

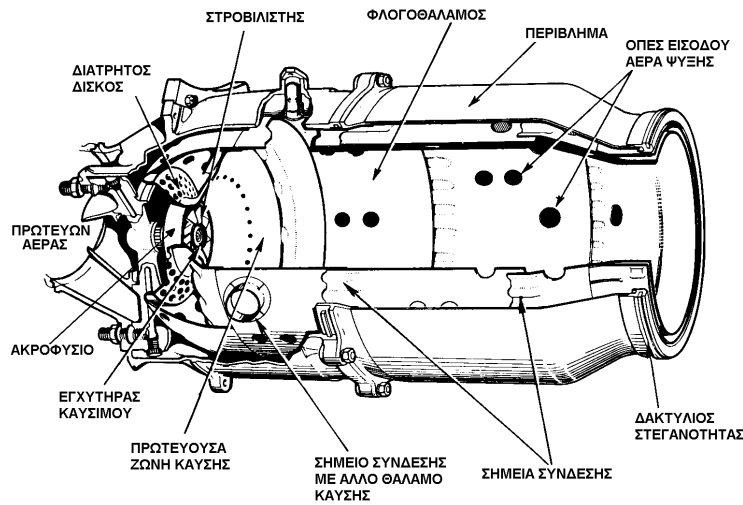
2.6 Θάλαμοι καύσης

Η βέλτιστη απόδοση κατά τη διαδικασία της καύσης του μείγματος αέρα – καυσίμου σε έναν αεριοστρόβιλο είναι επιτακτική. Και τούτο διότι από αυτήν καθορίζονται η συνολική απόδοση του κινητήρα, το λειτουργικό κόστος του αεροσκάφους, αλλά και η επιβάρυνση που θα επιφέρουν στο περιβάλλον οι εκπεμπόμενοι ρύποι από την κάθε πτήση του.

Σήμερα, η ανάπτυξη των **θαλάμων καύσης (combustion chambers)** βασίζεται στην εμπειρία που αποκτήθηκε από τη χρήση τους σε αεροκινητήρες που λειτούργησαν με περισσότερη ή λιγότερη επιτυχία στο παρελθόν. Είναι σύνηθες, όσο και επιβεβλημένο, να προτείνονται διαφορετικές λύσεις για ένα δεδομένο σύστημα καύσης, όμως κάποιες βασικές σχεδιαστικές αρχές απαντώνται σε κάθε θάλαμο καύσης. Η διαρκώς αυξανόμενη χρήση των αεροσκαφών, που σημειώνεται με την πάροδο των χρόνων, επιφέρει ταυτόχρονα σημαντική αύξηση στη μόλυνση του περιβάλλοντος. Το γεγονός αυτό εντείνει τις προσπάθειες σχεδιασμού βελτιωμένων θαλάμων καύσης με μειωμένες εκπομπές καυσαερίων.

2.6.1 Η διαδικασία της καύσης

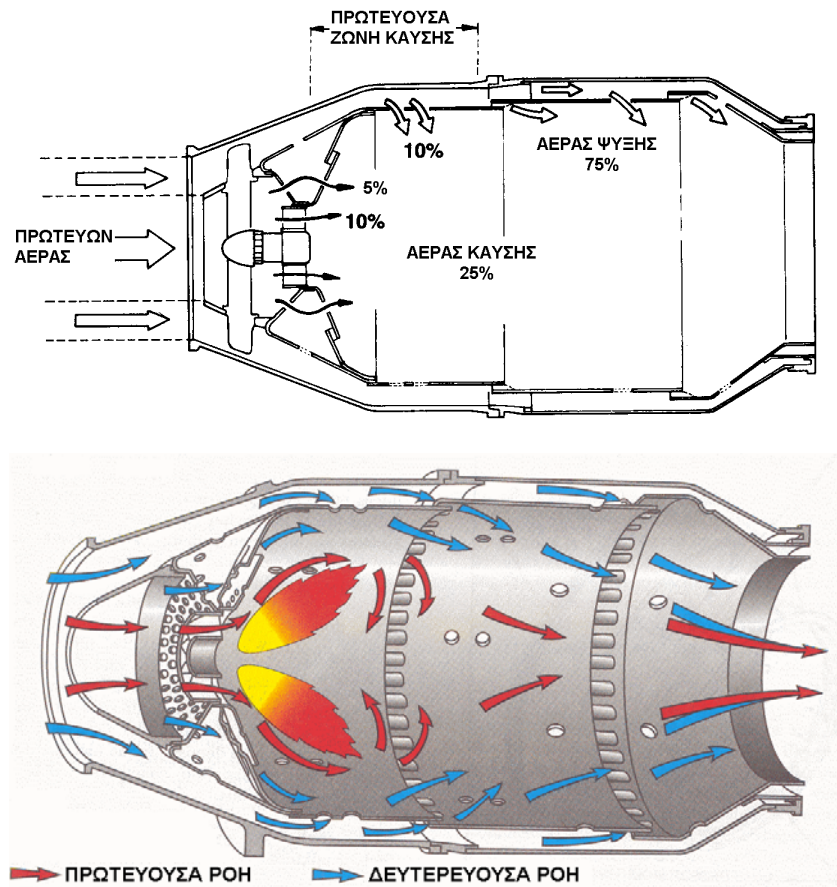
Ο βασικός σκοπός του θαλάμου καύσης είναι να επιτύχει την καύση συγκεκριμένης ποσότητας μείγματος αέρα (ο οποίος εξέρχεται από το συμπιεστή) και καυσίμου. Τα παραγόμενα καυσαέρια αποδίδουν τη θερμική ενέργειά τους στο στρόβιλο, που βρίσκεται μετά το θάλαμο καύσης. Η διαδικασία της καύσης πραγματοποιείται στην περιορισμένη έκταση του θαλάμου καύσης και πρέπει να επιτυγχάνεται με την ελάχιστη δυνατή απώλεια πίεσης (ισοβαρής καύση). Παίρνοντας για παράδειγμα το θάλαμο καύσης που φαίνεται στο Σχήμα 2.64 (ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στους αρχικούς αεριοστρόβιλους), θα εξετάσουμε με λεπτομέρεια τον τρόπο λειτουργίας ενός θαλάμου καύσης σε έναν αεριοστρόβιλο κινητήρα. Βασικά, ο θάλαμος καύσης αποτελείται από το περίβλημα, το στροβιλιστή, τον εγχυτήρα καυσίμου και το φλογοσωλήνα όπου πραγματοποιείται η καύση.



Σχήμα 2.64 Θάλαμος καύσης

Το συμπιεσμένο ρεύμα αέρα εξέρχεται από το συμπιεστή με ταχύτητα της τάξης των 150 m/sec. Η ταχύτητα αυτή είναι απαγορευτική για τη διαδικασία της καύσης και πρέπει να μειωθεί σημαντικά. Η μείωση αυτή επιτυγχάνεται στην περιοχή του διαχύτη που βρίσκεται μεταξύ του συμπιεστή και θαλάμου καύσης, όπως είδαμε στην παράγραφο 2.5. Η διατομή του δακτυλίου ροής αυξάνει προοδευτικά και με τον τρόπο αυτόν μειώνεται η ταχύτητα του ρεύματος αέρα ενώ αυξάνεται η στατική του πίεση. Μετά τη διόδο από το διαχύτη η ταχύτητα του ρεύματος αέρα είναι της τάξης των 25 m/sec, τιμή επίσης μεγάλη για την κανονική καύση. Η περαιτέρω μείωσή της σε τιμές της τάξης των 5 m/sec επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός **διάτρητου δίσκου (perforated disk)**, ο οποίος αποτελεί εξάρτημα του θαλάμου καύσης και βρίσκεται περιφερειακά από τον **εγχυτήρα καυσίμου (fuel nozzle)**.

Ένας ακόμη σκοπός του θαλάμου καύσης είναι η παροχή του σωστής αναλογίας όσον αφορά το μείγμα αέρα – καυσίμου. Ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα, ο λόγος αέρα – καυσίμου παίρνει τιμές μεταξύ 45:1 και 80:1. Το χρησιμοποιούμενο καύσιμο, η κηροζίνη, καίγεται αποδοτικά όταν ο παραπάνω λόγος έχει τιμή 15:1, περίπου. Αυτό σημαίνει ότι μόνο ένα μέρος του εισερχόμενου στο θάλαμο καύσης αέρα απαιτείται για την κανονική καύση και, πρακτικά, μόνον αυτό θα αναμειχθεί με το καύσιμο. Η ανάμειξη αυτή πραγματοποιείται στο μπροστινό τμήμα του θαλάμου καύσης. Στο Σχήμα 2.65 φαίνεται η ροή του αέρα μέσα στο θάλαμο καύσης που χρησιμοποιούμε ως παράδειγμα.

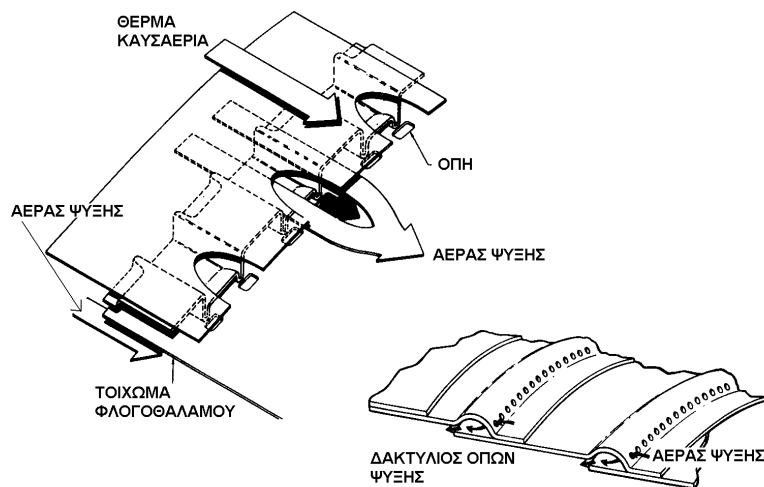


Σχήμα 2.65 Ροές στο θάλαμο καύσης

Αρχικά, ένα ποσοστό (περίπου 25%) του εισερχόμενου αέρα στο θάλαμο καύσης, η **πρωτεύουσα ροή**, διέρχεται από αγωγό με κατάλληλη διαμορφωμένη διατομή. Η υπόλοιπη ποσότητα του εισερχόμενου αέρα, η **δευτερεύουσα ροή**, η οποία είναι και η μεγαλύτερη (ποσοστό περίπου 75%), εισέρχεται στο δακτυλιοειδή χώρο που δημιουργείται μεταξύ της περιφέρειας του φλογοσωλήνα και του περιβλήματος του θαλάμου καύσης. Στην περιοχή του αγωγού εισόδου της πρωτεύουσας ροής υπάρχουν τα σταθερά πτερύγια (swirl vanes) του στροβιλιστή. Αυτά ανακόπτουν την αξονική ταχύτητα του εισερχόμενου από αυτά αέρα (10% περίπου), ενισχύοντας την περιφερειακή ταχύτητά του. Ένα ποσοστό 5%, περίπου, αέρα διέρχεται από το διάτρητο δίσκο (που αναφέρθηκε παραπάνω) και η ταχύτητά του μειώνεται στα επιθυμητά επίπεδα. Τελικά, το ρεύμα αέρα που εισέρχεται στην **πρωτεύουσα ζώνη καύσης (primary combustion zone)**, έχει αποκτήσει στροβιλισμό, απαραίτητο για την ομαλή κυκλοφορία του μέσα στο φλογοσωλήνα αλλά και για την καλή ανάμειξη του καύσιμου μείγματος. Στην περιοχή αυτή, η οποία

αποτελεί το ένα τρίτο του συνολικού μήκους του φλογοθαλάμου, πραγματοποιείται η έναυση και η καύση του καύσιμου μείγματος.

Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται εκεί μπορούν να φτάσουν τους 2.000°C, τιμή πολύ μεγαλύτερη από την αντοχή των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των φλογοθαλάμων. Για το λόγο αυτό, στην περιοχή της πρωτεύουσας ζώνης καύσης υπάρχουν δίοδοι εισαγωγής αέρα για την ψύξη των τοιχωμάτων του φλογοθαλάμου (Σχήμα 2.66). Ο αέρας αυτός προέρχεται από την ποσότητα του διερχόμενου αέρα από τη περιφέρεια του φλογοσωλήνα, σε ποσοστό 10%.



Σχήμα 2.66 Οπές εισαγωγής αέρα στην πρωτεύουσα ζώνη καύσης

Η υπόλοιπη ποσότητα του ρεύματος αέρα αυτού εισέρχεται στο φλογοθάλαμο μέσω ειδικών οπών του, κατά μήκος της περιοχής αμέσως μετά την κύρια ζώνη καύσης. Ένα μέρος της ποσότητας του αέρα αυτού χρησιμοποιείται για τη μείωση της θερμοκρασίας των καυσαερίων – ώστε αυτά να μην καταστρέψουν το στρόβιλο – και ένα άλλο για την ψύξη των τοιχωμάτων του φλογοθαλάμου. Επίσης, η ποσότητα του αέρα αυτή είναι δυνατό να αναμειχθεί με ποσότητα άκαυστου καυσίμου και να προκαλέσει την καύση της. Τονίζεται ότι η διεργασία της καύσης πρέπει να έχει τελειώσει πριν την εισαγωγή της υπόλοιπης ποσότητας αέρα στο φλογοθάλαμο. Ο λόγος είναι ότι το ρεύμα αέρα αυτό, καθώς είναι σημαντικά ψυχρότερο από τα παραγόμενα καυσαέρια, θα επιφέρει μείωση στη θερμοκρασία τους. Συνολικά, από τον εισερχόμενο αέρα στο θάλαμο καύσης, ένα ποσοστό 20% έως 30% συμμετέχει στη διεργασία της καύσης ενώ το υπόλοιπο 70% έως 80% χρησιμοποιείται για λόγους ψύξης.

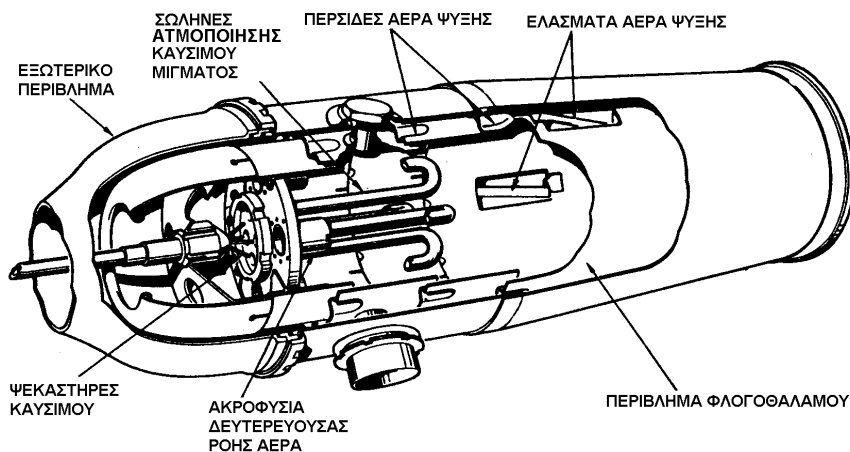
Ο απαραίτητος σπινθήρας για την έναυση παρέχεται **μία φορά** από ειδικό σπινθηριστή ο οποίος έχει ικανότητα παραγωγής έως και 100 σπινθήρων ανά

λεπτό. Στη συνέχεια, η καύση διατηρείται λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν στην πρωτεύουσα ζώνη της καύσης.

Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του θαλάμου καύσης πρέπει να παρουσιάζουν καλή αντοχή στις **θερμικές καταπονήσεις (thermal stresses)**, στη διάβρωση που επιφέρουν τα προϊόντα της καύσης και στους κραδασμούς της λειτουργίας. Συνήθως, για την κατασκευή του φλογοθαλάμου χρησιμοποιούνται κράμματα χάλυβα με νικέλιο και χρώμιο ενώ το περίβλημα κατασκευάζεται από ελαφρύ χάλυβα.

2.6.2 Παροχή καυσίμου

Στο σημείο αυτό θα αναφερθούμε στους δύο διαφορετικούς τρόπους με τους οποίους παρέχεται το καύσιμο, το οποίο θα αναμιχθεί με την κατάλληλη ποσότητα αέρα για την πραγματοποίηση της καύσης. Ο πρώτος τρόπος, και ο πιο συνηθισμένος, στηρίζεται στην έγχυση σταγονιδίων καυσίμου στο ρεύμα αέρα που διέρχεται από το διάτρητο δίσκο στην πρωτεύουσα ζώνη καύσης. Όσο μικρότερη είναι η διατομή των σταγονιδίων του καυσίμου (σπρέι) τόσο πιο γρήγορη και αποδοτική είναι η διεργασία της καύσης. Ο δεύτερος τρόπος στηρίζεται στην ατμοποίηση της ποσότητας καυσίμου πριν την εισαγωγή της στην πρωτεύουσα ζώνη καύσης. Στην περίπτωση αυτήν, ο θάλαμος καύσης δε διαθέτει σταθερά πτερύγια στροβιλισμού και διάτρητο έλασμα. Ένας τέτοιος θάλαμος καύσης φαίνεται στο Σχήμα 2.67.



Σχήμα 2.67 Το καύσιμο εξαερώνεται πριν την εισαγωγή του στην πρωτεύουσα ζώνη καύσης

Η ροή του αέρα που προορίζεται για την καύση (πρωτεύουσα ροή) διέρχεται μέσω οπών σε μεταλλικό διάφραγμα. Σε αυτό στηρίζεται ο σωλήνας παροχής καυσίμου. Το καύσιμο εγχύεται σε σωλήνες μικρής διατομής, οι οποίοι βρίσκονται μέσα στο φλογοθάλαμο, και το ένα άκρο τους σχηματίζει γωνία

180° με τη ροή του αέρα. Ο τελευταίος, κατά τη διαδρομή του σε αυτούς τους σωλήνες, θερμαίνεται και ατμοποιείται πριν εισέλθει στο φλογοθάλαμο. Ο αέρας της πρωτεύουσας ροής διέρχεται από τους ίδιους σωλήνες με το καύσιμο που ατμοποιείται και με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται η ανάμειξή τους. Η υπόλοιπη ποσότητα αέρα (δευτερεύουσα ροή) εισέρχεται στο φλογοσωλήνα για την επίτευξη ψύξης, όπως ακριβώς περιγράψαμε παραπάνω.

2.6.3 Λειτουργικά χαρακτηριστικά του θαλάμου καύσης

Οι απαιτήσεις για τη βέλτιστη διεργασία καύσης ισχύουν αναφορικά με συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα και του αεροσκάφους, όπως είναι η ταχύτητα πτήσης, η πτήση σε μεγάλο ύψος, η επιτάχυνση κατά την απογείωση, η δυνατότητα επανεκκίνησης κ.α. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του θαλάμου καύσης καθορίζονται από συγκεκριμένες παραμέτρους, τις οποίες θα εξετάσουμε στη συνέχεια.

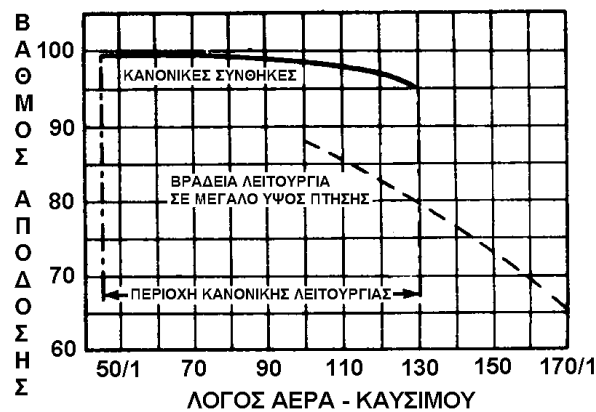
2.6.3.1 Απόδοση καύσης

Γενικά, το εγχυόμενο καύσιμο καίγεται ατελώς (ατελής καύση) με αποτέλεσμα την έκλυση μικρότερης ποσότητας θερμότητας από αυτήν που μπορεί να παραχθεί θεωρητικά. Ο λόγος εμφάνισης της ατελούς καύσης είναι η δυσκολία που παρουσιάζεται στην παροχή της σωστής ποσότητας αέρα καύσης στις διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα.

Ο βαθμός απόδοσης της καύσης καθορίζεται από το ποσό της εκλυόμενης θερμότητας σε σχέση με το ποσό της θερμότητας που είναι ικανό το καύσιμο να αποδώσει θεωρητικά. Οι σύγχρονοι θάλαμοι καύσης παρουσιάζουν βαθμούς απόδοσης από 90% έως 98%.

Μία άλλη, σημαντική παράμετρος για την απόδοση του θαλάμου καύσης είναι η απώλεια πίεσης κατά τη διάρκεια της διεργασίας της καύσης. Όπως είδαμε, ο κύκλος λειτουργίας των αεριοστροβίλων κινητήρων παρουσιάζει σταθερή πίεση κατά τη διάρκεια της καύσης. Πρακτικά, όμως, η απώλεια της πίεσης είναι αναπόφευκτη λόγω των τριβών και του στροβιλισμού που πραγματοποιείται στην πρωτεύουσα ροή αέρα. Συνήθως, οι απώλειες πίεσης είναι της τάξης 2% έως 7%. Οι προσπάθειες που γίνονται για τη μείωσή τους εστιάζονται στο σχεδιασμό των σταθερών πτερυγίων στροβιλισμού και του διάτρητου ελάσματος.

Τέλος, στο Σχήμα 2.68 φαίνεται η απόδοση της διεργασίας της καύσης σε σχέση με το λόγο αέρα – καυσίμου ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα.



