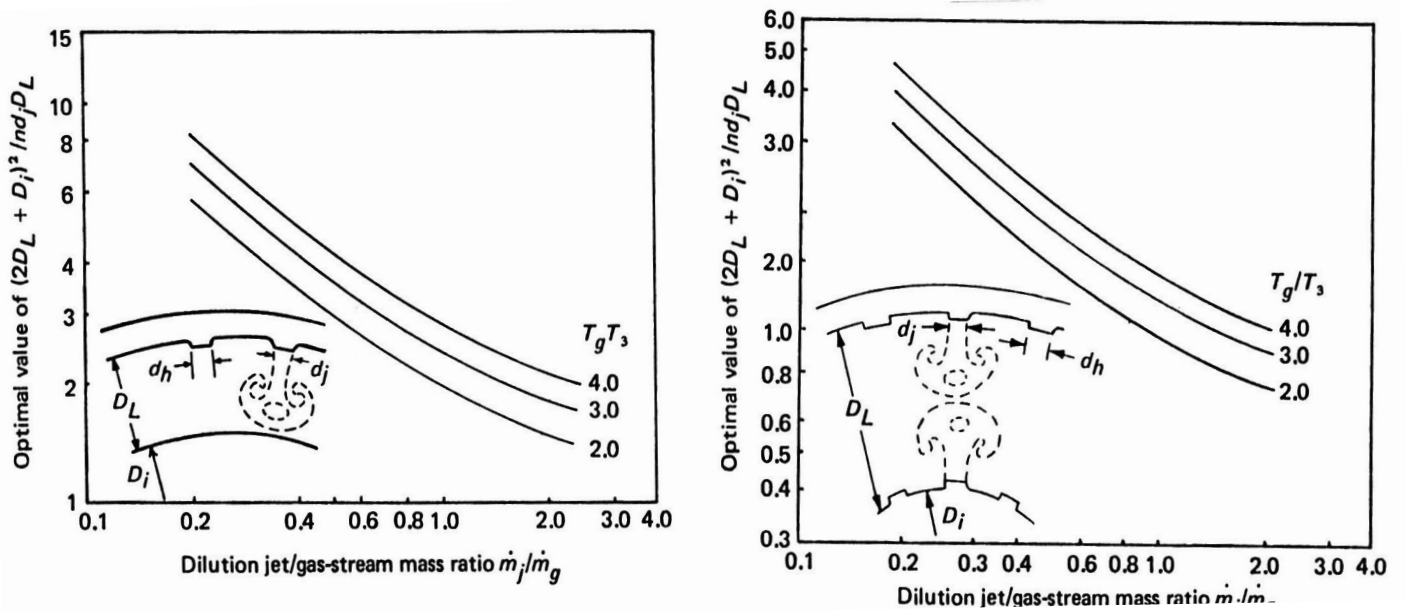


- α) Τυπικά προφίλ θερμοκρασίας στην έξοδο του θαλάμου καύσης
- β) Επίδραση της θερμοκρασιακής αύξησης στον θάλαμο καύσης επί του απαιτούμενου ποσού αερός για ψύξη και αραιώση (cooling και dilution)

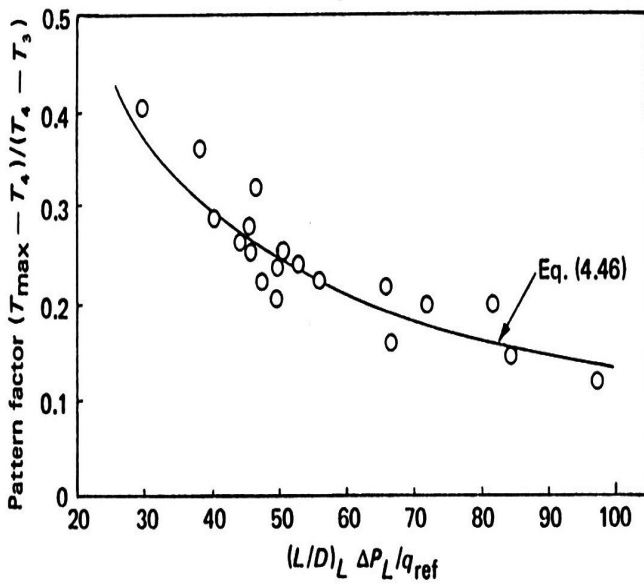
Σχήμα 9.26 α) Τυπικά προφίλ θερμοκρασίας στην έξοδο του θαλάμου καύσης
β) Επίδραση της θερμοκρασιακής αύξησης στον θάλαμο καύσης επί του απαιτούμενου ποσού αερός για ψύξη και αραιώση (cooling and dilution)