Σχήμα 2.68 Απόδοση του θαλάμου καύσης ως προς το λόγο αέρα - καυσίμου

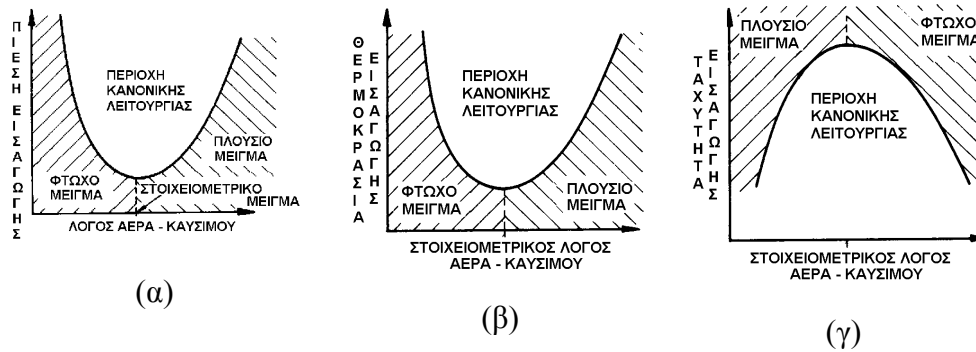
2.6.3.2 Ευστάθεια καύσης

Στις διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας ενός αεριοστροβίλου κινητήρα μεγάλη σημασία έχει η διατήρηση της φλόγας, ώστε να επιτυγχάνεται η κανονική διεργασία της καύσης. Οι ακόλουθες παράμετροι αλλάζουν στην είσοδο του θαλάμου καύσης και επηρεάζουν τη διεργασία της καύσης:

- Η στατική πίεση,
- Η στατική θερμοκρασία, και
- Η ταχύτητα του εισερχόμενου ρεύματος αέρα.

Η ευσταθής περιοχή της διεργασίας καύσης εξαρτάται από τις τιμές του λόγου αέρα – καυσίμου. Η περιοχή αυτή μικραίνει κατά τη διάρκεια πτήσεων σε μεγάλα ύψη, με μειωμένη ατμοσφαιρική πίεση και, συνακόλουθα, με μειωμένη πίεση του εισερχόμενου ρεύματος αέρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.69(α). Οι στροβιλοανεμιστήρες με μεγάλο λόγο παράκαμψης είναι λιγότερο ευπαθείς σε αυτήν την περίπτωση. Στην περίπτωση καύσης με στοιχειομετρικό λόγο αέρα – καυσίμου, η ευσταθής καύση επιτυγχάνεται ακόμη και σε αρκετά χαμηλές πιέσεις εισερχόμενου αέρα.

Η ευσταθής περιοχή λειτουργίας περιορίζεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα του εισερχόμενου ρεύματος αέρα (Σχήμα 2.69β). Αν αυτή υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο, η φλόγα θα σβήσει (flameout). Επίσης, στην περίπτωση που η θερμοκρασία του εισερχόμενου ρεύματος αέρα είναι μικρότερη από ένα όριο, θα επέλθει απώλεια της φλόγας (Σχήμα 2.69γ).



Σχήμα 2.69 Η ευσταθής περιοχή της διεργασίας καύσης

2.6.3.3 Κατανομή θερμοκρασίας

Η βέλτιστη απόδοση του κινητήρα επιτυγχάνεται όταν η θερμοκρασία των καυσαερίων που παράγονται στο θάλαμο καύσης λαμβάνει τις μεγαλύτερες δυνατές τιμές. Βέβαια, ο περιορισμός της ανόδου της θερμοκρασίας λόγω της αντοχής των υλικών κατασκευής των περυγίων των στροβίλων είναι πάντα υπαρκτός. Παράλληλα, όμως, περιορίζεται και η αποδοτικότητα του κινητήρα. Οι προσπάθειες που καταβάλλονται για την επίτευξη καλύτερων κατανομών θερμοκρασιών των καυσαερίων έχουν να κάνουν με την καλύτερη ανάμειξη του καύσιμου μείγματος. Από την άλλη πλευρά, οι προσπάθειες αυτές μπορεί να επιφέρουν αύξηση των απωλειών πίεσης στο θάλαμο καύσης.

2.6.3.4 Ανάφλεξη

Οι αυξημένες τιμές πίεσης και θερμοκρασίας με, παράλληλα, χαμηλή τιμή της ταχύτητας του εισερχόμενου ρεύματος αέρα στο θάλαμο καύσης, ευνοούν την ανάφλεξη του καύσιμου μείγματος. Στην περίπτωση όπου το μείγμα είναι πολύ φτωχό ή πολύ πλούσιο, η ανάφλεξη επηρεάζεται σημαντικά.

2.6.3.5 Επικαθήσεις

Κατά τη λειτουργία με πλούσιο μείγμα αέρα – καυσίμου, υπάρχει αυξημένη πιθανότητα για την δημιουργία επικαθήσεων άνθρακα στην πρωτεύουσα ζώνη καύσης, λόγω ατελούς καύσης. Στην περίπτωση αυτή, θα εμφανιστεί καπνός στην εξαγωγή του κινητήρα. Η επίδραση, ωστόσο, στο βαθμό απόδοσης της καύσης είναι πολύ μικρή. Να σημειώσουμε ότι η αλλαγή στην αναλογία του μείγματος αέρα – καυσίμου μπορεί να επιφέρει επικαθήσεις άνθρακα σε διαφορετικό σημείο του φλογοθαλάμου.

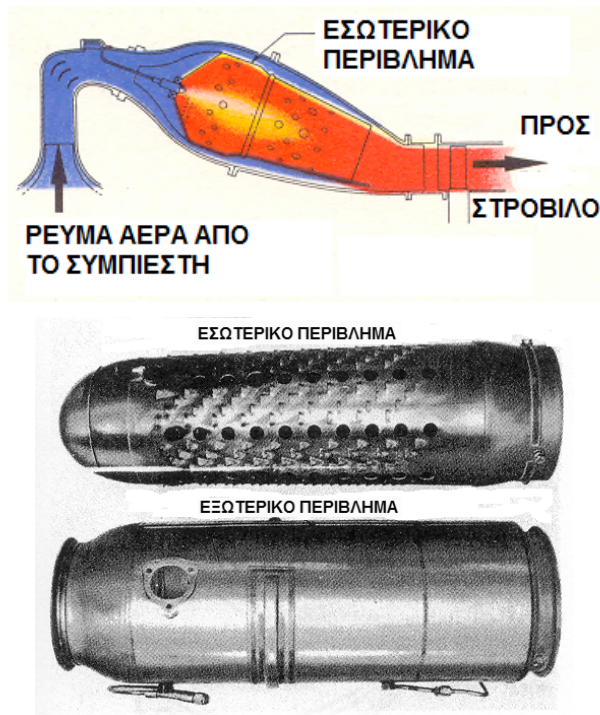
2.6.4 Τύποι θαλάμων καύσης

Η κατηγοριοποίηση των θαλάμων καύσης γίνεται σύμφωνα με τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά. Διακρίνουμε τρεις βασικούς τύπους:

- Τον πολλαπλό,
- Το δακτυλιοειδή, και το
- Σώληνο-δακτυλιοειδή.

2.6.4.1 Πολλαπλός θάλαμος καύσης (multiple combustion chamber)

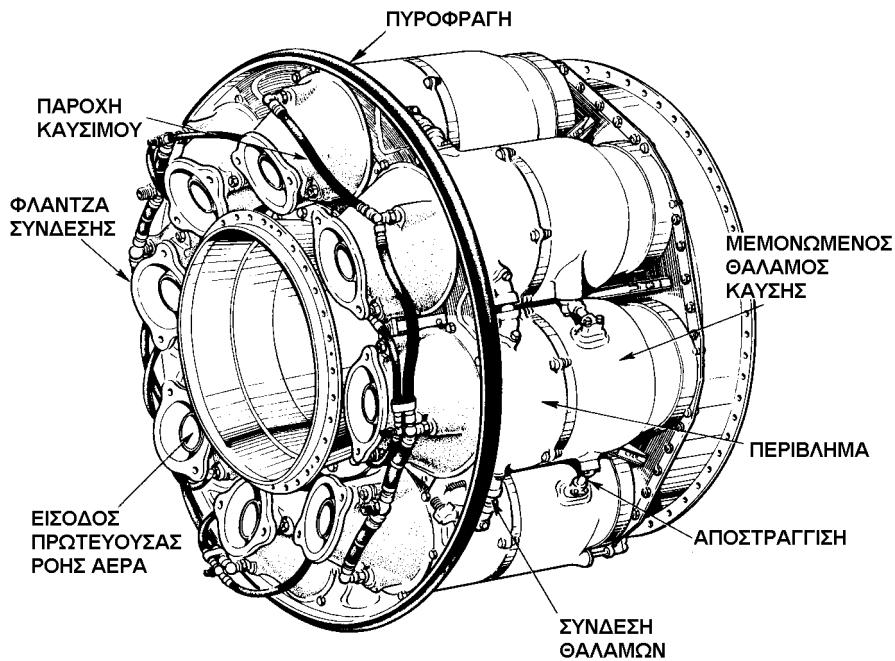
Ο τύπος θαλάμου καύσης αυτός χρησιμοποιήθηκε στους αρχικούς αεριοθούμενους κινητήρες. Ουσιαστικά, αποτελείται από ένα συγκεκριμένο αριθμό ξεχωριστών θαλάμων καύσης σωληνοειδούς τύπου¹ (can type combustion chamber), όπως αυτός που φαίνεται στο Σχήμα 2.70.



Σχήμα 2.70 Θάλαμος καύσης τύπου σωλήνα

Οι θάλαμοι αυτοί είναι τοποθετημένοι περιφερειακά ως προς τον άξονα του κινητήρα, σε παράλληλη διάταξη (Σχήμα 2.71). Η συνεργασία τους με φυγοκεντρικούς συμπιεστές είναι ιδανική. Κάθε ένας από τους θαλάμους καύσης συνδέεται με ξεχωριστό αγωγό που του παρέχει ροή συμπιεσμένου αέρα, μετά τη διέλευσή του από το διαχύτη.

¹ Ο μεμονωμένος σωληνοειδής θάλαμος καύσης χρησιμοποιείται, συνήθως, σε APU.



Σχήμα 2.71 Θάλαμος καύσης πολλαπλού τύπου

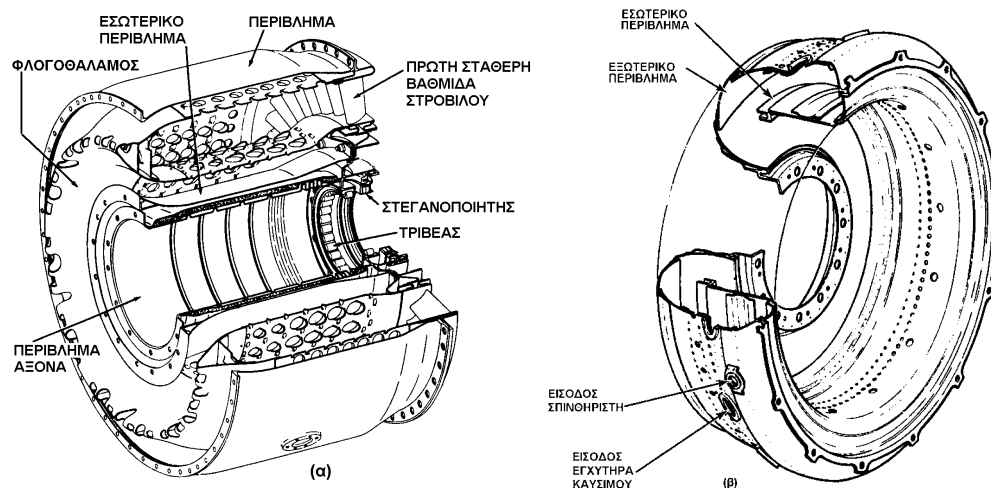
Οι θάλαμοι είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με ειδικούς αγωγούς διάδοσης της φλόγας (**flame tubes**). Η αρχική ανάφλεξη πραγματοποιείται σε δύο μόνο θαλάμους, οι οποίοι είναι εφοδιασμένοι με ένα σπινθηριστή ο καθένας. Η φλόγα μεταφέρεται στους υπόλοιπους θαλάμους μέσω των αγωγών διάδοσης και πραγματοποιείται ανάφλεξη του μείγματος αέρα – καυσίμου σε κάθε έναν από αυτούς. Οι αγωγοί διάδοσης επιτυγχάνουν, επίσης, εξισορρόπηση της πίεσης μέσα στους θαλάμους καύσης και με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η άνιση θερμική καταπόνηση των πτερυγίων του στροβίλου. Ένας τυπικός πολλαπλός θάλαμος καύσης αποτελείται από 8 ή 10 ξεχωριστούς θαλάμους.

Το μεγάλο πλεονέκτημα του πολλαπλού θαλάμου καύσης είναι ότι οι μεγάλες καμπυλότητες που φέρει, εξασφαλίζουν μεγάλη αντοχή σε **στρέβλωση (warping)** λόγω θερμοκρασιών. Επίσης, η δυνατότητα της αποσυναρμολόγησης κάθε μεμονωμένου θαλάμου ξεχωριστά παρέχει μεγάλη ευελιξία όσον αφορά το πρόγραμμα συντήρησης και επισκευής του κινητήρα. Από την άλλη πλευρά, το σχήμα του πολλαπλού θαλάμου καύσης (μικρή διάμετρος – μεγάλο μήκος) δεν είναι εργονομικό καθώς δεν εκμεταλλεύεται ικανοποιητικά το διαθέσιμο χώρο που υπάρχει στον κινητήρα ενώ, παράλληλα, προσθέτει βάρος σε αυτόν.

2.6.4.2 Δακτυλιοειδής θάλαμος καύσης (annular combustion chamber)

Στη σημερινή εποχή ο δακτυλιοειδής θάλαμος καύσης χρησιμοποιείται σε πληθώρα αεροσκαφών, μικρών και μεγάλων. Αυτό συμβαίνει διότι αποτελεί τον περισσότερο αποδοτικό θάλαμο καύσης όσον αφορά τη θερμική απόδοση, το βάρος και το μέγεθος.

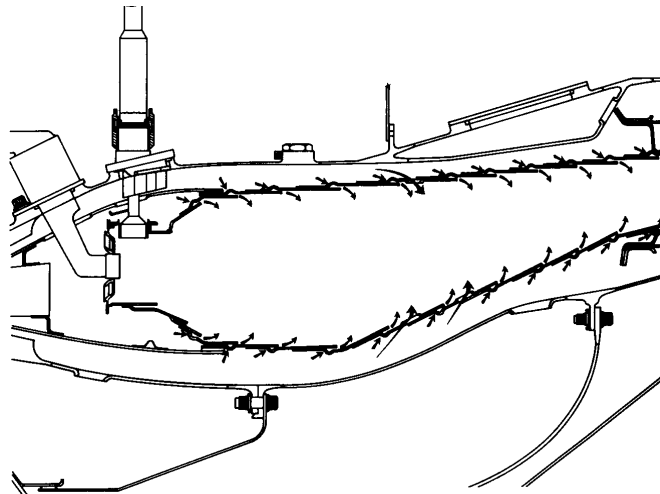
Ο δακτυλιοειδής θάλαμος καύσης αποτελείται από ένα δακτυλιοειδή φλογοθάλαμο που σχηματίζεται από ένα εξωτερικό (outer liner) και ένα εσωτερικό κυλινδρικό περίβλημα ή δακτύλιο (inner liner), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.72 (α). Ο θάλαμος είναι ανοικτός στο μπροστινό και το οπίσθιο τμήμα του προς το διαχύτη και το στρόβιλο, αντίστοιχα.



Σχήμα 2.72 (α) Δακτυλιοειδής θάλαμος καύσης, (β) δακτυλιοειδής θάλαμος καύσης αντίστροφης ροής

Η πρωτεύουσα και η δευτερεύουσα ροή αέρα πραγματοποιούνται σχεδόν με όμοιο τρόπο με αυτόν που εξετάσαμε στην παράγραφο 1.6.1, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.73. Στο Σχήμα 2.72 (β) φαίνεται ο δακτυλιοειδής θάλαμος καύσης **αντίστροφης ροής (reverse flow annular combustion chamber)**.

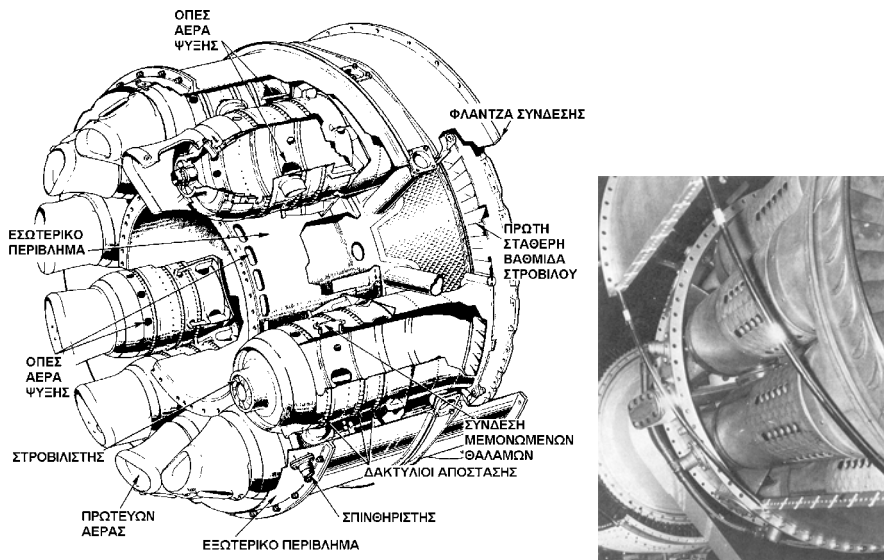
Το κυριότερο πλεονέκτημα του δακτυλιοειδούς θαλάμου καύσης είναι ότι εκμεταλλεύεται πολύ αποδοτικά το χώρο στον οποίο τοποθετείται και επιτυγχάνει την καλή ανάμιξη του καύσιμου μείγματος. Το μήκος και η διάμετρος του δακτυλιοειδούς θαλάμου είναι αρκετά μικρότερα από αυτά των άλλων τύπων θαλάμων καύσης για την ίδια παραγόμενη ισχύ. Η απουσία αγωγών διάδοσης της φλόγας εξασφαλίζει καλή απόδοση καύσης. Επίσης, επιτυγχάνεται ένας βέλτιστος λόγος εσωτερικής επιφάνειας φλογοθαλάμου προς τον συνολικό όγκο οπότε εξασφαλίζεται μέγιστη ψύξη κατά τη διάρκεια της καύσης. Ένα ακόμη πλεονέκτημα θεωρείται η απλή κατασκευή του.



Σχήμα 2.73 Ροή αέρα στο δακτυλιοειδή θάλαμο καύσης.

Ως μειονέκτημα του δακτυλιοειδούς θαλάμου καύσης θεωρείται η ανάγκη αποσυναρμολόγησης πολλών τμημάτων του κινητήρα στην περίπτωση επισκευής ή επιθεώρησης. Λόγω της γεωμετρίας του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβλήματος του φλογοθαλάμου, αυτά είναι αρκετά ευάλωτα σε στρέβλωση και θερμική καταπόνηση.

2.6.4.3 Σώλινο-δακτυλιοειδής θάλαμος καύσης (can-annular combustion chamber)

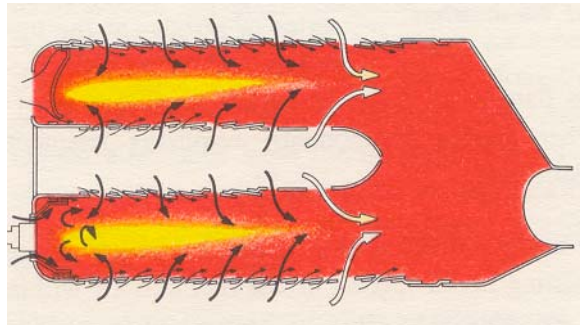


Σχήμα 2.74 Σωλινο-δακτυλιοειδής θάλαμος καύσης

Ο τύπος αυτός θαλάμου καύσης αποτελεί ένα συνδυασμό μεταξύ του πολλαπλού και του δακτυλιοειδούς θαλάμου καύσης. Χρησιμοποιήθηκε κατά κόρον στους αεριοστρόβιλους που αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 1960. Αποτελείται από έναν αριθμό φλογοθαλάμων τοποθετημένων περιφερειακά

του οριζόντιου άξονα σε κοινό δακτυλιοειδές πλαίσιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.74 .

Η παροχή της πρωτεύουσας ροής αέρα πραγματοποιείται από ξεχωριστούς αεραγωγούς για τον κάθε φλογοθάλαμο ενώ η δευτερεύουσα ροή αέρα πραγματοποιείται στο δακτυλιοειδή χώρο που σχηματίζεται μεταξύ των φλογοθαλάμων και του εξωτερικού περιβλήματος (Σχήμα 2.75). Και εδώ χρησιμοποιούνται αγωγοί μετάδοσης της φλόγας.



Σχήμα 2.75 Οι ροές αέρα στο σώληνο-δακτυλιοειδή θάλαμο καύσης

Η σχεδίαση του σώληνο-δακτυλιοειδούς θαλάμου καύσης επιτυγχάνει να συνδυάσει την ευκολία στην επιθεώρηση και επισκευή που παρουσιάζει ο πολλαπλός θάλαμος καύσης με την καλή εργονομία που επιτυγχάνει ο δακτυλιοειδής θάλαμος καύσης.

2.7 Στρόβιλος

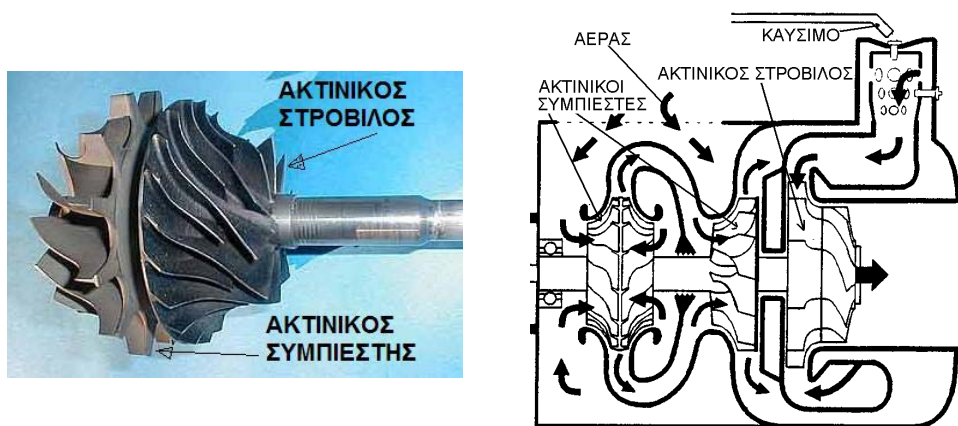
Ο πρωταρχικός σκοπός του στρόβιλου (turbine) σε έναν αεριοθούμενο κινητήρα είναι να παρέχει την απαιτούμενη ισχύ για την περιστροφή του συμπιεστή. Συμπληρωματικά, ο στρόβιλος εξασφαλίζει την κίνηση των **παρελκομένων (accessories)**. Στον ελικοστρόβιλο και τον αξονοστρόβιλο κινητήρα, ο στρόβιλος δίνει κίνηση και στον έλικα. Η ισχύς που παρέχει ο στρόβιλος κατά τη λειτουργία του μπορεί να πάρει τιμές της τάξης των 50.000 Hp. Η ισχύς αυτή λαμβάνεται από την ενέργεια των εξερχόμενων, από το θάλαμο καύσης, καυσαερίων¹. Ένα και μόνο πτερύγιο του στρόβιλου μπορεί να παράγει ισχύ έως και 250 Hp! Και ας μην ξεχνάμε ότι η μετατροπή της θερμικής ενέργειας των καυσαερίων σε μηχανική ισχύ πραγματοποιείται μέσα στον περιορισμένο χώρο που κατέχει ο στρόβιλος ενός αεριοστρόβιλο κινητήρα. Επίσης, αξιοσημείωτες είναι οι θερμοκρασίες λειτουργίας στην είσοδο του στρόβιλου, οι οποίες μπορούν να φτάσουν και τους 1650°C!