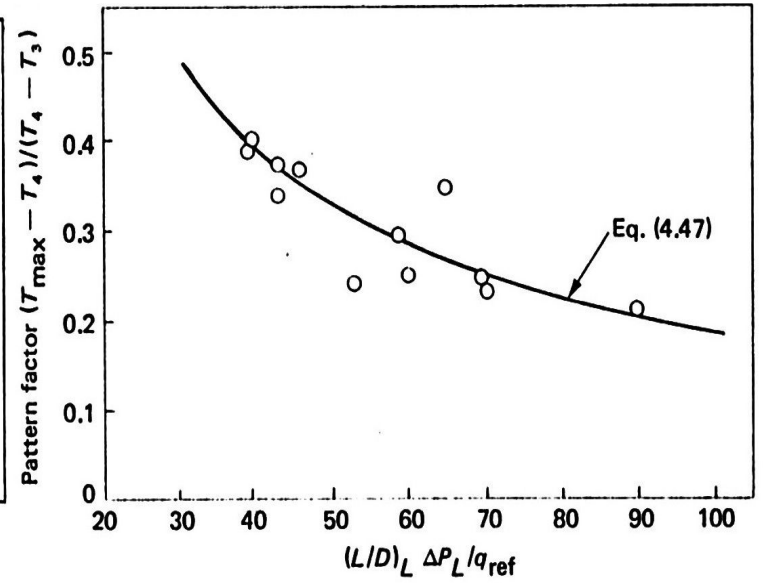
Σχήμα 9.27 Διάγραμμα σχεδιασμού ζώνης αραίωσης σωληνοειδούς θαλάμου καύσης (T_g =θερμοκρασία καυσαερίων στην δευτερεύουσα ζώνη)



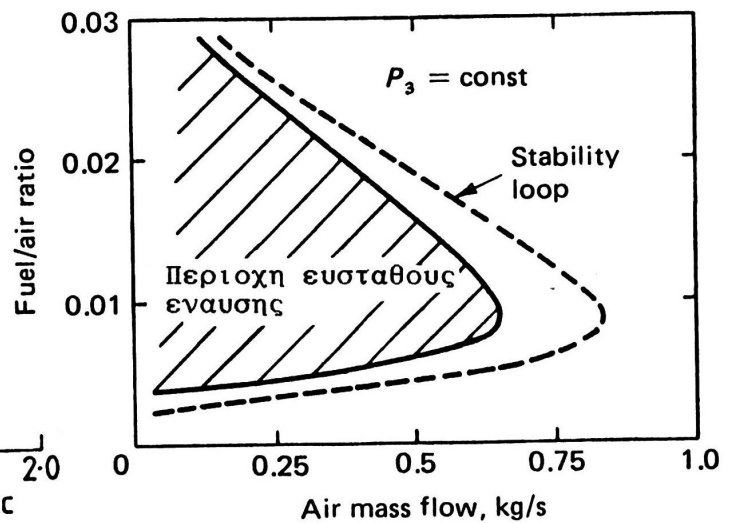
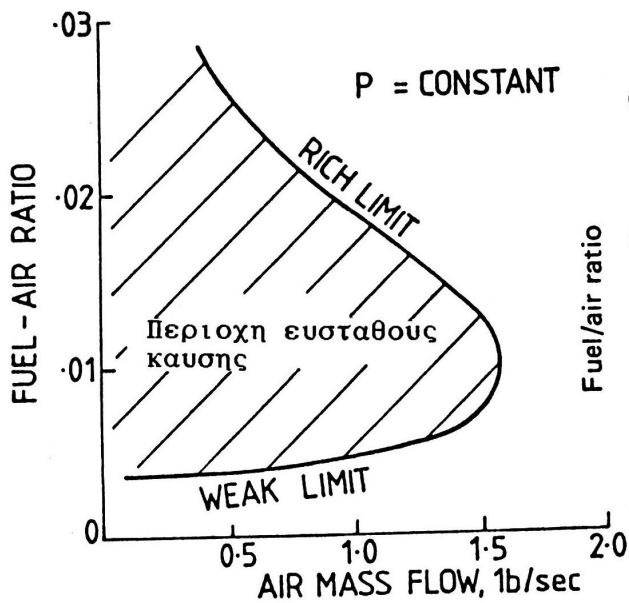
Σχήμα 9.28 Διαγράμματα σχεδιασμού ζώνης αραίωσης δακτυλοειδούς θαλάμου καύσης