¹ Υπολογίζεται ότι σχεδόν τα τρία τέταρτα της ενέργειας τους απαιτούνται για την κίνηση του συμπιεστή σε έναν αεριοστρόβιλο κινητήρα.

Βέβαια, η ανάπτυξη νέων υλικών κατασκευής των στρόβιλων, καθώς και βελτιωμένων μεθόδων ψύξης τους, επιτρέπουν τη λειτουργία υπό αυτές τις συνθήκες και την παροχή ολοένα και μεγαλύτερων τιμών ισχύος.

2.7.1 Περιγραφή και λειτουργία του στρόβιλου

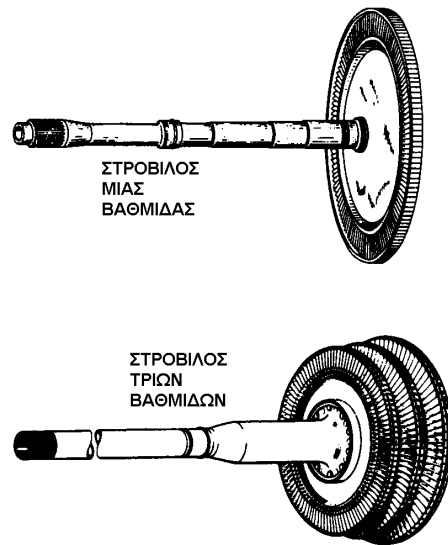
Ας θυμηθούμε τη λειτουργία του συμπιεστή. Αυτός προσθέτει ενέργεια στο εισερχόμενο ρεύμα αέρα μετατρέποντας τη μηχανική του ενέργεια σε δυναμική του ρεύματος αέρα. Αντίθετα, ο στρόβιλος απορροφά ενέργεια από το ρεύμα των θερμών καυσαερίων, κατά την έξοδό τους από το θάλαμο καύσης, και τη μετατρέπει σε μηχανική ενέργεια για την παραγωγή ισχύος ή ροπής.



Σχήμα 2.76 Χρήση ακτινικού στρόβιλου σε APU (GTCP85)

Σε αντίθεση με τη λειτουργία των συμπιεστών, όπου τα στροφεία φυγοκεντρικού τύπου βρίσκουν αρκετές εφαρμογές, οι **ακτινικοί στρόβιλοι (radial inflow turbines)** χρησιμοποιούνται σε ελάχιστες περιπτώσεις καθώς δεν είναι αποδοτικοί όσο οι αξονικοί. Ωστόσο, συγκεντρώνουν πλεονεκτήματα όπως η στιβαρή κατασκευή και το σχετικά μικρό κόστος τους. Οι ακτινικοί στρόβιλοι έχουν τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 2.76.

Στους αεριοστρόβιλους κινητήρες χρησιμοποιείται αποκλειστικά ο στρόβιλος αξονικού τύπου καθώς έχει την ικανότητα να διαχειριστεί μεγάλη παροχή καυσαερίων και σε υψηλό αριθμό στροφών. Όπως ο συμπιεστής, και ο στρόβιλος απαντάται σε μονοβάθμιο και πολυβάθμιο (Σχήμα 2.77).



Σχήμα 2.77 Μονοβάθμιος και τριβάθμιος στρόβιλος αξονικού τύπου

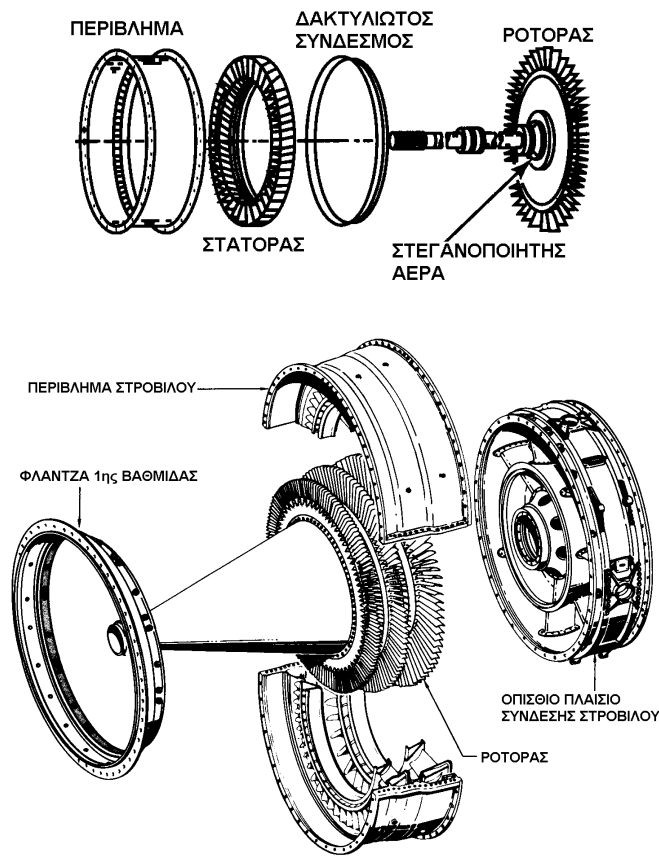
Η βαθμίδα του στρόβιλου αποτελείται από:

- Μία σειρά σταθερών πτερυγίων (vanes), γνωστά και ως στάτορας ή στάτης (stator), τα οποία ακολουθούνται από
- Μία σειρά κινητών πτερυγίων (blades), γνωστά και ως ρότορας (rotor) ή στροφείο¹.

Γενικά, ο στρόβιλος αποτελείται από (Σχήμα 2.78):

- **το περίβλημα (casing)**, το οποίο περιβάλλει το στάτορα και το ρότορα. Συνήθως, φέρει φλάντζες στα δύο του άκρα για τη σύνδεση του τμήματος του στρόβιλου με τα τμήματα του θαλάμου καύσης και του ακροφυσίου εξαγωγής.
- **το στάτορα,**
- **το δακτύλιο (shroud)**, που τοποθετείται στην εσωτερική και εξωτερική περιφέρεια των σταθερών πτερυγίων του στάτορα.
- **το ρότορα.**

¹ Στο συμπιεστή η ακολουθία είναι αντίθετη, όπως είδαμε στο κεφάλαιο 2-4.



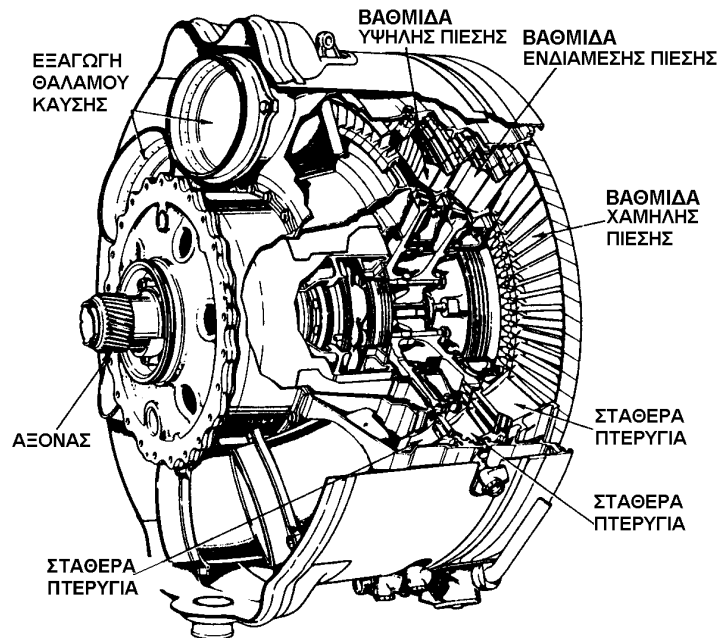
Σχήμα 2.78 Τα μέρη του στροβίλου

Ο αριθμός των βαθμίδων και των στροβίλων που τοποθετούνται στο στρόβιλο εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

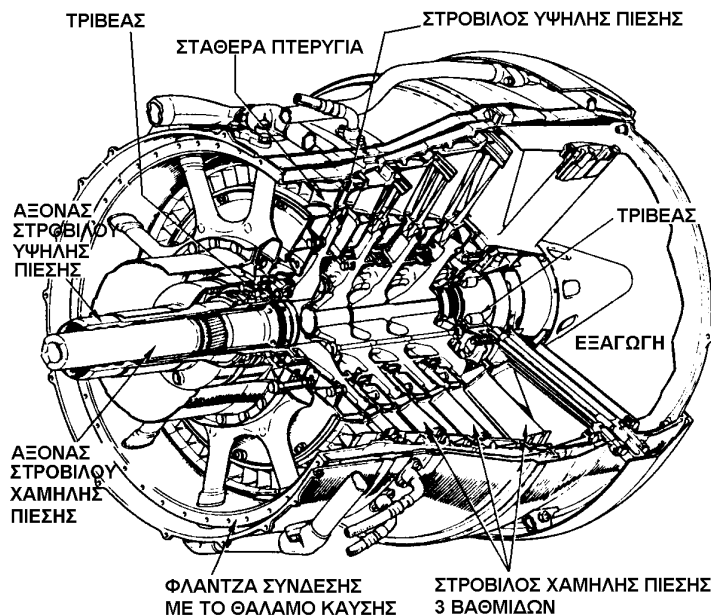
- Τον αριθμό των αξόνων που θα χρησιμοποιηθούν για τη σύνδεση του συμπιεστή με το στρόβιλο,
- Το ποσό της ενέργειας που θα εξαχθεί από τα καυσαέρια και την απαιτούμενη ισχύ,
- Τον αριθμό των στροφών λειτουργίας (RPM),
- Τη μέγιστη διάμετρο την οποία μπορεί να λάβει το στροφέιο του στροβίλου, και
- Τις θερμοκρασίες και πιέσεις στην είσοδο και την έξοδο του στροβίλου.

Οι αεριοστρόβιλοι που λειτουργούν με υψηλούς λόγους συμπίεσης χρειάζονται πολυβάθμιους στρόβιλους. Επίσης, ο αριθμός των αξόνων που χρησιμοποιούνται θα καθορίσει και τον αριθμό των βαθμίδων που θα

χρησιμοποιηθούν στο ή στους στρόβιλους. Η διάμετρος των πολυβάθμιων στρόβιλων αυξάνεται κατά την κατεύθυνση της ροής των καυσαερίων καθώς μειώνεται η ταχύτητα και η πίεση των τελευταίων. Στο Σχήμα 2.79 φαίνεται στρόβιλος μονού άξονα με τρεις βαθμίδες.



Σχήμα 2.79 Στρόβιλος μονού άξονα

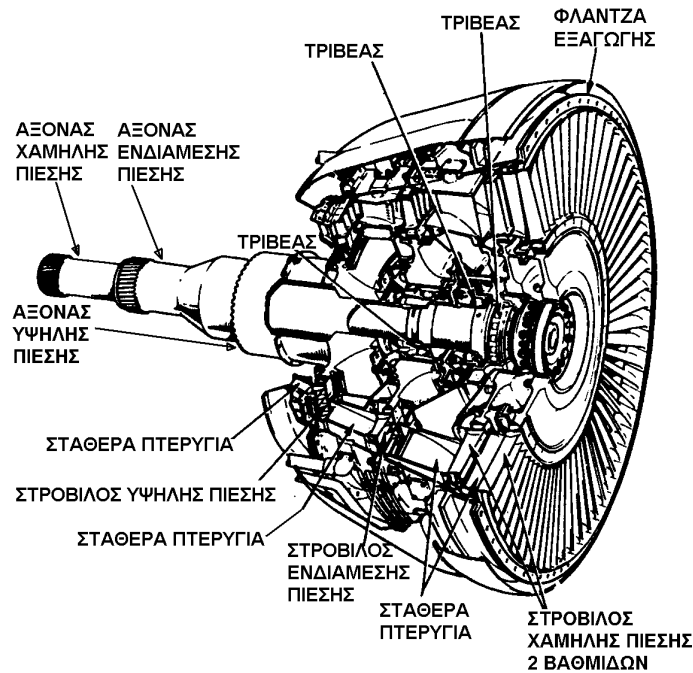


Σχήμα 2.80 Στρόβιλος διπλού άξονα

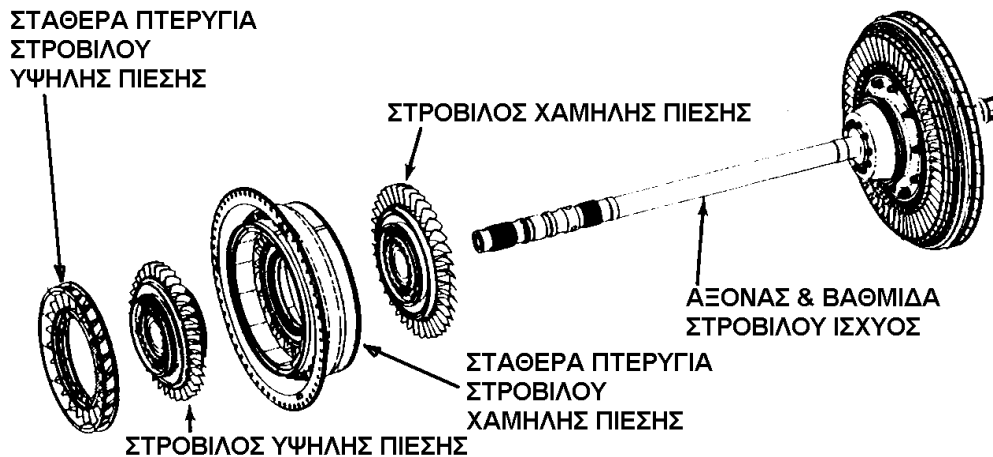
Στην περίπτωση λειτουργίας του αεριοστρόβιλου με δύο συμπιεστές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.80, χρησιμοποιούνται δύο στροφέα στρόβιλων. Ο

στρόβιλος υψηλής πίεσης κινεί το συμπιεστή υψηλής πίεσης. Συνήθως είναι μονοβάθμιος αφού είναι ο πρώτος που λαμβάνει τα καυσαέρια από το θάλαμο καύσης τα οποία περιέχουν πολύ μεγάλη ενέργεια. Ο στρόβιλος χαμηλής πίεσης κινεί το συμπιεστή χαμηλής πίεσης. Αυτός δέχεται τα καυσαέρια μετά την εκτόνωσή τους στο στρόβιλο υψηλής πίεσης, οπότε απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός πτερυγίων για την επίτευξη ισχύος. Έτσι, στο στρόβιλο αυτό χρησιμοποιούνται περισσότερες από μία βαθμίδες – δύο ή τρεις ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα. Βέβαια, ο στρόβιλος χαμηλής πίεσης περιστρέφεται με χαμηλότερη ταχύτητα από αυτήν του στρόβιλου υψηλής πίεσης.

Σε ορισμένους στροβιλοανεμιστήρες μεγάλου βαθμού παράκαμψης χρησιμοποιούνται τρεις άξονες λόγω της ύπαρξης του συμπιεστή ενδιάμεσης πίεσης. Στην περίπτωση αυτή, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.81, ο στρόβιλος υψηλής πίεσης είναι μονοβάθμιος, όπως και προηγουμένως, ενώ οι στρόβιλοι ενδιάμεσης και χαμηλής πίεσης έχουν δύο ή περισσότερες βαθμίδες, ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα.



Σχήμα 2.81 Στρόβιλος στροβιλοανεμιστήρα



Σχήμα 2.82 Στρόβιλος ισχύος σε ελικοστρόβιλο κινητήρα

Τέλος, στην περίπτωση ενός ελικοστρόβιλου κινητήρα, η ισχύς για την περιστροφή του έλικα παρέχεται συνήθως από ένα ξεχωριστό στρόβιλο (power turbine), ενώ οι συμπιεστές λαμβάνουν κίνηση από ανάλογο με το πλήθος τους, αριθμό στροβίλων, (Σχήμα 2.21 (α) και (β), Σχήμα 2.82).

2.7.1.1 Ο στάτορας ή στάτης

Τα σταθερά πτερύγια έχουν το σχήμα της αεροτομής, με το χείλος προσβολής τους να βρίσκεται προς την πλευρά του θαλάμου καύσης και να δέχεται πρώτο τα καυσαέρια που εξέρχονται από αυτόν. Η δίοδος που σχηματίζεται μεταξύ δύο διαδοχικών σταθερών πτερυγίων παρουσιάζει στένωση προς την πλευρά του χείλους εκφυγής τους, προσομοιάζοντας το σχήμα ενός ακροφυσίου (αγωγού που συγκλίνει, nozzle). Έτσι, η ταχύτητα των καυσαερίων αυξάνεται, ώστε να έχει αρκετά μεγάλη τιμή όταν φτάσει στα κινητά πτερύγια. Για το λόγο αυτόν, τα σταθερά πτερύγια στη διεθνή ορολογία είναι γνωστά και με τον όρο **nozzle guide vanes** ενώ το σύνολο του στάτορα ονομάζεται και **turbine nozzle**. Επίσης, ένας άλλος στόχος της λειτουργίας των σταθερών πτερυγίων είναι να δώσουν στα καυσαέρια την κατάλληλη κατεύθυνση, ώστε οι περιφερειακές δυνάμεις που θα δημιουργηθούν στα κινητά πτερύγια, και θα αποδώσουν την ισχύ στον άξονα του στρόβιλου, να είναι οι μέγιστες. Η γωνία στην οποία τοποθετούνται στο στάτορα είναι στην ίδια κατεύθυνση με την περιστροφή του ρότορα. Αν αγνοήσουμε τις όποιες τριβές, μπορούμε να δεχτούμε ότι η ολική ενέργεια των καυσαερίων παραμένει σταθερή. Μέρος της δυναμικής ενέργειάς τους μετατρέπεται σε κινητική - η πίεση μειώνεται με παράλληλη αύξηση της ταχύτητας.

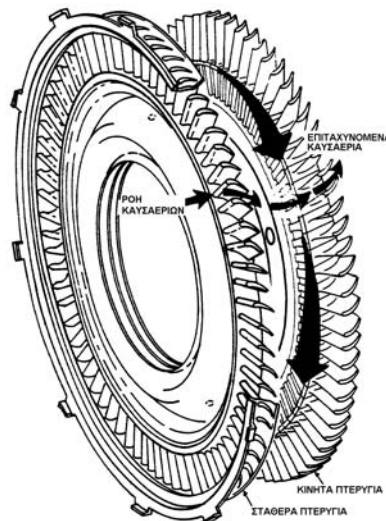
Ένας σημαντικός παράγοντας στο σχεδιασμό των σταθερών πτερυγίων είναι η γεωμετρία στην περιοχή εισαγωγής τους (η οποία σημειώνεται ως X στο

Σχήμα 2.83). Αν η επιφάνειά της είναι πολύ μικρή, θα δημιουργηθεί στραγγαλισμός της ροής στα πτερύγια που έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση **αυξημένης πίεσης** στην έξοδο του συμπιεστή (**back pressure**). Στην περίπτωση που η επιφάνεια της εισαγωγής είναι αρκετά μεγάλη, τότε η λειτουργία του στρόβιλου δεν παρουσιάζει τη βέλτιστη απόδοση σχεδιασμού της. Η τελική μορφή της επιφάνειας εισόδου προέρχεται συμβιβάζοντας τις παραπάνω συμπεριφορές κατά το σχεδιασμό.

2.7.1.2 Ο ρότορας ή στροφείο

Μία εύλογη ερώτηση που μπορεί να κάνει κάποιος στο σημείο αυτό της περιγραφής του στρόβιλου είναι για ποιο λόγο τα καυσαέρια εκτονώνονται κατά την διόδό τους από το στρόβιλο ενώ το εισερχόμενο, στο συμπιεστή, ρεύμα αέρα συμπιέζεται. Η απάντηση βρίσκεται στο σχεδιασμό των κινητών πτερυγίων του στρόβιλου και του συμπιεστή. Όπως είδαμε στην ανάλυση της λειτουργίας του συμπιεστή, η διατομή της περιοχής μεταξύ δύο διαδοχικών κινητών πτερυγίων του συμπιεστή αυξάνεται προς το χείλος εκφυγής τους. Λειτουργεί, δηλαδή, ως διαχύτης. Με τον τρόπο αυτόν, μετατρέπεται η κινητική ενέργεια του εισερχόμενου ρεύματος αέρα σε πίεση.

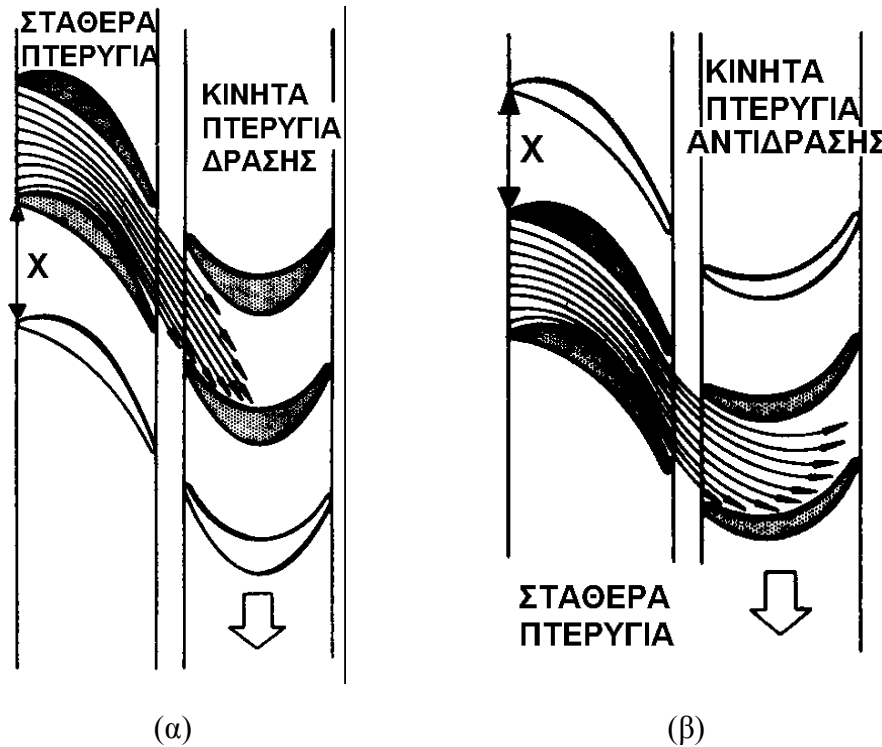
Το αντίθετο φαινόμενο πραγματοποιείται στο ρότορα του στρόβιλου. Η διατομή της περιοχής μεταξύ δύο διαδοχικών κινητών πτερυγίων του στρόβιλου μειώνεται προς το χείλος εκφυγής τους. Έτσι, η ροή των καυσαερίων επιταχύνεται, με παράλληλη μείωση της πίεσης και της θερμοκρασίας τους, και οι συνθήκες γίνονται κατάλληλες για την παραγωγή έργου (Σχήμα 2.84).



Σχήμα 2.83 Ροή καυσαερίων διαμέσου των βαθμίδων του στρόβιλου

Μία βαθμίδα στροβίλου κατηγοριοποιείται ανάλογα με το ποσό της ενέργειας που μετατρέπεται στα σταθερά και τα κινητά πτερύγια. Διακρίνουμε:

- Το **στρόβιλο δράσης** ή **σταθερής πίεσης (impulse turbine)**,
- Το **στρόβιλο αντίδρασης (reaction turbine)**, και
- Το **συνδυασμό τους (impulse – reaction turbine)**.



Σχήμα 2.84 Κινητά πτερύγια τύπου (α) δράσης και (β) αντίδρασης

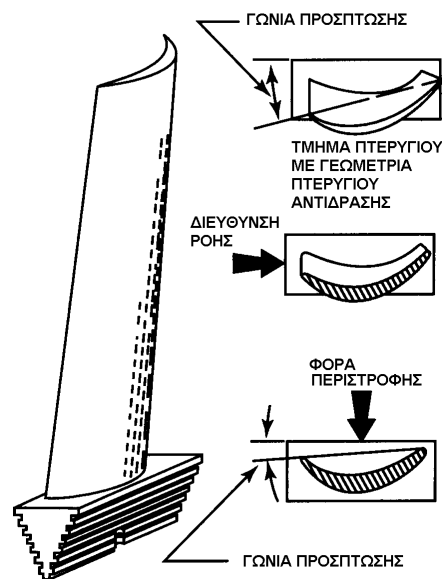
Στην πρώτη κατηγορία βαθμίδας, τα σταθερά πτερύγια μετατρέπουν τη δυναμική ενέργεια των καυσαερίων σε κινητική. Στη συνέχεια, τα καυσαέρια συναντούν τα κινητά πτερύγια με μεγάλη ταχύτητα. Η περιστροφή του στροφείου του ρότορα επιτυγχάνεται από την ορμή που αποκτούν τα κινητά πτερύγια, τα οποία προκαλούν την αλλαγή της διεύθυνσης της ροής των καυσαερίων κρατώντας την πίεσή τους σχεδόν σταθερή, Σχήμα 2.84α. Η σταθερή πίεση εξασφαλίζεται διότι η διατομή εισόδου και εξόδου μεταξύ δύο διαδοχικών κινητών πτερυγίων, σε αυτήν την περίπτωση, **διατηρείται σταθερή**.

Στο στρόβιλο αντίδρασης η εκτόνωση των καυσαερίων πραγματοποιείται τόσο στα σταθερά όσο και στα κινητά πτερύγια. Κατά τη δίοδο των καυσαερίων από τα σταθερά πτερύγια της βαθμίδας, συμβαίνουν τα ίδια φαινόμενα όπως και στο στρόβιλο δράσης, σε μικρότερη ένταση όμως

(Σχήμα 2.84β). Κατά τη δίοδο των καυσαερίων από τα κινητά πτερύγια παρατηρείται **περαιτέρω επιτάχυνσή και πτώση της πίεσής τους**, τους λόγω της γεωμετρίας της διατομής μεταξύ των διαδοχικών κινητών πτερυγίων.

Το πλεονέκτημα της χρήσης στροβίλων αντίδρασης είναι ότι επιτυγχάνουν **καλύτερη απόδοση** στη λειτουργία του στροβίλου. Από την άλλη πλευρά, οι στροβίλοι σταθερής πίεσης εξασφαλίζουν **μεγαλύτερη ισχύ** η οποία επιφέρει τη μείωση του αριθμού των χρησιμοποιούμενων βαθμίδων.

Μία συνήθης πρακτική, επιβεβλημένη πλέον στους σύγχρονους αεριοστροβίλους, είναι η χρήση κινητών πτερυγίων η κατασκευή των οποίων συνδυάζει τα στοιχεία τόσο των στροβίλων δράσης όσο και των στροβίλων αντίδρασης. Πιο συγκεκριμένα, η ρίζα των πτερυγίων έχει τη μορφή του πτερυγίου του στροβίλου δράσης ενώ το ακροπτερύγιο ακολουθεί την κατασκευή του στροβίλου αντίδρασης (Σχήμα 2.85). Παρουσιάζουν, δηλαδή, μία συστροφή από τη βάση προς το ακροπτερύγιο. Με τον τρόπο αυτόν, εξασφαλίζεται η ίση απόδοση έργου από τα καυσαέρια καθώς και η ομοιόμορφη κατανομή ταχύτητας και πίεσης κατά το μήκος των κινητών πτερυγίων του ρότορα.



Σχήμα 2.85 Κίνητο πτερύγιο η γεωμετρία του οποίου συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των πτερυγίων δράσης και αντίδρασης

Στο Σχήμα 2.86 φαίνονται οι κατανομές της ταχύτητας και της πίεσης στο μήκος της βαθμίδας, τα κινητά πτερύγια της οποίας έχουν τη συνδυασμένη γεωμετρία του στροβίλου δράσης και του στροβίλου αντίδρασης.



Σχήμα 2.86 Κατανομές των μεγεθών στις βαθμίδες στροβίλου συνδυασμένης γεωμετρίας

2.7.1.3 Απώλειες

Ο στροβίλος είναι σχεδιασμένος με τρόπο τέτοιο ώστε στην έξοδο του να επιτυγχάνεται ροή των καυσαερίων στην αξονική διεύθυνση, και μόνο. Όμως, πάντα παρουσιάζονται στροβιλισμοί, οι οποίοι δε συμβάλλουν στην παραγωγή ώσης και θεωρούνται ως απώλειες. Μία μέθοδος εξάλειψής τους είναι η τοποθέτηση στην έξοδο του στροβίλου μίας σειράς σταθερών πτερυγίων, ενώ συμβάλλει και η χρήση κινητών πτερυγίων με γεωμετρικά χαρακτηριστικά συνδυασμένου τύπου.

Άλλες μορφές απωλειών είναι οι αεροδυναμικές απώλειες κατά τη διόδο των καυσαερίων από το στάτορα και ρότορα του στροβίλου, η διαρροή αέρα από τα ακροπτερύγια των κινητών πτερυγίων καθώς και από το τμήμα της εξαγωγής¹.

2.7.2 Κατασκευή των εξαρτημάτων του στροβίλου

Ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάζονται και συναρμολογούνται μεταξύ τους τα μέρη που αποτελούν το στροβίλο έχει ιδιαίτερη βαρύτητα στη λειτουργία και την απόδοση του κινητήρα. Ο λόγος έγκειται στο γεγονός ότι τα μέρη αυτά εκτίθενται στις υψηλές θερμοκρασίες των καυσαερίων (της τάξης των 1.300°C), αμέσως μετά την έξοδο των τελευταίων από το θάλαμο καύσης.

2.7.2.1 Σταθερά πτερύγια

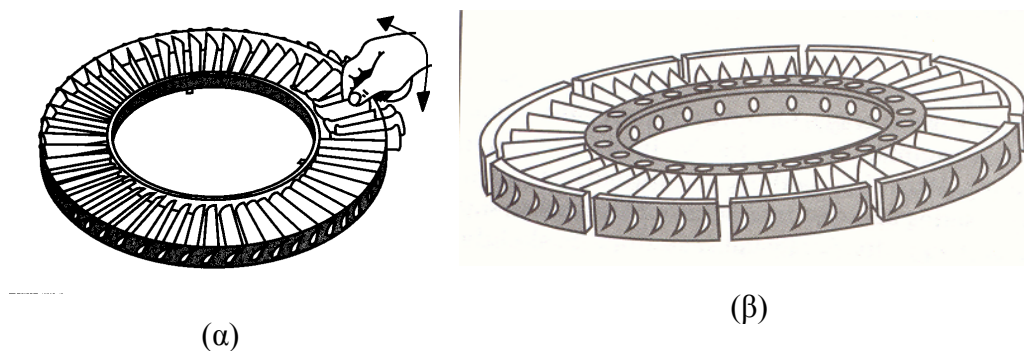
Τα σταθερά πτερύγια στηρίζονται στο περίβλημα του στροβίλου και περιβάλλονται περιφερειακά από έναν εσωτερικό (inner shroud) και έναν εξωτερικό δακτύλιο (outer shroud). Η σύνδεσή τους πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπει τη διαστολή που θα επέλθει κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του κινητήρα, λόγω υψηλών θερμοκρασιών. Στην αντίθετη

¹ Η συνολική απόδοση του στροβίλου παίρνει τιμές της τάξης του 90%.

περίπτωση, οι ταχύτερες θερμοκρασιακές μεταβολές που παρατηρούνται θα προκαλέσουν σοβαρά **θερμικά σοκ**, **ερπυσμό (creep)**, μόνιμη παραμόρφωση του πτερυγίου κατά το μήκος του), στρέβλωση ή και αστοχία λόγω **θερμικής κόπωσης (thermal fatigue)** των σταθερών πτερυγίων.

Ένας τρόπος για να αντιμετωπιστούν οι θερμικές διαστολές είναι η τοποθέτηση των σταθερών πτερυγίων με κάποια ανοχή στους δακτύλιους στήριξής τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.87α. Για να εξασφαλιστεί η αντοχή και η στιβαρότητα των δακτυλίων, αυτοί ενισχύονται με επιπρόσθετους δακτυλίους.

Ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης των θερμικών διαστολών είναι η τοποθέτηση των σταθερών πτερυγίων με συγκόλληση ή πείρους στους δακτυλίους ανά **τμήματα (segments)**. Όταν συμβεί η θερμική διαστολή, τα τμήματα διαστέλλονται και καλύπτουν τα κενά που υπάρχουν μεταξύ τους. Με τον τρόπο αυτόν αποφεύγεται η καταπόνηση και στρέβλωση των σταθερών πτερυγίων (Σχήμα 2.87β).



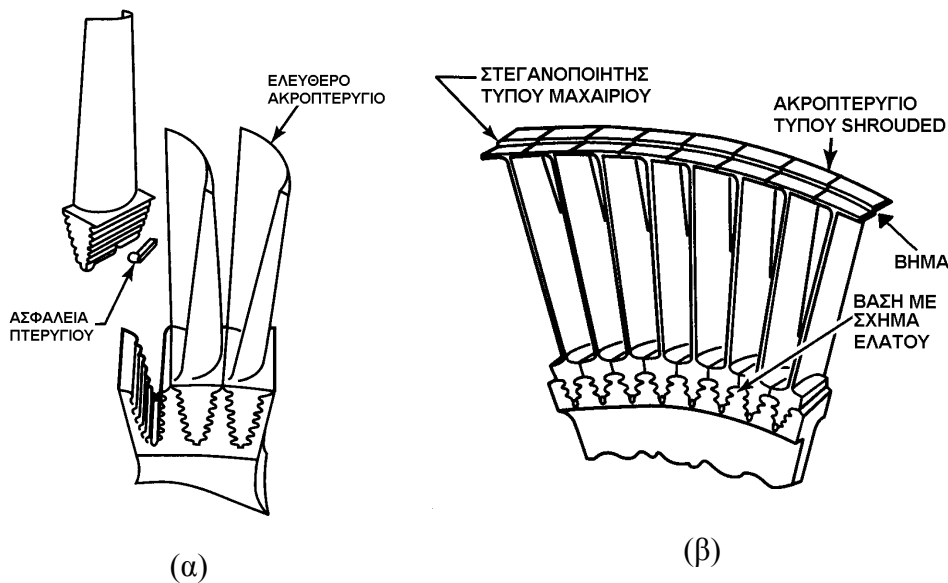
Σχήμα 2.87 (α) Ανοχή μεταξύ των σταθερών πτερυγίων, (β) κατασκευή των σταθερών πτερυγίων ανά τμήματα των τριών τεμαχίων.

Ιδιαίτερα για την πρώτη σειρά σταθερών πτερυγίων, η οποία έρχεται πρώτη σε επαφή με τα καυσαέρια, εφαρμόζεται η επικάλυψή τους με **στρώμα θερμικής προστασίας (thermal coating)**. Το στρώμα αυτό έχει πάχος λίγα εκατοστά του χιλιοστού και ως υλικό χρησιμοποιούνται ανθεκτικά κράματα, όπως το κράμα νικελίου – αλουμινίου, σε μορφή πούδρας. Με τον τρόπο αυτόν αυξάνεται η αντοχή τους στις διαβρωτικές επιπτώσεις της επαφής τους με τα καυσαέρια.

Μια αποτελεσματική μέθοδος προστασίας από την υψηλή θερμοκρασία είναι και η ψύξη των πτερυγίων η οποία θα εξεταστεί σε ιδιαίτερη παράγραφο στη συνέχεια.

2.7.2.2 Κινητά πτερύγια

Τα κινητά πτερύγια είναι χυτά ή σφυρήλατα. Όπως τα σταθερά, έτσι και τα κινητά πτερύγια αντιμετωπίζουν τις ίδιες θερμικές καταπονήσεις. Επιπρόσθετες καταπονήσεις προέρχονται από τις φυγοκεντρικές δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την περιστροφή τους¹. Τα μέταλλα που έχουν καλή αντοχή στις θερμικές καταπονήσεις παρουσιάζουν, συνήθως, μεγάλη δυσκολία στη σφυρηλάτησή τους. Για το λόγο αυτό, για την κατασκευή πτερυγίων, πλέον, χρησιμοποιούνται συνήθως χυτά κράματα νικελίου με χρώμιο, κοβάλτιο, αλουμίνιο, τιτάνιο και μολυβδένιο. Τα πτερύγια περνούν και από ειδική **θερμική κατεργασία (heat treatment)** μετά τη χύτευσή τους, ώστε να αποκτήσουν την επιθυμητή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασιακές και μηχανικές καταπονήσεις.



Σχήμα 2.88 (α) Δίσκος και κινητά πτερύγια ελεύθερου ακροπτερυγίου με βάση σχήματος ελάτου, (β) Κινητά πτερύγια με κάλυμμα στα ακροπτερύγια τους (shrouded blades)

Ο τρόπος της συναρμογής των κινητών πτερυγίων στην επιφάνεια του δίσκου του ρότορα έχει μεγάλη σημασία για την καλή λειτουργία του στροφείου. Η ρίζα του πτερυγίου πρέπει να έχει ανοχή όταν τοποθετηθεί στο δίσκο του στροφείου. Η ανοχή αυτή επιτρέπεται ώστε να είναι εύκολη η τοποθέτηση και η αφαίρεση τους καθώς και για την απορρόφηση των θερμικών διαστολών. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τα κενά των ανοχών

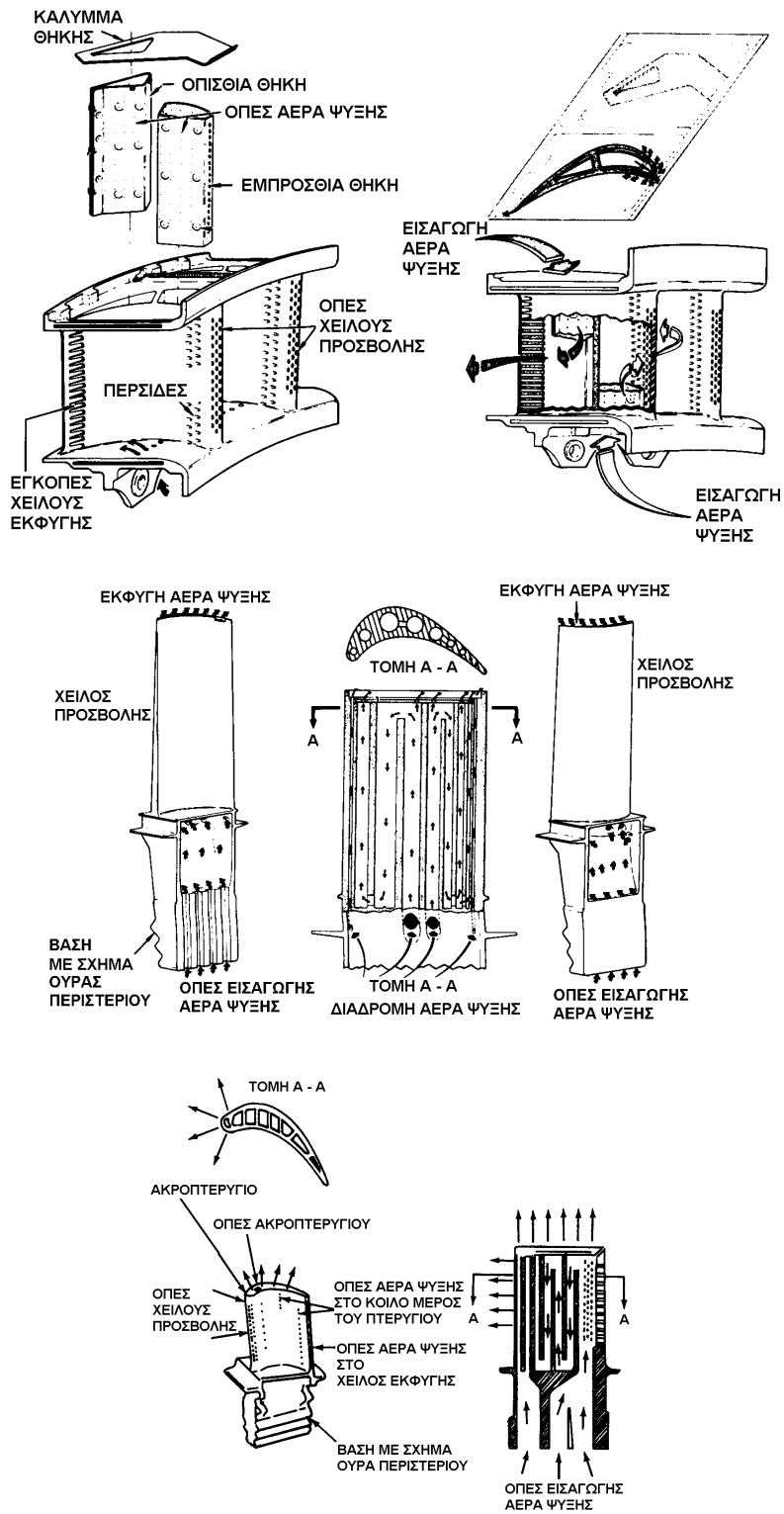
¹ Ένα κινητό πτερύγιο βάρους 75 gr εξασκεί στο δίσκο του ρότορα, κατά το μέγιστο αριθμό στροφών λειτουργίας, μία δύναμη ίση με 2 τόνους.

καλύπτονται. Συνήθως, ο δίσκος φέρει στην περιφέρειά του υποδοχές σε σχήμα **ελάτου (fir tree)**, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.88α. Ανάλογη διατομή έχει και η βάση του κινητού πτερυγίου. Η στήριξη επιτυγχάνεται με πείρους, ασφαλιστικούς κοχλίες ή παρεμβύσματα. Σε κάποιες εφαρμογές πραγματοποιούνται και συναρμογές όπου οι υποδοχές έχουν σχήμα **ουράς περιστεριού (dovetail, Σχήμα 2.89)**. Οι τρόποι συναρμογής αυτοί, προϋποθέτουν μεγάλη κατασκευαστική ακρίβεια, ώστε τα δύο μέρη να δεχτούν το ίδιο φορτίο.

Σε κάποιες περιπτώσεις, τα κινητά πτερύγια φέρουν **κάλυμμα** στα ακροπτερύγια τους (**shrouded blades, Σχήμα 2.88β**). Ο λόγος είναι η προσπάθεια μείωσης της απώλειας αέρα από το σημείο εκείνο αλλά και η προσπάθεια μείωσης των ταλαντώσεων που παρατηρούνται από την περιστροφή του ρότορα. Η γεωμετρία του δακτυλίου φέρει ένα **βήμα (στεγανοποιητής τύπου μαχαιριού, knife edge seal)** στο πλάτος της, το οποίο εξασφαλίζει την καλή στεγανοποίηση. Οι δακτύλιοι αυτοί χρησιμοποιούνται σε στρόβιλους που δεν έχουν ιδιαίτερα μεγάλες περιστροφικές ταχύτητες. Το βάρος που προσθέτουν οι δακτύλιοι στην όλη κατασκευή των πτερυγίων, κάνει τα τελευταία περισσότερο ευάλωτα στο φαινόμενο του ερπυσμού από τις φυγοκεντρικές δυνάμεις και τις θερμοκρασιακές καταπονήσεις.