Σχήμα 9.29 Διάγραμμα συσχετισμού παράγοντα κατανομής (PF) για σωληνοδακτυλοειδείς θαλάμους καύσης



Σχήμα 9.30 Διάγραμμα συσχετισμού παράγοντα κατανομής (PF) για δακτυλοειδείς θαλάμους καύσης



Σχήμα 9.31 Τυπικά όρια ευσταθούς λειτουργίας και έναυσης θαλάμου καύσης

ΠΙΝΑΚΑΣ 9.3 Αεροπορικά καύσιμα

| Fuel type | United Kingdom DERD | United States |
|--|------------------------|---------------------|
| Gasoline (Avgas) | 2485 | MIL-G-5572E |
| Wide-cut gasoline (Avtag) (to meet strategic needs) | 2486 | JP4 |
| Kerosine (Avtur) | 2494 | ASTM type A-1 (JP8) |
| Kerosine, high flash (Avcat) | 2498 | JP5 |
| Kerosine, thermally stable (Mach 3) | | JP6 |
| Kerosine, thermally stable (Mach 3-4) | | JP7 |
| High-density fuel (Shellodyne blend) | | JP9 |

ΠΙΝΑΚΑΣ 9.4 Ιδιότητες αεροπορικών καυσίμων

| Specification | | Type | | |
|--|-------|----------------------|------------------------|------------------------|
| | | Wide-cut gasoline | Kerosine | High-flash kerosine |
| Designation, approximate equivalent | | | | |
| U.K. military | | Avtag | Avtur | Avcat |
| U.S. military | | JP4 | | JP5 |
| U.S. civil | | Jet B | Jet A; Jet A-1 | |
| Acidity, mg KOH/g | (max) | 0.015 | 0.015 | 0.015 |
| Aromatics, % by volume | (max) | 25.0 | 22.0 | 25.0 |
| Olefins, % by volume | (max) | 5.0 | 5.0 | 5.0 |
| Sulfur, % by mass | (max) | 0.30 | 0.30 | 0.30 |
| Distillation: | | | | |
| 10%, K | (max) | | 478 | 478 |
| End point, K | (max) | 543 | 573 | 573 |
| Reid vapor pressure at 311 K, kPa | (min) | 14 | | |
| | (max) | 21 | | |
| Flash point, K | (min) | | 311 | 333 |
| Density at 288 K, kg/liter | (min) | 0.751 | 0.775 | 0.788 |
| | (max) | 0.802 | 0.830 | 0.845 |
| Freezing point, K | (max) | 215 | 226 | 227 |
| Viscosity at 253 K, m ² /s | (max) | | 8.0 × 10 ⁻⁶ | 8.8 × 10 ⁻⁶ |
| Specific energy (net), MJ/kg | (min) | 42.8 | 42.8 | 42.6 |
| Smoke point, mm | (min) | 21 | 20 | 20 |
| Naphthalenes, % by volume | (max) | | 3.0 | |
| Corrosion, copper, classn | (max) | 1 | 1 | 1 |
| Thermal stability, mm Hg | (max) | 25.0 | 25.0 | 25.0 |
| Existent gum, mg/100 ml | (max) | 7 | 7 | 7 |
| Water reaction: | | | | |
| Interface rating | (max) | 1 ^b | 1 ^b | 1 ^b |
| Separation | (max) | 2 | 2 | 2 |
| Volume change, ml | (max) | | | |
| WSIM | (min) | 70 ^a | 70 ^a | 70 ^c |
| | (min) | 85 ^b | 85 ^b | 85 ^d |
| Electrical conductivity, ^a pS/m | (min) | 50 | 50 | |
| | (max) | 450 | 450 | |

^aWith static-dissipator additive.

^bWithout static-dissipator additive.

^cWith corrosion inhibitor-lubricity improving additive.

^dWithout corrosion inhibitor-lubricity improving additive.