2.7.3 Ψύξη των πτερυγίων

Η προστασία των σταθερών και των κινητών πτερυγίων του στρόβιλου από τις υψηλές θερμοκρασίες των καυσαερίων επιτυγχάνεται, σε μεγάλο βαθμό με την ψύξη τους με αέρα. Στο εσωτερικό των πτερυγίων προβλέπονται δίοδοι για την κυκλοφορία αέρα ο οποίος παρέχεται από το συμπιεστή του κινητήρα. Διάφορες γεωμετρίες και μεθοδολογίες εφαρμόζονται στα πτερύγια, αλλά και στο δίσκο του ρότορα, των αεριοστρόβιλων κινητήρων για να επιτευχθεί η βέλτιστη παροχή ψύξης. Στο Σχήμα 2.89 παρουσιάζονται οι πλέον αντιπροσωπευτικές από αυτές.



Σχήμα 2.89 Διάφορες μέθοδοι ψύξης πτερυγίων στροβίλου

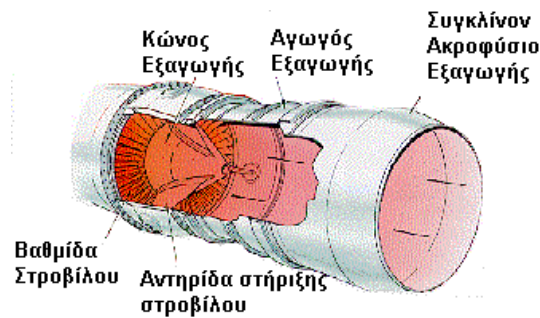
2.8 Εξαγωγή

Το σύστημα εξαγωγής στους αεριοστρόβιλους οδηγεί τα καυσαέρια, μετά την τελευταία κινητή βαθμίδα του στροβίλου στην ατμόσφαιρα. Τα καυσαέρια, μετά το στρόβιλο βρίσκονται σε μία κατάσταση υψηλής, σχετικά, πίεσης (ως προς την ατμοσφαιρική) και χαμηλής ταχύτητας. Σε ένα στροβιλοαντιδραστήρα, είναι απαραίτητη, για την παραγωγή ώσης, η αύξηση της ταχύτητας των καυσαερίων, τα οποία εξωθούνται στην ατμόσφαιρα. Συνεπώς το σύστημα εξαγωγής σε έναν στροβιλοαντιδραστήρα, έχει ως στόχο τη μεγιστοποίηση της κινητικής ενέργειας των καυσαερίων στην έξοδο, με αντίστοιχη μείωση της πίεσης στα επίπεδα της ατμοσφαιρικής. Αντίθετα, σε έναν ελικοφόρο στροβιλοαντιδραστήρα, όπου δεν υπάρχει απαίτηση παραγωγής ώσης και για τον οποίο η κύρια παραγωγή έργου πραγματοποιείται μέσω της εκτόνωσης των καυσαερίων στις βαθμίδες του στροβίλου, η βασική λειτουργία του συστήματος εξαγωγής, είναι να οδηγήσει τα καυσαέρια στην ατμόσφαιρα, με τη μικρότερη δυνατή ταχύτητα.

Ο σχεδιασμός της εξαγωγής καυσαερίων σε αεριοστρόβιλους, έχει πολύ μεγάλη σημασία για τις επιδόσεις του κινητήρα. Το σχήμα και το μέγεθος της εξαγωγής, επηρεάζουν τόσο τη **θερμοκρασία εισαγωγής των καυσαερίων στο στρόβιλο (Turbine Inlet Temperature – TIT)**, την ποσότητα του αέρα που εισέρχεται στον κινητήρα και φυσικά την πίεση και την ταχύτητα του ρεύματος καυσαερίων, που εξωθούνται στην ατμόσφαιρα. Ως εκ τούτου, η αναπτυσσόμενη ώση, καθορίζεται, σε ένα βαθμό, από τη διαμόρφωση της εξαγωγής.

Το σύστημα εξαγωγής σε έναν αεριοστρόβιλο κινητήρα κατασκευάζεται από ειδικά κράματα χάλυβα, ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες των καυσαερίων. Για την αποφυγή της απαγωγής θερμότητας προς τα γειτονικά μέρη του αεροσκάφους προβλέπεται η ροή αέρα περιφερειακά του σωλήνα εξαγωγής ή η επένδυση των τμημάτων της εξαγωγής με ειδικό μονωτικό υλικό. Το σύστημα εξαγωγής εκτείνεται από το τέλος του τμήματος του ή των στροβίλων μέχρι την έξοδο των καυσαερίων στην ατμόσφαιρα. Ένα τυπικό σύστημα εξαγωγής καυσαερίων περιλαμβάνει τρία βασικά συκροτήματα (Σχήμα 2.90):

- τον κώνο εξαγωγής (exhaust cone),
- τον αγωγό εξαγωγής (exhaust duct ή jet pipe ή tailpipe),
- το ακροφύσιο εξαγωγής (exhaust nozzle).

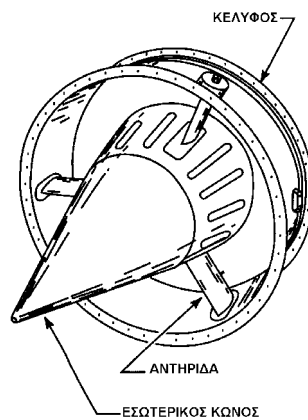


Σχήμα 2.90 Εξαγωγή στροβιλοαντιδραστήρα

Η χρήση αναστροφέα ώσης (για την ταχύτερη επιβράδυνση του αεροσκάφους στην προσγείωση), μειωτήρα θορύβου ή εξόδου μεταβλητής διατομής (για την αποτελεσματικότερη λειτουργία σε μεγαλύτερο εύρος συνθηκών λειτουργίας) μπορεί κάνει περίπλοκη την κατασκευή του συστήματος εξαγωγής.

2.8.1 Κώνος εξαγωγής

Το συγκρότημα του κώνου εξαγωγής αποτελείται από το κέλυφος (outer duct), τον εσωτερικό κώνο (inner cone) και τις αντηρίδες (struts), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.91.



Σχήμα 2.91 Το συγκρότημα του κώνου εξαγωγής

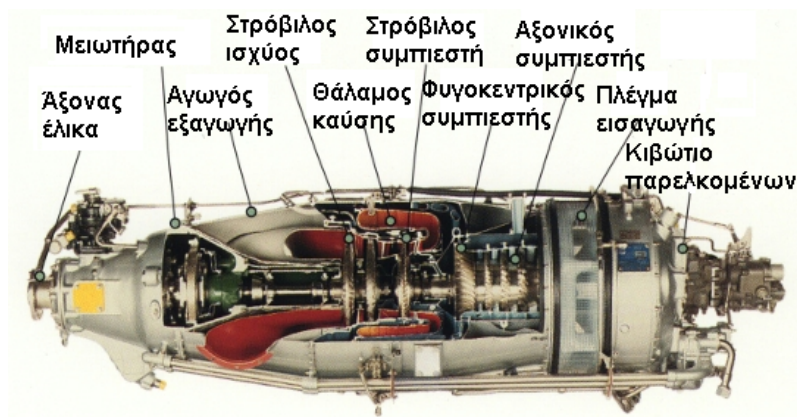
Η βασική λειτουργία του κώνου εξαγωγής είναι η διαμόρφωση του ρεύματος καυσαερίων, τα οποία εξέρχονται από τον στρόβιλο. Ο κώνος εξαγωγής προστατεύει επίσης τα τελευταία τμήματα του άξονα του στροβίλου, από τις υψηλές, σχετικά, θερμοκρασίες των καυσαερίων. Η κωνική διαμόρφωση δημιουργεί αποκλίνουσα διαδρομή για τα καυσαέρια, με συνέπεια τη μείωση της ταχύτητάς τους, ενώ οι αντηρίδες, σε συνδυασμό πιθανώς με οδηγία πτερύγια (outlet guide vanes), ευθυγραμμίζουν τη ροή των καυσαερίων.

2.8.2 Αγωγοί εξαγωγής

Ο **αγωγός εξαγωγής** οδηγεί τα καυσαέρια στο ακροφύσιο εξαγωγής (Σχήμα 2.90) ή στην ατμόσφαιρα (Σχήμα 2.92). Στις περιπτώσεις των σύγχρονων μαχητικών αεροσκαφών, ο αγωγός εξαγωγής περιλαμβάνει και την **μετάκαυση**.

Η χρήση αγωγού εξαγωγής προκαλεί απώλειες στην πίεση των καυσαερίων εξαιτίας των τριβών με τα τοιχώματα. Η παρουσία του είναι γενικά απαραίτητη στις περιπτώσεις, όπου ο κινητήρας τοποθετείται μέσα στην άτρακτο του αεροσκάφους και θα πρέπει ως εκ τούτου αυτή να προστατευθεί από τις υψηλές θερμοκρασίες των καυσαερίων. Η σχεδίαση του αγωγού εξαγωγής προσπαθεί:

- να διατηρήσει τη διάμετρο του αγωγού όσο πιο μεγάλη γίνεται, έτσι ώστε οι ταχύτητες να παραμείνουν μικρές (μείωση απωλειών λόγω τριβής),
- να διατηρήσει το μήκος του αγωγού στο ελάχιστο απαραίτητο,
- να αποφύγει την παρουσία μη ευθύγραμμων τμημάτων ή οποιωνδήποτε εμποδίων στη ροή.



Σχήμα 2.92 Παράδειγμα ελικοστροβίλου κινητήρα (PT6A) όπου ο αγωγός εξαγωγής οδηγεί τα καυσαέρια στην ατμόσφαιρα

Στο αρχικό τμήμα του αγωγού εξαγωγής, συνήθως μετά τις αντηρίδες, τοποθετούνται θερμοστοιχεία για τη μέτρηση της **θερμοκρασίας εξαγωγής καυσαερίων (Exhaust Gas Temperature – EGT)**. Αυτή η μέτρηση χρησιμοποιείται συχνά αντί της μέτρησης της **θερμοκρασίας εισαγωγής του στροβίλου (Turbine Inlet Temperature – TIT)** ώστε να μειώνονται οι φθορές των θερμοστοιχείων, αφού η θερμοκρασίας εξαγωγής καυσαερίων είναι σημαντικά χαμηλότερη της θερμοκρασίας εισαγωγής του στροβίλου. Η σχέση μεταξύ των δύο θερμοκρασιών είναι γνωστή από τη σχεδίαση του

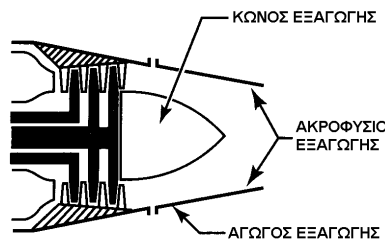
κινητήρα και, συνεπώς, η μέτρηση της θερμοκρασίας εξαγωγής καυσαερίων επιτρέπει τον υπολογισμό της θερμοκρασίας εισαγωγής του στροβίλου.

Στην περίπτωση των αξονοστρόβιλων, το ρεύμα εξαγωγής των καυσαερίων δεν πρέπει να παρέχει ώση, μια και κάτι τέτοιο θα προκαλούσε πρόβλημα στη λειτουργία του ελικοπτέρου. Οι αγωγοί εξαγωγής είναι αποκλίνοντες, έτσι ώστε να εκμηδενίζεται η ώση, την οποία μπορούν να αποδώσουν τα καυσαέρια.

2.8.3 Ακροφύσια εξαγωγής

2.8.3.1 Συγκλίνον ακροφύσιο εξαγωγής

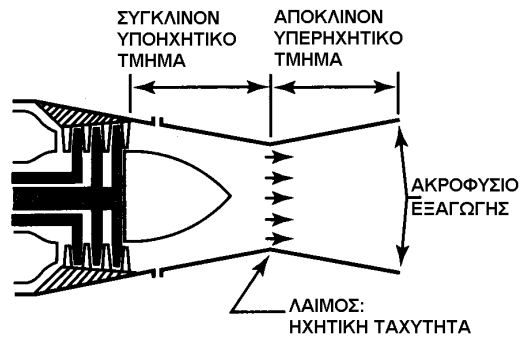
Το μέγεθος του ακροφυσίου εξαγωγής καθορίζει την ταχύτητα εξόδου των καυσαερίων από τον κινητήρα. Ως εκ τούτου, η επιφάνεια του ακροφυσίου εξαγωγής στους κινητήρες χωρίς μετάκαυση είναι κρίσιμη και συνήθως καθορίζεται κατά την κατασκευή του. Στην περίπτωση **συγκλίνοντος ακροφυσίου (convergent nozzle - μείωση διατομής, Σχήμα 2.93)**, η ταχύτητα των καυσαερίων αυξάνεται, ενώ η πίεσή τους μειώνεται. Η έξοδος στην ατμόσφαιρα γίνεται σε ταχύτητες, οι οποίες είναι πάντοτε μικρότερες ή ίσες της ταχύτητας του ήχου. Στην περίπτωση πάντως των στροβιλοαντιδραστήρων και των στροβιλοανεμιστήρων χαμηλού λόγου παράκαμψης, η ταχύτητα εξαγωγής των καυσαερίων είναι αρκετά κοντά στην ταχύτητα του ήχου ($Mach = 1$).



Σχήμα 2.93 Συγκλίνον ακροφύσιο εξαγωγής

2.8.3.2 Συγκλίνον-αποκλίνον ακροφύσιο

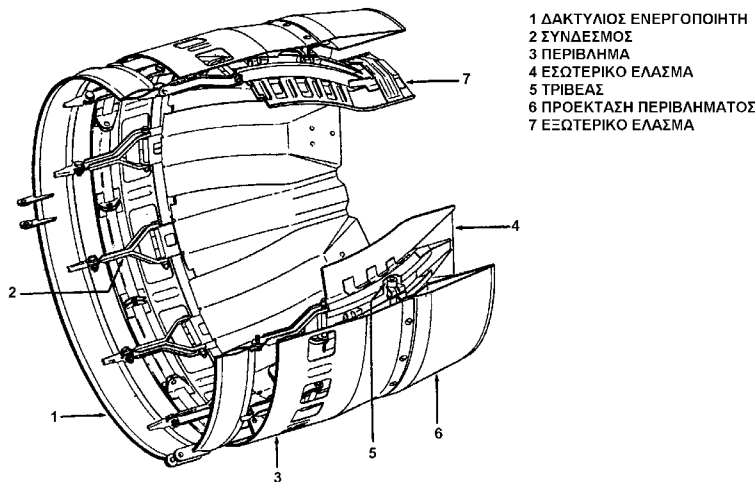
Στην περίπτωση κατά την οποία, η πίεση των καυσαερίων, μετά τον στρόβιλο, είναι αρκετά υψηλή, έτσι ώστε να μπορούν αυτά να επιταχυνθούν σε ταχύτητες, μεγαλύτερες από την ηχητική, χρησιμοποιείται **συγκλίνον-αποκλίνον ακροφύσιο (convergent-divergent nozzle, Σχήμα 2.94)**. Σε αυτή την περίπτωση το ακροφύσιο περιλαμβάνει ένα τμήμα, στο οποίο η διατομή μειώνεται και ένα δεύτερο στο οποίο η διατομή αυξάνει.



Σχήμα 2.94 Συγκλίνον-αποκλίνον ακροφύσιο

Στο πρώτο τμήμα του συγκλίνοντος-αποκλίνοντος ακροφυσίου η ροή επιταχύνεται σε υποηχητικές ταχύτητες, ενώ η πίεση μειώνεται. Στο σημείο ελάχιστης διατομής του ακροφυσίου (λαιμός – **throat**) η ταχύτητα είναι ίση με αυτήν του ήχου ($Mach = 1$). Το αποκλίνον τμήμα του ακροφυσίου μειώνει περισσότερο την πίεση, ενώ η ταχύτητα αυξάνεται σε τιμές, οι οποίες αντιστοιχούν σε αριθμούς Mach μεγαλύτερους του 1 (**υπερηχητική ροή**). Η μεγάλη ταχύτητα των καυσαερίων κατά την εξαγωγή τους έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή υψηλότερης ώσης.

Σε πολλές περιπτώσεις, ιδιαίτερα σε συγκλίνοντα-αποκλίνοντα ακροφύσια, η διατομή εξόδου των καυσαερίων μπορεί να μεταβάλλεται (**ακροφύσια μεταβλητής διατομής – variable area exhaust nozzles**, Σχήμα 2.95).



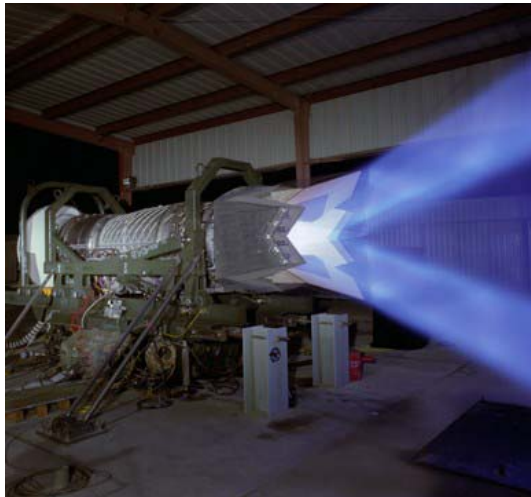
Σχήμα 2.95 Ακροφύσιο μεταβλητής διατομής

Με τον τρόπο αυτό ελέγχεται η επιτάχυνση της ροής στο ακροφύσιο, ενώ ο τρόπος μεταβολής της διατομής του ακροφυσίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση των επιδόσεων του κινητήρα. Τα ακροφύσια μεταβλητής διατομής επιβαρύνουν τον κινητήρα, τόσο όσον προς την πολυπλοκότητα

σχεδίασης, όσο και προς το βάρος του. Ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται σε αεροσκάφη που πετούν σε υψηλούς αριθμούς Mach.

2.8.3.3 Ακροφύσια μεταβλητής διεύθυνσης εξαγωγής

Τελευταία εξέλιξη στο σχεδιασμό ακροφυσίων, αποτελούν τα **ακροφύσια με μεταβλητή διεύθυνση εξαγωγής καυσαερίων (Thrust vectoring nozzles, Σχήμα 2.96)** ή **διδιάστατα ακροφύσια (2-D nozzles)**. Τα ακροφύσια αυτά έχουν ορθογωνική διατομή (σε αντίθεση με την κυκλική διατομή των παραδοσιακών ακροφυσίων) και επιτρέπουν αφενός την μεταβολή της διεύθυνσης εξόδου ή και την αναστροφή των καυσαερίων από τον κινητήρα και αφετέρου τη μεταβολή της επιφάνειας εξόδου κατά τη λειτουργία της μετάκαυσης. Επιτυγχάνεται, έτσι, ουσιαστική μείωση του μήκους του διαδρόμου κατά την απογείωση και την προσγείωση αλλά και αυξημένες δυνατότητες ελιγμών σε μεγάλους αριθμούς Mach.



Σχήμα 2.96 Ακροφύσιο με μεταβλητή διεύθυνση εξαγωγής καυσαερίων (A/K F119 της P&W)

2.9 Μείωση Θορύβου

Το πρόβλημα του θορύβου σε κατοικημένες περιοχές (κοντά σε αεροδρόμια, ή στρατιωτικές βάσεις), τον οποίο προκαλούν τα αεριωθούμενα αεροσκάφη (πολιτικά και στρατιωτικά), όταν βρίσκονται στο έδαφος και ιδιαίτερα κατά τις φάσεις της προσγείωσης και απογείωσης, έχει γίνει ιδιαίτερα σημαντικό τα τελευταία χρόνια.

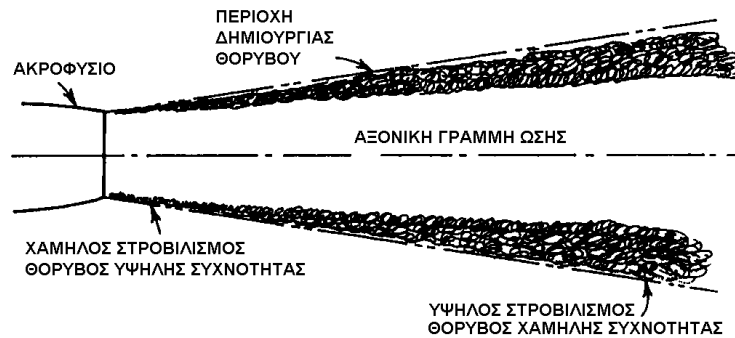
Ο θόρυβος που παράγει ένας στροβιλοκινητήρας, έχει χαρακτηριστικά, τα οποία τον καθιστούν πιο ενοχλητικό, συγκριτικά με τον θόρυβο κινητήρων άλλων τύπων. Για παράδειγμα, ο θόρυβος από έναν εμβολοφόρο αεροπορικό κινητήρα, προέρχεται κυρίως από τον έλικα, αυξάνεται σημαντικά καθώς το αεροσκάφος διέρχεται πάνω από τον επίγειο παρατηρητή, στη συνέχεια όμως

μειώνεται γρήγορα. Αντίθετα, στην περίπτωση στροβιλοκινητήρα, η μέγιστη ένταση του θορύβου δημιουργείται, όταν το αεροπλάνο βρίσκεται σε γωνία 45° ως προς τον παρατηρητή, ενώ η μείωσή της δεν είναι τόσο ταχεία. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί, ότι ο θόρυβος του στροβιλοκινητήρα είναι πιο ενοχλητικός, σε σχέση με αυτόν ενός εμβολοφόρου αεροπορικού κινητήρα με έλικα, γιατί έχει μεγαλύτερη ένταση στις συνήθειες συχνότητας της ανθρώπινης ομιλίας.

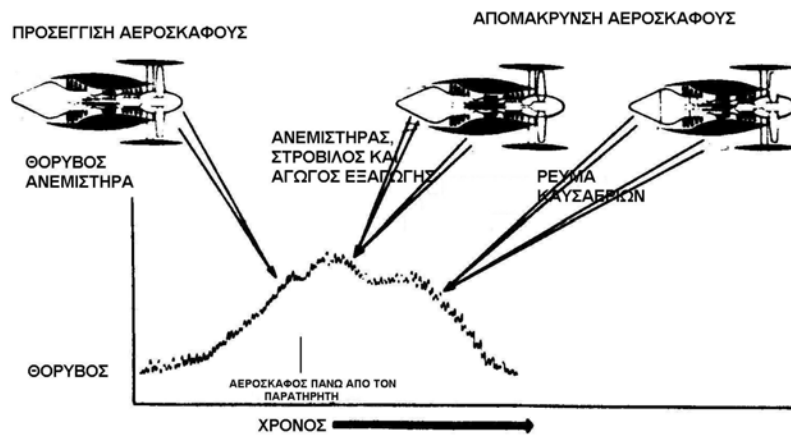
2.9.1 Οι πηγές του θορύβου

Ο παραγόμενος θόρυβος οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη λειτουργία του στροβιλοκινητήρα, όπου μέρος της παραγόμενης από την καύση του καυσίμου ενέργειας, μετατρέπεται σε θόρυβο. Αυτός δημιουργείται κυρίως από την ανάμειξη των θερμών καυσαερίων υψηλής ταχύτητας με τον περιβάλλοντα αέρα. Το εύρος της περιοχής ανάμειξης συνδέεται με τη συχνότητα και την ένταση του θορύβου (Σχήμα 2.97). Κοντά στο ακροφύσιο εξαγωγής, το εύρος του στρώματος ανάμειξης είναι μικρό, όπως και οι **στρόβιλιμοί (vortices)** που δημιουργούνται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή **θορύβου υψηλής συχνότητας**. Καθώς όμως, στη συνέχεια το στρώμα ανάμειξης διευρύνεται, αντιστοίχως μεγαλώνουν και οι στρόβιλοι. Ο παραγόμενος **θόρυβος είναι χαμηλής συχνότητας**. Προκαλείται έτσι θόρυβος υψηλής έντασης, ο οποίος περιλαμβάνει τόσο χαμηλές, όσο και υψηλές συχνότητες. Οι επικρατούσες συχνότητες είναι οι χαμηλές. Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι υψηλές συχνότητες διαδίδονται σε «συγκεκριμένη» κατεύθυνση και εξασθενούν σχετικά γρήγορα εξαιτίας της απόστασης και των τυχόν εμποδίων, τα οποία παρεμβάλλονται μεταξύ της πηγής του θορύβου και του παρατηρητή. Αντίθετα, οι χαμηλές συχνότητες διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις και αποσβένονται σε μεγαλύτερη σχετικά απόσταση.

Αν και ο θόρυβος, ο οποίος δημιουργείται από το ρεύμα των θερμών καυσαερίων, είναι ο πιο έντονος και ενοχλητικός, δεν είναι ο μοναδικός. Θόρυβος παράγεται και από τον ανεμιστήρα, το συμπιεστή και το στρόβιλο (Σχήμα 2.98) λόγω της περιοδικής κίνησης των πτερυγίων και των διαφορών πίεσης που αναπτύσσονται σε αυτά. Στην περίπτωση μάλιστα των στροβιλοανεμιστήρων, η κύρια πηγή θορύβου είναι ο ανεμιστήρας, αφού όπως εξηγείται στην επόμενη παράγραφο, ο θόρυβος που προέρχεται από το ρεύμα των καυσαερίων είναι μειωμένος.



Σχήμα 2.97 Δημιουργία θορύβου από την ανάμειξη των θερμών καυσαερίων με τον περιβάλλοντα αέρα



Σχήμα 2.98 Οι κύριες πηγές θορύβου κατά το "πέρασμα" ενός αεροσκάφους

2.9.2 Μέθοδοι μείωσης του θορύβου

Η σημαντικότερη μείωση του θορύβου που προέρχεται από τα αεροσκάφη επιτεύχθηκε με την επέκταση της χρήσης των **στροβιλοανεμιστήρων**. Αυτό αφορά τόσο τον θόρυβο της καμπίνας, όσο και τον θόρυβο στον περιβάλλοντα χώρο. Οι στροβιλοανεμιστήρες χρειάζονται σπανίως μειωτές θορύβου, αφού η ανάμειξη των θερμών καυσαερίων με τον ψυχρό αέρα της ροής παράκαμψης, η οποία πραγματοποιείται πριν από την εξαγωγή στην ατμόσφαιρα, περιορίζει σημαντικά τον θόρυβο. Οι στροβιλοαντιδραστήρες, αντίθετα, χρειάζονται συνήθως επιπλέον διατάξεις περιορισμού του θορύβου.

Η ένταση του θορύβου που παράγει ένας κινητήρας μετρείται σε **ντεσιμπέλ (decibel - db)**. Το db χρησιμοποιείται για την κατάταξη των ηχητικών επιπέδων σχετικά με κάποια μηδενική ηχητική ένταση. Ως μηδενική θεωρείται αυτή που αντιστοιχεί στην ένταση ήχου που επικρατεί στην είσοδο

του τυμπάνου του ανθρώπινου αυτιού, και ποσοτικά αντιστοιχεί στον ήχο που αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο αυτί από το πέταγμα ενός κουνουπιού σε απόσταση 3 μέτρων. Συζήτηση με κανονική ένταση φωνής μπορεί να πραγματοποιηθεί σε περιβάλλον θορύβου 50-60 db. Ένα πνευματικό δράπανο παράγει θόρυβο 100 db περίπου σε απόσταση τριών μέτρων. Θόρυβος πάνω από 130 db μπορεί να προκαλέσει πόνο στο ανθρώπινο αυτί. Το Σχήμα 2.99 δείχνει την εξέλιξη των στροβιλοκινητήρων, όσον αφορά τον παραγόμενο από αυτούς θόρυβο, όπως αυτός μετράται σε απόσταση 150 περίπου μέτρων από το αεροσκάφος. Έτσι, οι παλαιότεροι στροβιλοαντιδραστήρες προκαλούσαν θόρυβο, ο οποίος ξεπερνούσε τα 110db. Αντίθετα, οι σύγχρονοι στροβιλοανεμιστήρες, υψηλού λόγου παράκαμψης παράγουν επίπεδα θορύβου, χαμηλότερα των 90db.

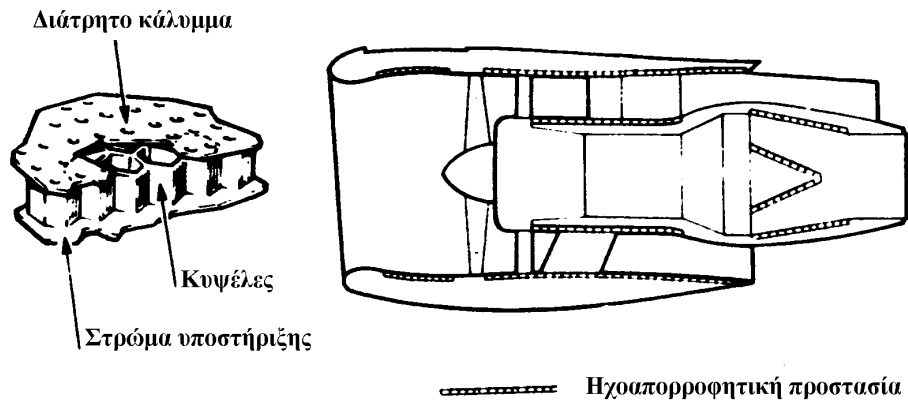


Σχήμα 2.99 Επίπεδα παραγόμενου θορύβου από στροβιλοκινητήρες

2.9.3 Μειωτές θορύβου

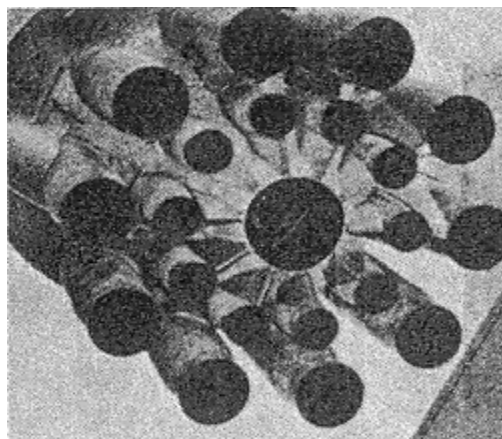
Όπως προαναφέρθηκε, οι στροβιλοανεμιστήρες δεν απαιτούν συνήθως ειδικές διατάξεις μείωσης θορύβου. Μπορεί όμως να εφαρμοσθεί κάποια επεξεργασία, για ακουστικούς λόγους, των επιφανειών των περιβλημάτων του κινητήρα. Μία από τις μεθόδους, με τα εντυπωσιακότερα χαρακτηριστικά, όσον αφορά τον επιτυγχανόμενο περιορισμό του θορύβου, είναι η εφαρμογή ηχομονωτικής επένδυσης (Σχήμα 2.100).

ΔΟΜΗ ΗΧΟΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΗΣ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ



Σχήμα 2.100 Θέση εφαρμογής ηχομονωτικής επένδυσης και κατασκευαστικές λεπτομέρειες

Στην περίπτωση των στροβιλοαντιδραστήρων (κυρίως), ή ακριβέστερα, για τη μείωση του θορύβου που προκαλείται από την ανάμειξη του ρεύματος των καυσαερίων, επιδιώκεται η "επιτάχυνση" της ανάμειξής τους με τον ψυχρό περιβάλλοντα αέρα. Αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση διατάξεων διαίρεσης της ροής μετά τον **κώνο εξαγωγής**. Αυτές οι διατάξεις είναι συνήθως **πολλαπλοί αγωγοί (multitube suppressors - Σχήμα 2.101)**, οι οποίοι δημιουργούν αντίστοιχους μικρότερους σχετούς καυσαερίων, ή **αγωγός με "αυλακωτή" περίμετρο (corrugated perimeter - Σχήμα 2.102)**. Και στις δύο περιπτώσεις επιτυγχάνεται αύξηση της επιφάνειας ανάμειξης των θερμών καυσαερίων με τον περιβάλλοντα ψυχρό αέρα.

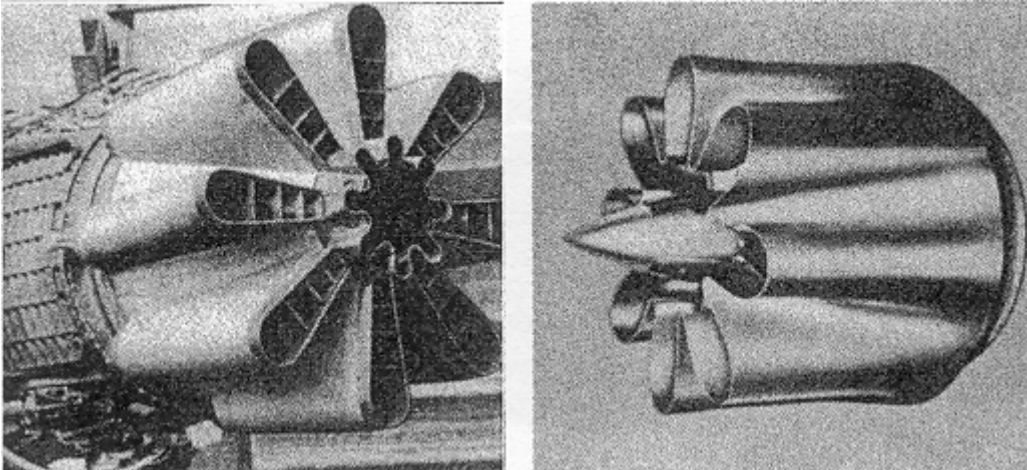


Σχήμα 2.101 Πολλαπλοί αγωγοί εξαγωγής για τη μείωση του θορύβου

Οι μειωτές θορύβου διαμορφώνονται, συνήθως, από ανοξείδωτη λαμαρίνα με κατάλληλες συγκολλήσεις και έχουν απλή κατασκευής. Αν και ο χρόνος γενικής επισκευής τους θα πρέπει να αντιστοιχεί σε αυτόν του κινητήρα,

είναι απαραίτητο να επιθεωρούνται περιοδικά, για την ανεύρεση ενδείξεων ρωγμών, οι οποίες προκαλούνται από τις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας τους.

Πρέπει βεβαίως να τονισθεί, ότι παρ' όλη την ύπαρξη των διαφόρων διατάξεων μείωσης του θορύβου του κινητήρα, εργασία κοντά σε κινητήρα, ο οποίος βρίσκεται σε λειτουργία, απαιτεί την χρήση ηχοπροστατευτικών μέσων (π.χ. ωτασπίδες, ακουστικά).



Σχήμα 2.102 Αυλακωτοί αγωγοί εξαγωγής για τη μείωση του θορύβου

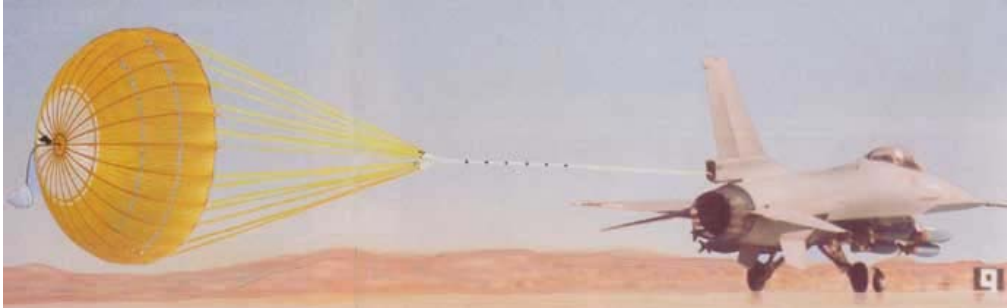
2.10 Αναστροφή Ωσης

2.10.1 Επιβράδυνση α/φους κατά την προσγείωση

Το σημαντικό πρόβλημα της ανακοπής της πορείας ενός αεροσκάφους, μετά την προσγείωσή του, γίνεται εντονότερο στα σύγχρονα, μεγάλα αεροσκάφη, τα οποία προσγειώνονται με υψηλά φορτία και ταχύτητες. Τα φρένα των τροχών δεν επαρκούν για το σταμάτημα του αεροσκάφους. Ιδιαίτερα μάλιστα σε περιπτώσεις βρεγμένων ή παγωμένων διαδρόμων προσγείωσης, η χρήση των φρένων αποκλειστικά είναι επικίνδυνη. Στα ελικοφόρα αεροσκάφη (με εμβολοφόρους, ή ελικοστρόβιλους κινητήρες), η ανακοπή της πορείας επιτυγχάνεται με την **αναστροφή του βήματος (pitch)** του έλικα.

Μία από τις μεθόδους ανακοπής της πορείας του αεροσκάφους, μετά την προσγείωσή του είναι η χρήση «**αλεξίπτωτου προσγείωσης**» (**parabrake**, Σχήμα 2.103). Αν και χρησιμοποιείται σε κάποια πολεμικά αεροσκάφη, το «αλεξίπτωτο προσγείωσης» παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα, όπως η πρόωρη ενεργοποίησή του, ή η μη ενεργοποίησή του. Θα πρέπει επίσης να περισυλλέγεται και να επιδιορθώνεται μετά από κάθε χρήση (ή και να αντικαθίσταται σε περίπτωση απώλειας). Ας σημειωθεί τέλος, ότι ο χειριστής

δεν έχει κανέναν απολύτως έλεγχο στη λειτουργία του «αλεξιπτώτου προσγείωσης» μετά το άνοιγμά του (εκτός φυσικά από το να το αποσυνδέσει από το σκάφος).



Σχήμα 2.103 Αλεξιπτωτο προσγείωσης σε α/φος F-16

Μία άλλη μέθοδος ανακοπής είναι τα **άγκιστρα επιβράδυνσης (arresting hooks)**. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε αεροπλανοφόρα, ή σε στρατιωτικές βάσεις για τον περιορισμό του απαραίτητου μήκους του διαδρόμου προσγείωσης.

Ο ευρύτερα διαδεδομένος τρόπος για την ταχεία επιβράδυνση του αεροσκάφους, μετά την προσγείωσή του, είναι η χρήση **αναστροφέων ώσης (thrust reversers)**. Πρόκειται για το σημαντικότερο υπο-συγκρότημα της ατράκτου του κινητήρα, από άποψη βάρους, αλλά και κόστους. Κατά την φάση της προσγείωσης του αεροσκάφους, ενώ αυτό τροchioδρομεί, ο αναστροφέας ώσης «κλείνει» την εξαγωγή των καυσαερίων, έτσι ώστε αυτά να κατευθυνθούν προς το εμπρόσθιο τμήμα της ατράκτου. Με αυτό τον τρόπο, δημιουργείται μία «δύναμη φρεναρίσματος», η οποία βοηθά σημαντικά στην ταχεία επιβράδυνση του αεροσκάφους.

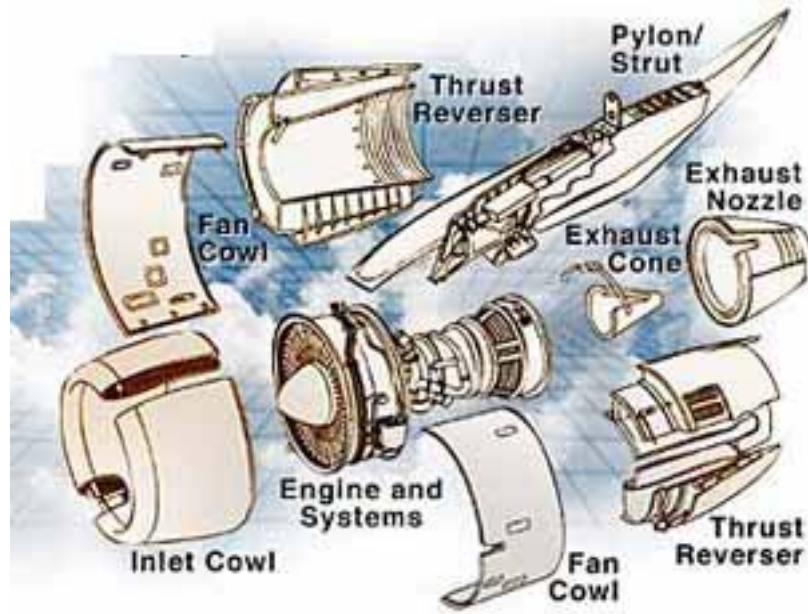
2.10.2 Πλεονεκτήματα και αρχή λειτουργίας των αναστροφέων ώσης

Η εξέλιξη των αεροσκαφών, με τη σημαντική αύξηση του μεταφερόμενου βάρους και της ώσης που παρέχουν οι κινητήρες, έχει σαν αποτέλεσμα και την αντίστοιχη αύξηση της κινητικής ενέργειας, η οποία θα πρέπει να απορροφηθεί κατά το φρενάρισμα. Η ύπαρξη μικρής ώσης, η οποία διατηρείται κατά τη λειτουργία κράτησης, αλλά και η σχετική καθυστέρηση απόκρισης του αεροσκάφους στους χειρισμούς του πιλότου (εξαιτίας βέβαια και της μεγάλης ταχύτητας), ενισχύουν το πρόβλημα της ανακοπής της πορείας του αεροσκάφους κατά την τροchioδρόμηση προσγείωσης.

Τα φρένα των σύγχρονων αεροσκαφών είναι πολύ αποτελεσματικά, όμως σε υγρή, παγωμένη ή χιονισμένη πίστα, η αποτελεσματικότητα αυτή μπορεί να μειωθεί εξαιτίας της απώλειας πρόσφυσης των ελαστικών. Επιπλέον, σε ιδιαίτερες περιπτώσεις, όπως η διακοπή απογείωσης, η χρήση ενός

συστήματος, συμπληρωματικού προς τα φρένα, μπορεί να αποδειχθεί σωτήρια.

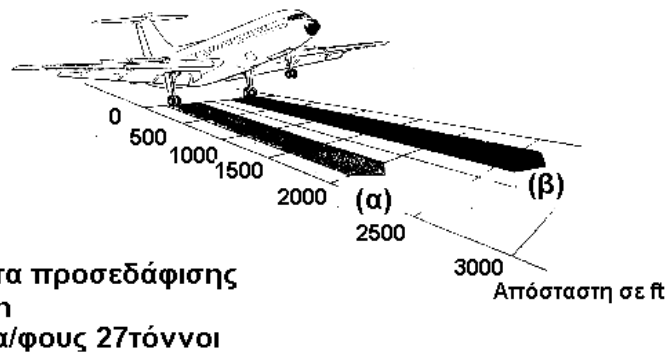
Για τους παραπάνω λόγους, η χρήση αναστροφέων ώσης έχει γίνει ευρέως αποδεκτή, τόσο στα πολιτικά (Σχήμα 2.104), όσο και στα στρατιωτικά αεροπλάνα.



Σχήμα 2.104 Θέση αναστροφέα ώσης σε στροβιλοανεμιστήρα - Inlet cowl: Κάλυμμα εισαγωγής, Fan cowl: Κάλυμμα ανεμιστήρα, Engine & systems: Κινητήρας & συστήματα, Exhaust cone: Κώνος εκφυγής, Exhaust nozzle: Ακροφύσιο εξαγωγής, Pylon/Strut: Πυλώνες ανάρτησης

Θα πρέπει επίσης να σημειωθούν ορισμένα επιπλέον πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση των αναστροφέων ώσης:

- Μείωση του απαιτούμενου μήκους του διαδρόμου προσγείωσης. Η μείωση αυτή είναι 25% περίπου, στην περίπτωση στεγνής πίστας και 50% σε περίπτωση υγρής ή παγωμένης πίστας (Σχήμα 2.105).
- Μείωση του χρόνου παραμονής στο διάδρομο κατά την προσγείωση και αντίστοιχη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου.
- Αύξηση της ζωής των ελαστικών και των φρένων.

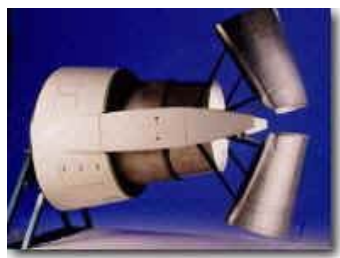


Σχήμα 2.105 Προσγείωση σε παγωμένη πίστα (α) με την χρήση αναστροφέα ώσης και (β) χωρίς αναστροφέα ώσης

Η αρχή λειτουργίας των αναστροφέων ώσης βασίζεται στην αναστροφή της επίδρασης της παραγόμενης από τον κινητήρα ώσης, στη λειτουργία του αεροπλάνου: Ο αναστροφέας ώσης παρέχει μέρος της ενέργειας που απαιτείται για το φρενάρισμα του αεροσκάφους, **μετατρέποντας την προωθητική ώση σε ώση φρεναρίσματος**. Κατά τη διάρκεια της τροchioδρόμησης στην προσγείωση, ο αναστροφέας εγκλωβίζει και μεταβάλλει την κατεύθυνση της ροής των θερμών καυσαερίων, μέσω συνήθως της ανάπτυξης κάποιου στερεού εμποδίου.

2.10.3 Τύποι αναστροφέων ώσης

Διακρίνουμε του αναστροφέας ώσης με 2 θύρες και αυτούς με 4 θύρες (Σχήμα 2.106).



(α)



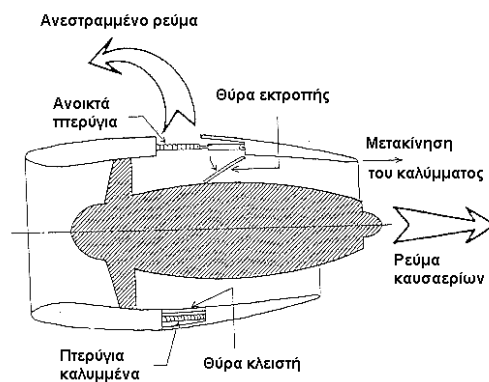
(β)

Σχήμα 2.106 (α) Αναστροφέας ώσης με 2 θύρες, (β) αναστροφέας ώσης με 4 θύρες

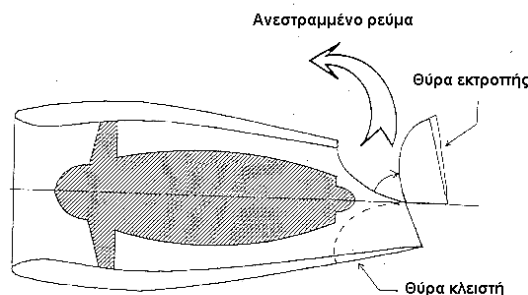
Όσον αφορά τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους, οι αναστροφείς ώσει μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες:

(i) **Οι αναστροφείς οι οποίοι ανακόπτουν την ροή του ρεύματος αέρα παράκαμψης πριν την εξαγωγή (pre-exit thrust reversers - Σχήμα 2.107):** Πρόκειται για τους πλέον δοκιμασμένους και χρησιμοποιούμενους αναστροφείς σε στροβιλοανεμιστήρες. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην εκτροπή του ρεύματος αέρα παράκαμψης προς τα εμπρός, μέσω της ανάπτυξης θυρών και / ή πτερυγίων. Κατά τη λειτουργία αναστροφής, οι θύρες εμποδίζουν τη ροή του αέρα, ο οποίος εκτρέπεται προς τα εμπρός μέσω πτερυγίων (turning vanes) ή θυρών εκτροπής (deflector doors).

(ii) **Οι αναστροφείς οι οποίοι ανακόπτουν την ροή των καυσαερίων μετά την εξαγωγή (pre-exit thrust reversers - Σχήμα 2.108):** Η αναστροφή ώσης επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση εμποδίου στη ροή των καυσαερίων. Το ρεύμα των καυσαερίων μπορεί να εκτραπεί σε οριζόντια ή κατακόρυφη κατεύθυνση, ανάλογα με την θέση του κινητήρα στο σκάφος.



Σχήμα 2.107 Αναστροφείας ώσης πριν την εξαγωγή



Σχήμα 2.108 Αναστροφή ώσης μετά την εξαγωγή

2.10.4 Αρχές σχεδιασμού και κατασκευής των αναστροφέων ώσης

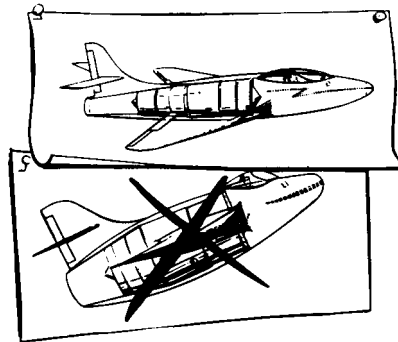
Οι βασικοί στόχοι του σχεδιασμού και της κατασκευής ενός αναστροφέα ώσης μπορεί να συνοψισθούν στα ακόλουθα βασικά σημεία:

- Να είναι αρκετά ανθεκτικός για να αντιστακλά το ρεύμα καυσαερίων και κατασκευασμένος από μέταλλα, τα οποία να καλύπτουν τις προδιαγραφές λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Να μην επηρεάζει τη λειτουργία του κινητήρα.
- Να παρέχει ένα σχετικά υψηλό ποσοστό της προωθητικής ώσης (~50%).
- Να μην αυξάνει την οπισθέλκουσα, εξαιτίας της πιθανής απαίτησης για αύξηση της διατομής του κινητήρα ή της ατράκτου.
- Να μην απαιτεί ιδιαίτερη συντήρηση.
- Να μην προσθέτει υπερβολικό βάρος.
- Να μην προκαλεί επαναρρόφηση (reingestion) των θερμών καυσαερίων από το συμπιεστή.
- Να παρέχει στον χειριστή έλεγχο της ώσης σε λειτουργία αναστροφής.

Όπως είναι φυσικό, δεν είναι δυνατόν να ικανοποιηθούν απολύτως οι παραπάνω στόχοι. Σε κάθε περίπτωση γίνεται προσπάθεια συμβιβασμού των παραπάνω απαιτήσεων.

2.11 Μετάκαυση

Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις είναι αναγκαία αυξημένη τιμή ώσης, μεγαλύτερη από αυτήν που είναι σε θέση να προσφέρει ο κινητήρας. Η απαίτηση αυτή αφορά μικρά χρονικά διαστήματα και περιπτώσεις όπως η μείωση του χρόνου και του μήκους που είναι αναγκαίο για την απογείωση, η αύξηση του ρυθμού ανόδου του αεροσκάφους ή η παροχή μεγάλης ισχύος σε μαχητικά αεροσκάφη όταν εκτελούν ελιγμούς μάχης. Στις περιπτώσεις αυτές δεν ενδείκνυται η χρήση ενός μεγάλου κινητήρα ο οποίος θα επιβαρύνει το αεροσκάφος με μεγαλύτερη μετωπική επιφάνεια, επιπρόσθετο βάρος και μεγαλύτερη ειδική κατανάλωση καυσίμου. Η βέλτιστη λύση είναι η χρησιμοποίηση ενός **μετακαυστήρα (afterburner)**, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.109.



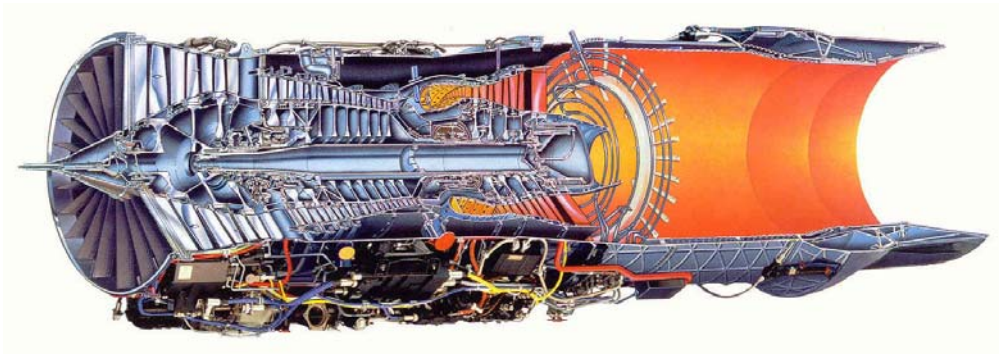
Σχήμα 2.109 Η χρήση μετακαυστήρα ενδείκνυται στην περίπτωση απαίτησης μεγαλύτερης ποσότητας ώσης

Σε αυτόν πραγματοποιείται η **μετάκαυση (afterburning, reheating)** η οποία είναι μία πολύ αποτελεσματική μέθοδος αύξησης της ώσης ενός αεροστρόβιλου κινητήρα σε ποσοστό έως και 100%. Χρησιμοποιείται ευρύτατα στους κινητήρες των υπερηχητικών μαχητικών αεροσκαφών. Με μετακαυστήρες ήταν εφοδιασμένοι και οι κινητήρες των πολιτικών αεροσκαφών Concorde και Tu-144. Οι περιορισμοί θορύβου κάνουν απαγορευτική τη χρήση μετάκαυσης σε πολιτικά και εμπορικά αεροσκάφη.

Ο μετακαυστήρας τοποθετείται στο χώρο μεταξύ του στροβίλου και του ακροφυσίου εξαγωγής. Εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι τα καυσαέρια, μετά την εκτόνωσή τους στο στρόβιλο, περιέχουν ακόμη αρκετή ποσότητα οξυγόνου (θυμηθείτε ότι μόνο ένα ποσοστό 25% περίπου από το εισερχόμενο ρεύμα αέρα στον κινητήρα χρησιμοποιείται κατά τη διεργασία της καύσης, το υπόλοιπο 75% χρησιμοποιείται για λόγους ψύξης). Με τη παροχή καυσίμου στο μετακαυστήρα, γίνεται ανάμειξή του με την υπολειπόμενη ποσότητα αέρα και πραγματοποιείται καύση, η μετάκαυση. Με τον τρόπο αυτόν, τα παραγόμενα καυσαέρια αποκτούν περισσότερη ενέργεια η οποία θα αξιοποιηθεί κατά την εκτόνωσή τους στο ακροφύσιο εξαγωγής. Το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της ταχύτητας εξαγωγής των καυσαερίων και, συνακόλουθα, της παραγόμενης ώσης από τον κινητήρα. Κατά το χρονικό διάστημα της λειτουργίας του μετακαυστήρα, η φλόγα από την καύση είναι ορατή στην εξαγωγή του κινητήρα (Σχήμα 2.110α). Τα επίπεδα του θορύβου ξεπερνούν κατά πολύ τις ήδη αυξημένες τιμές που λαμβάνουν κατά τη λειτουργία χωρίς μετάκαυση. Το Σχήμα 2.110β δείχνει την τομή ενός κινητήρα με σύστημα μετάκαυσης.



(α)

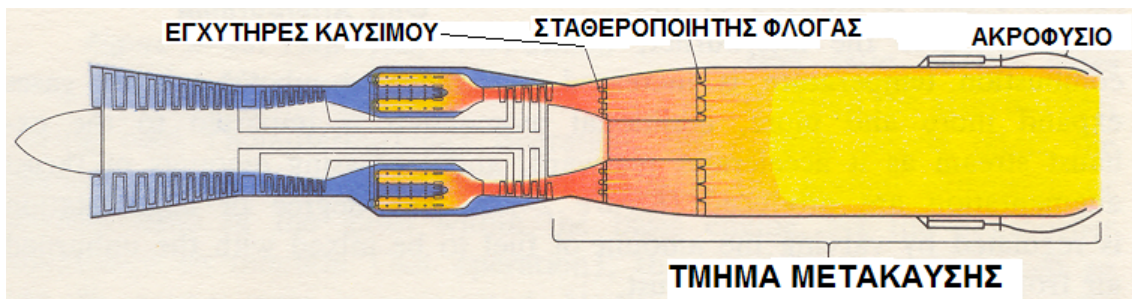


(β)

Σχήμα 2.110 (α) Σύστημα μετάκαυσης σε λειτουργία, (β) Τομή κινητήρα με σύστημα μετάκαυσης.

2.11.1 Λειτουργία

Στο Σχήμα 2.111 φαίνεται η παραστατική απεικόνιση ενός αεροστρόβιλου κινητήρα με μετακαυστήρα.

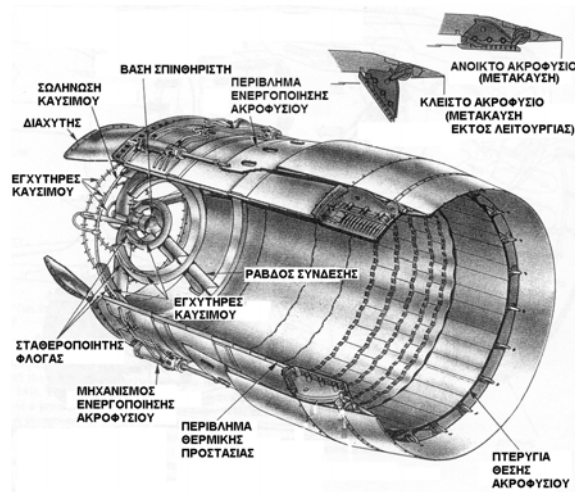


Σχήμα 2.111 Παράσταση αεροστρόβιλου κινητήρα με σύστημα μετάκαυσης

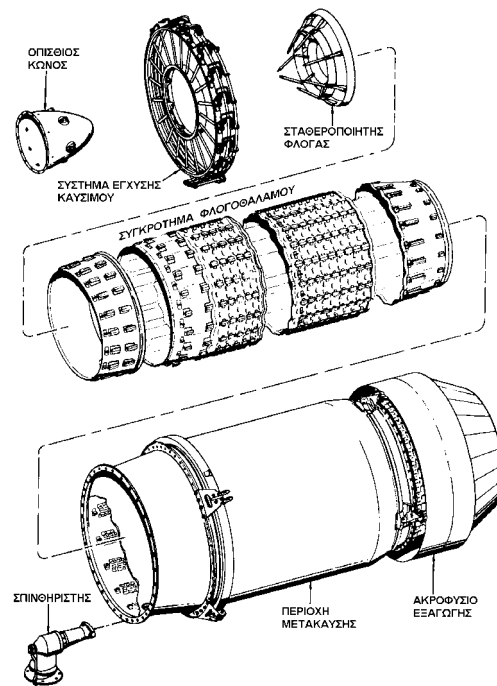
Θεωρητικά, ο μετακαυστήρας είναι ένας αθόδουλος κινητήρας προσαρμοσμένος στην εξαγωγή ενός αεριοστρόβιλου (στροβιλοαντιδραστήρα ή στροβιλοανεμιστήρα). Το ρεύμα αέρα υψηλής ταχύτητας που απαιτείται αρχικά για την εκκίνηση και λειτουργία του αθόδουλου κινητήρα παρέχεται από τα καυσαέρια του αεριοστρόβιλου. Ο μετακαυστήρας προκαλεί ιδιαίτερη εντύπωση λόγω της απλότητας στην κατασκευή του. Ουσιαστικά, αποτελεί έναν αγωγό τοποθετημένο μετά το στρόβιλο, το εμπρόσθιο μέρος του οποίου έχει τη μορφή διαχύτη (ώστε να μειώνεται η ταχύτητα της ροής των καυσαερίων και να επιτυγχάνεται ανάφλεξη). Τα μέρη που τον αποτελούν είναι:

- Ο αγωγός εξαγωγής (**flame duct**) ο οποίος περιέχει το **φλογοθάλαμο (flame tube)**,
- Το **σύστημα έγχυσης** του καυσίμου,
- Ο **σταθεροποιητής** της φλόγας (**flame holder**) και
- Το **μεταβλητής γεωμετρίας ακροφύσιο εξαγωγής**.

Στο Σχήμα 2.112 φαίνεται ένας τυπικός μετακαυστήρας που χρησιμοποιείται στους αεριοστρόβιλους κινητήρες της Rolls-Royce ενώ στο Σχήμα 2.113 φαίνεται η συνδεσμολογία των μερών που αποτελούν τον μετακαυστήρα του στροβιλοαντιδραστήρα J-79 της General Electric.



Σχήμα 2.112 Διάταξη μετακαυστήρα κινητήρων Rolls-Royce



Σχήμα 2.113 Τα μέρη που απαρτίζουν το μετακαυστήρα του κινητήρα GE J-79

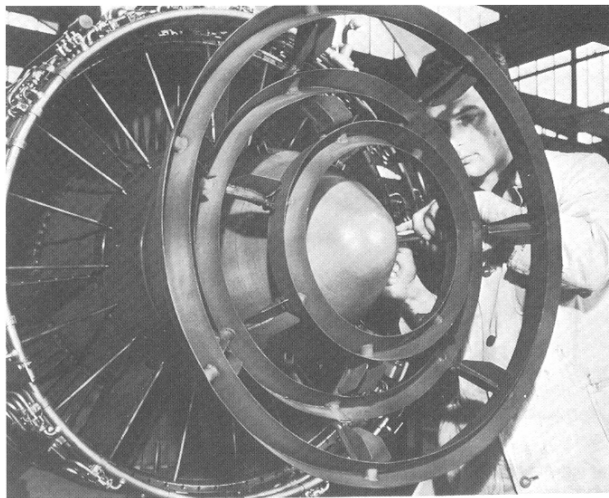
Οι διάφορες μορφές του ακροφυσίου εξαγωγής εξετάστηκαν στην παράγραφο 2.8.3. Όταν ο μετακαυστήρας δε βρίσκεται σε λειτουργία, το ακροφύσιο εξαγωγής λειτουργεί με τη μικρότερη δυνατή γεωμετρία εξόδου και ο μετακαυστήρας λειτουργεί σαν αγωγός εξαγωγής. Η γεωμετρία εξόδου μεταβάλλεται με τη λειτουργία **θυρίδων ελέγχου (interlocking flaps)** και ειδικού συστήματος ελέγχου, το οποίο θα εξετάσουμε παρακάτω.

Η σχεδίαση του μετακαυστήρα πρέπει να είναι τέτοια ώστε αυτός να μην διαταράσσει τις πιέσεις λειτουργίας του κινητήρα. Ο κινητήρας πρέπει να «αγνοεί» την ύπαρξη του μετακαυστήρα, ακόμη και όταν ο τελευταίος βρίσκεται σε λειτουργία. Βέβαια, παρόλες τις προσπάθειες βέλτιστου σχεδιασμού, αυτό δεν είναι εφικτό. Η ύπαρξη μετακαυστήρα επιβάλλει την αύξηση της διατομής του αγωγού εξαγωγής του κινητήρα, λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας των καυσαερίων. Ακόμη, τα εμπόδια που παρεμβάλλονται στη ροή των καυσαερίων μέσα στο μετακαυστήρα προκαλούν μείωση στην παραγόμενη ώση του κινητήρα, όταν το σύστημα μετάκαυσης δε λειτουργεί. Τέλος, το βάρος του κινητήρα που φέρει σύστημα μετάκαυσης είναι αυξημένο λόγω του βαρύτερου αγωγού εξαγωγής και των εξαρτημάτων του μετακαυστήρα.

Ο αγωγός εξαγωγής κατασκευάζεται από κράματα χάλυβα με μεγάλη αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες ενώ απαιτεί και καλύτερη ηχομόνωση από τους

κοινούς αγωγούς εξαγωγής. Σε κάποιες περιπτώσεις, ο αγωγός αποτελείται από διπλό τοίχωμα και στο δακτύλιο που σχηματίζεται ανάμεσα στα δύο κελύφη κυκλοφορεί αέρας για την καλύτερη ψύξη του φλογοθαλάμου. Αυτός φέρει ειδικές οπές για την καλύτερη κυκλοφορία του αέρα ψύξης. Για την αποφυγή της οξειδωσής του από τα διαβρωτικά καυσαέρια, ο φλογοθάλαμος επικαλύπτεται με ειδικό κεραμικό επίστρωμα.

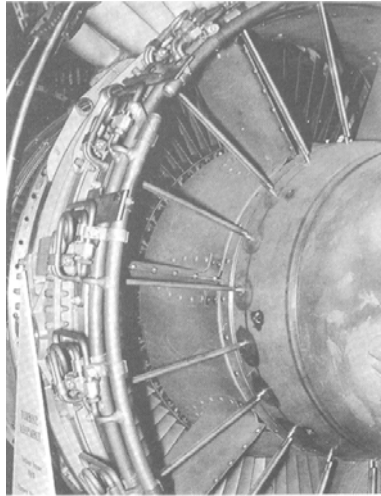
Η εισαγωγή των καυσαερίων από την τελευταία βαθμίδα του στροβίλου στο μετακαυστήρα γίνεται με ταχύτητες της τάξης των 250 έως 400 m/sec. Η κλίμακα ταχυτήτων αυτή είναι απαγορευτική για την καύση. Για το λόγο αυτόν, το εμπρόσθιο τμήμα του μετακαυστήρα έχει τη διατομή διαχύτη. Έτσι, επιτυγχάνεται η μείωση της ταχύτητας των καυσαερίων και η αύξηση της πίεσής τους. Όμως, ακόμη και σε αυτές τις συνθήκες, η ταχύτητα διάδοσης της φλόγας είναι μικρότερη από την ταχύτητα των καυσαερίων. Η διορθωτική κίνηση είναι η εγκατάσταση του σταθεροποιητή της φλόγας αμέσως μετά τους εγχυτήρες καυσίμου. Σκοπός του σταθεροποιητή είναι η δημιουργία στροβιλισμού της ροής με επακόλουθη μείωση της ταχύτητάς της και επίτευξη σταθερής φλόγας. Ο σταθεροποιητής της φλόγας έχει διατομή κυκλική, «V». Συνήθως, αποτελείται από τρεις ομόκεντρους δακτυλίους (Σχήμα 2.114).



Σχήμα 2.114 Σταθεροποιητής φλόγας

Το σύστημα έγχυσης του καυσίμου είναι ξεχωριστό από αυτό του κινητήρα. Χρησιμοποιείται ξεχωριστή αντλία καυσίμου, η οποία παροχετεύει καύσιμο σε μία σειρά εγχυτήρων. Αυτοί τοποθετούνται ομοιόμορφα στην περιφέρεια του αγωγού εξαγωγής ώστε να επιτυγχάνεται ομοιόμορφη έγχυση καυσίμου. Στους κινητήρες με λόγο παράκαμψης η έγχυση του καυσίμου γίνεται μετά τη μείξη των δύο ρευμάτων. Υπάρχει, όμως, και η περίπτωση της ξεχωριστής έγχυσης καυσίμου στις δύο ροές και η μείξη των δύο ρευμάτων πριν από το

ακροφύσιο εξαγωγής¹. Στο Σχήμα 2.115 φαίνεται το σύστημα έγχυσης καυσίμου μετακαυστήρα του κινητήρα J-79 της General Electric.



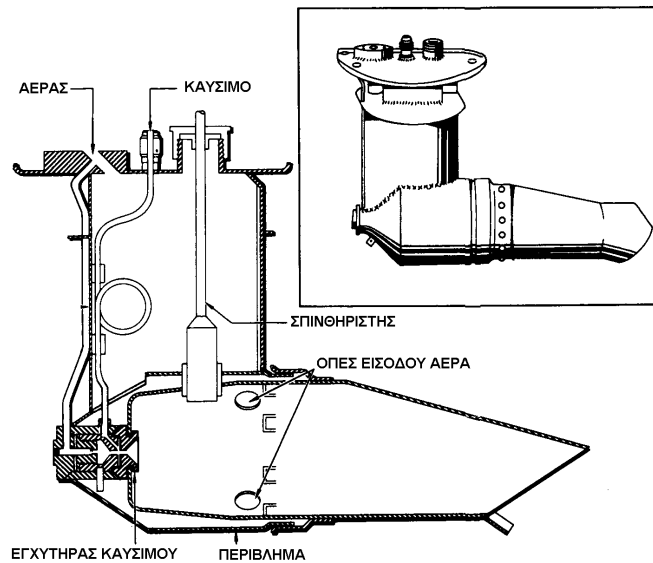
Σχήμα 2.115 Σύστημα έγχυσης καυσίμου μετάκαυσης κινητήρα GE J-79

Θα μπορούσε κάποιος να αναμένει ότι λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας με την οποία τα καυσέρια εισέρχονται στο μετακαυστήρα², η ανάφλεξη του μείγματος που σχηματίζουν με το καύσιμο επιτυγχάνεται μόνη της. Αυτή η κατάσταση εξαρτάται από το ύψος και την ταχύτητα της πτήσης. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται ανεξάρτητη πηγή έναυσης η οποία μπορεί να προέρχεται από σύστημα έναυσης διαφόρων ειδών. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε η έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης, πριν το στρόβιλο. Επιτυγχάνεται μία **θερμή φλόγα (hot spot ignition)**, η οποία διαπερνά το στρόβιλο και δημιουργούνται οι κατάλληλες συνθήκες για την έναυση στο μετακαυστήρα. Το μειονέκτημα της μεθόδου ήταν η θερμοκρασιακή καταπόνηση των βαθμίδων του στρόβιλου. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε η μέθοδος της καταλυτικής ανάφλεξης. Τα καυσάερια και το καύσιμο αναμειγνύονται και οδηγούνται πάνω σε μεταλλικό στοιχείο (πλατίνα), όπου και πραγματοποιείται η έναυση. Τέλος, η πιο συνηθισμένη μέθοδος είναι αυτή της χρήσης ενός **συστήματος παροχής σπινθήρων (torch igniter)**. Αυτό τοποθετείται δίπλα σε έναν εγχυτήρα καυσίμου και λειτουργεί, παρέχοντας σπινθήρα, καθόλη τη διάρκεια της λειτουργίας του

¹ Στην περίπτωση αυτήν προβλέπεται ιδιαίτερος έλεγχος των δύο παροχών ενώ τα δύο ρεύματα συνδεόνται μετά τη δημιουργία των καυσίμων μιγμάτων, ώστε να υποβοηθάται η καύση στο ψυχρό ρεύμα παράκαμψης.

² Της τάξης 550 - 850°C

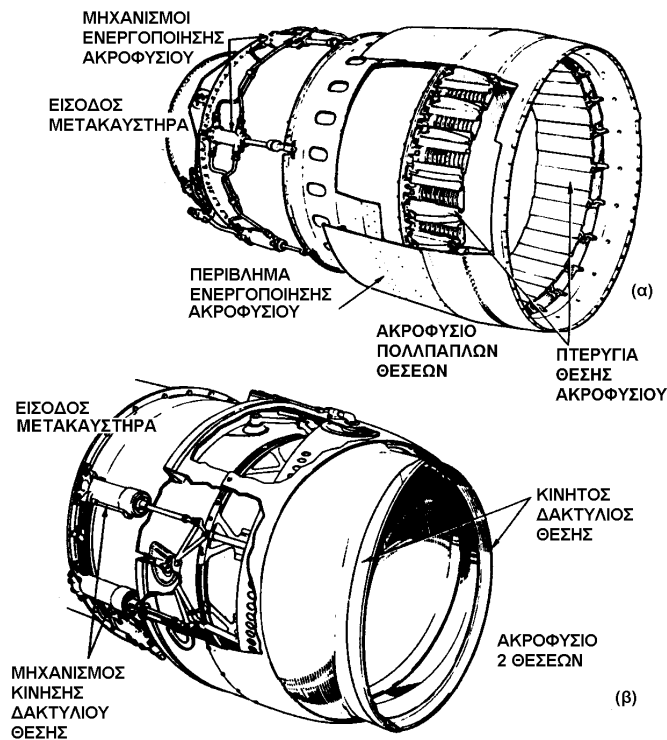
μετακαυστήρα (Σχήμα 2.116). Έτσι, εξασφαλίζεται η έναυση του μετακαυστήρα, ανεξάρτητα από το ύψος και την ταχύτητα της πτήσης.



Σχήμα 2.116 Σύστημα παροχής σπινθήρα στο χώρο του μετακαυστήρα

Το ακροφύσιο εξαγωγής αποτελεί ξεχωριστό τμήμα που προσαρμόζεται στον αγωγό εξαγωγής. Καθώς αυξάνεται η ενέργεια των καυσαερίων κατά τη διάρκεια της μετάκαυσης, το ακροφύσιο εξαγωγής πρέπει να είναι σε θέση να αυξήσει την επιφάνεια στην έξοδό του. Τα καυσαέρια με τον τρόπο αυτόν θα εκτονωθούν κανονικά. Από την άλλη πλευρά, η επιφάνεια εξόδου του ακροφυσίου θα πρέπει να επανέλθει στη μικρότερη τιμή της όταν ο μετακαυστήρας σταματήσει να λειτουργεί. Η παραπάνω διαδικασία επιτυγχάνεται με τη χρήση:

- ακροφυσίου δύο θέσεων (ανοικτό – κλειστό, eyelid-type), Σχήμα 2.117(α). Το ακροφύσιο φέρει δύο ξεχωριστούς δακτυλίους θέσης, που εξασφαλίζουν την ανοικτή ή κλειστή θέση του ακροφυσίου.
- ακροφυσίου με πτερύγια μεταβλητής θέσης (interlocking flaps), Σχήμα 2.117(β). Τα αρθρωτά πτερύγια αυτά κινούνται με λάδι λίπανσης, καύσιμο, αέρα ή ηλεκτρικό ρεύμα και δίνουν στο ακροφύσιο εξαγωγής διατομή ανάλογη με την επιλογή του χειριστή του αεροσκάφους.



Σχήμα 2.117 Είδη ακροφυσίων

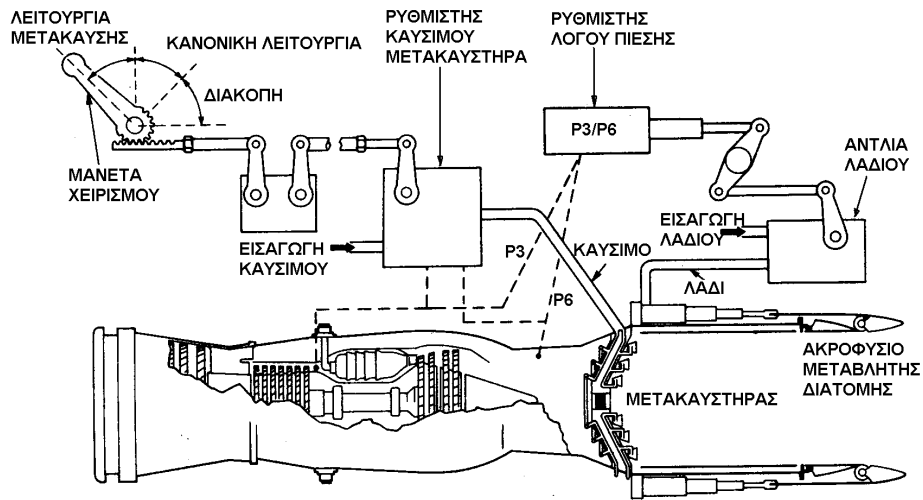
2.11.2 Σύστημα ελέγχου

Για την κανονική λειτουργία του συστήματος μετάκαυσης εγκαθίσταται σύστημα ελέγχου της διατομής του ακροφυσίου εξαγωγής. Αυτό περιλαμβάνει:

- τις θυρίδες,
- μία αντλία για την παροχή της πίεσης του μέσου που κινεί τις θυρίδες, και
- ένα ρυθμιστή του λόγου της πίεσης του αέρα μετά το συμπιεστή προς την πίεση των καυσαερίων μετά το στρόβιλο, P_3/P_6 .

Μετά την επιλογή της λειτουργίας της μετάκαυσης από το χειριστή, ο ρυθμιστής καυσίμου μετάκαυσης αυξάνει την παροχή της αντίστοιχης αντλίας. Το σύστημα ελέγχου καυσίμου μετάκαυσης συνεργάζεται με το σύστημα ελέγχου της διατομής του ακροφυσίου. Η ανάφλεξη του μείγματος καυσίμου μετάκαυσης και καυσαερίων δημιουργεί αύξηση στην πίεση του αγωγού εξαγωγής P_6 (Σχήμα 2.118). Τότε, ο λόγος των πιέσεων P_3/P_6 μεταβάλλεται. Ο ρυθμιστής του λόγου πιέσεων αυξάνει την παροχή της αντλίας που ελέγχει την κίνηση των θυρίδων, αυτές ανοίγουν και τα καυσαέρια εκτονώνονται. Έτσι, μειώνεται η πίεση στον αγωγό εξαγωγής και

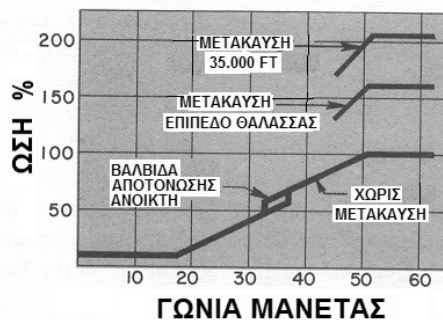
αποκαθίσταται και η τιμή του λόγου P_3/P_6 . Με τον τρόπο αυτόν, η λειτουργία του υπόλοιπου κινητήρα δεν επηρεάζεται από την μετάκαυση.



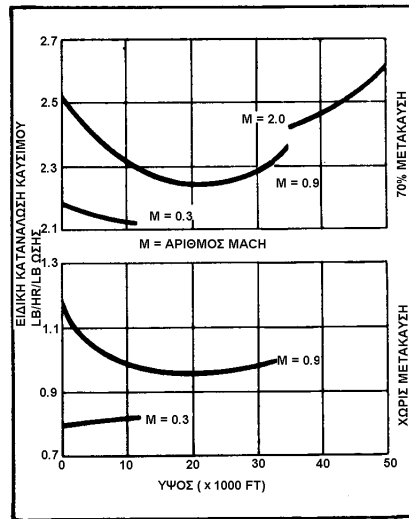
Σχήμα 2.118 Σύστημα ελέγχου διατομής ακροφυσίου εξαγωγής

2.11.3 Αύξηση της ώσης

Καθώς περισσότερο καύσιμο καίγεται στο μετακαυστήρα, τα καυσαέρια αποκτούν μεγαλύτερη ενέργεια και εκτονώνονται σε μεγαλύτερο βαθμό, οπότε επιτυγχάνεται μεγαλύτερη παραγόμενη ώση (Σχήμα 2.119). Το μέγεθος της ώσης αυτής εξαρτάται από την ποσότητα του καυσίμου που εγχύεται στο μετακαυστήρα και τις θερμοκρασίες καυσαερίων που επιτυγχάνονται. Βέβαια, αυτές δεν πρέπει να υπερβαίνουν τη θερμοκρασία αντοχής των υλικών κατασκευής της εξαγωγής του κινητήρα.



Σχήμα 2.119 Αύξηση της παραγόμενης ώσης με τη χρήση συστήματος μετάκαυσης

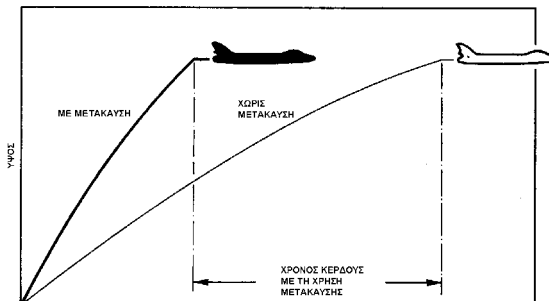


Σχήμα 2.120 Ειδική κατανάλωση καυσίμου ανάλογα με το ύψος πτήσης

2.11.4 Κατανάλωση καυσίμου

Στον αντίποδα της αύξησης της παραγόμενης ώσης με τη χρήση μετάκαυσης, βρίσκεται η αύξηση στην ειδική κατανάλωση καυσίμου του κινητήρα. Τονίζεται ότι η το καύσιμο καίγεται κατά τη διάρκεια της μετάκαυσης με μικρό βαθμό απόδοσης, λόγω των συνθηκών μεγάλης ταχύτητας και μικρής πίεσης του, στις οποίες πραγματοποιείται η καύση. Στο Σχήμα 2.120 παρουσιάζεται η μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου ανάλογα με το ύψος πτήσης του αεροσκάφους χωρίς και με τη χρήση μετάκαυσης.

Όμως, δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι η χρήση της μετάκαυσης συμβάλλει στη μείωση του χρόνου και της απόστασης απογείωσης και ανόδου του αεροσκάφους, όπως καταγράφεται παραστατικά στο Σχήμα 2.121. Με αυτά τα δεδομένα, η αύξηση στην κατανάλωση καυσίμου που παρατηρείται, και είναι περίπου τρεις έως τέσσερις φορές μεγαλύτερη από την κανονική, δε θεωρείται απαγορευτική για τη χρήση της μετάκαυσης.



Σχήμα 2.121 Η χρήση της μετάκαυσης μειώνει το χρόνο και την απόσταση απογείωσης και ανόδου του αεροσκάφους

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

- Η πρώτη εφαρμογή αερίωθσης αποδίδεται στον Έλληνα επιστήμονα **Ήρωνα** που έζησε στην Αλεξάνδρεια τον 1^ο αιώνα μ.Χ. Η μηχανή που κατασκεύασε (αιολοπύλη) θεωρείται πρόδρομος των αεριοστρόβιλων κινητήρων.
- Ως πρώτος επιτυχημένος αεριοστρόβιλος αεροπορικός κινητήρας θεωρείται αυτός που σχεδιάστηκε από το μηχανικό **Frank Whittle** 1930.
- Η πρώτη επιτυχημένη πτήση αεριοθούμενου αεροσκάφους πραγματοποιήθηκε στις 27 Αυγούστου 1939 με αεροσκάφος **Heinkel He-178**.
- Στην εποχή μας πραγματοποιούνται πτήσεις αεριοθούμενων αεροσκαφών με ταχύτητες που ξεπερνούν την ταχύτητα του ήχου έως και 5 φορές.
- Ο κινητήρας αερίωθσης παράγει **προωθητική δύναμη (ώση, thrust)**, προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση, εξαναγκάζοντας μία μάζα αερίου να κινηθεί προς την αντίθετη κατεύθυνση εφαρμόζοντας τον τρίτο νόμο του Νεύτωνα. Τα καυσαέρια ωθούνται προς την εξαγωγή (δράση) και αυτά ασκούν μία δύναμη ή ώση (αντίδραση), στην αντίθετη κατεύθυνση, προς τον κινητήρα και το αεροσκάφος.
- Η ώση είναι μία δύναμη αντίδρασης που εξαρτάται από την επιτάχυνση μίας μάζας αερίου, σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα.
- Οι αεροπορικοί κινητήρες αερίωθσης είναι: ο πύραυλος, ο αθόδυλος ή αυλωθητής, ο παλμικός αθόδυλος ή παλμοθητής, ο αεριοστρόβιλος, ο στροβιλο-αθόδυλος και ο πυραυλο-στροβίλος.
- Ο **πύραυλος (rocket)** χρησιμοποιεί οξειδωτικό μέσο για την καύση το οποίο βρίσκεται αποθηκευμένο στο εσωτερικό του.
- Ο **αθόδυλος (ramjet)** αποτελεί τον απλούστερο κινητήρα αερίωθσης διότι δεν έχει κινητά μέρη.
- Ο παλμικός **αθόδυλος (pulse jet)** διαφέρει από τον αθόδυλο μόνο στην κατασκευή της εισαγωγής του αέρα.
- Ο **αεριοστρόβιλος** θεωρείται ως ο πιο αποτελεσματικός κινητήρας αερίωθσης που βρίσκεται σε χρήση στην εποχή μας. Τα βασικά του μέρη είναι ο **συμπιεστής**, ο **θάλαμος κάυσης**, ο **στρόβιλος** και το **ακροφύσιο εξαγωγής**. Ο συμπιεστής αποτελεί το ψυχρό τμήμα του

κινητήρα και ο θάλαμος καύσης με το στρόβιλο, το θερμό τμήμα. Ο συμπιεστής παίρνει κίνηση από το στρόβιλο μέσω κοινού άξονα. Αυτός κινείται από τα εκτονούμενα θερμά καυσαέρια τα οποία, στη συνέχεια συνεχίζουν την εκτόνωσή τους και περνώντας από το ακροφύσιο εξόδου, εξέρχονται από τον κινητήρα έχοντας πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτήν της εισερχόμενης μάζας αέρα.

- Οι αεριοστρόβιλοι διακρίνονται, ανάλογα με τον αριθμό των αξόνων τους, σε: αεριοστρόβιλους απλού, διπλού και τριπλού άξονα.
- Στον αεριοστρόβιλο, η παραγωγή ισχύος είναι ανάλογη του ποσού της θερμότητας που εκλύεται κατά την καύση. Η θερμότητα αυτή δε μπορεί να μετρηθεί αλλά υπολογίζεται από τρεις άλλες, γνωστές παραμέτρους: τη θερμοκρασία, τη μάζα (ή το βάρος) αέρα και καυσίμου και την ειδική θερμότητα.
- Ο αεριοστρόβιλος κινητήρας διακρίνεται σε τέσσερις διαφορετικούς τύπους:
 - ο το **στροβιλοαντιδραστήρα (turbojet engine)** που αποτελεί την απλούστερη μορφή του. Χρησιμοποιεί τη ροή των καυσαερίων ως το μοναδικό μέσο παραγωγής ώσης. Χαρακτηριστική παράμετρος του είναι ο **λόγος συμπίεσης ή λόγος πίεσης μηχανής (engine pressure ratio – EPR)**.
 - ο Τον **ελικοστρόβιλο (turbojet engine)**. Χρησιμοποιεί μειωτήρα στροφών για τη μετάδοση κίνησης σε έλικα. Σχεδόν όλη η ενέργεια των καυσαερίων αξιοποιείται για την κίνηση του έλικα και η προσφερόμενη από αυτά ώση είναι πολύ μικρή. Επιτυγχάνει την καλύτερη ειδική κατανάλωση καυσίμου συγκριτικά με οποιονδήποτε αεριοστρόβιλο κινητήρα άλλου τύπου.
 - ο Τον **αξονοστρόβιλο (turboshaft engine)**. Αποτελεί ελικοστρόβιλο κινητήρα που συνδέεται με τον άξονα του στροφείου ενός ελικοπτερου. Επίσης, χρησιμοποιείται, σε κάποιες περιπτώσεις, και ως εναλλακτικό μέσο παροχής ισχύος (Auxiliary Power Unit, APU) σε ένα αεροσκάφος.
 - ο Το **στροβιλοανεμιστήρα (turbofan engine)**. Είναι ένας ελικοστρόβιλος με τον **έλικα (ανεμιστήρας, fan)** μέσα στον κινητήρα. Συνδυάζει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του στροβιλοαντιδραστήρα και ελικοστρόβιλου. Η ροή του αέρα εισαγωγής διασπάται στο θερμό ρεύμα (που διέρχεται μέσα από τον κινητήρα) και το ψυχρό ρεύμα (που περνά περιφερειακά του

σώματος του κινητήρα στην ίδια αξονική διεύθυνση). Το ρεύμα αυτό συνεισφέρει στην παραγωγή του 80% της ώσης. Ο λόγος του ψυχρού ρεύματος προς το θερμό ρεύμα αέρα καλείται **λόγος παράκαμψης (bypass ratio)**. Διακρίνουμε τους ατροβιλοανεμιστήρες υψηλού και χαμηλού λόγου παράκαμψης.

- Στο **στρόβιλο-αθόδυλο (turboramjet engine)**. Αποτελεί συνδυασμό του στροβιλοαντιδραστήρα και του αθόδουλου. Κατά την απογείωση και την προσγείωση ο κινητήρας λειτουργεί ως στροβιλοαντιδραστήρας με μετακαυστήρα.
- Στον **πύραυλο-στρόβιλο (turbo-rocket)**. Αποτελεί εναλλακτική λύση του στροβιλο-αθόδουλου. Μεταφέρει υγρό οξυγόνο σε φιάλες για την καύση, οπότε και δε χρησιμοποιεί ατμοσφαιρικό αέρα. Βασικό πλεονέκτημα του είναι ο μικρός όγκος και το μικρό βάρος.
- Ως βασικά πλεονεκτήματα του αεριοστρόβιλου κινητήρα, έναντι του παλινδρομικού θεωρούνται:
 - ο μικρότερος όγκος και το μικρότερο βάρος του,
 - η επίτευξη πολύ μεγαλύτερου λόγου παραγόμενης ώσης ανά μονάδα βάρους,
 - η περιστροφική λειτουργία του, που μειώνει τις απώλειες από τριβές και την πιθανότητα εμφάνισης κραδασμών,
 - η απλούστερη κατασκευή και οι πιο εύκολες διαδικασίες συντήρησης και ελέγχων, και
 - η δυνατότητα επίτευξης διηχητικών και υπερηχητικών πτήσεων.
- Ως μειονεκτήματα των αεριοστρόβιλων κινητήρων σε σχέση με τους παλινδρομικούς κινητήρες θεωρούνται:
 - η αυξημένη ειδική κατανάλωση καυσίμου.
 - Το μεγάλο κόστος κατασκευής, και
 - ο κίνδυνος ζημίας σε ζωτικά μέρη λόγω **αναρρόφησης ξένων σωμάτων (Foreign Object Damage, FOD)** κατά τη λειτουργία τους.
- Οι προσπάθειες βελτίωσης των κινητήρων αεριώθησης εστιάζονται:
 - στη βελτίωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και του λόγου παραγόμενης ώσης προς βάρος,

- στην αύξηση της παραγόμενης ώσης, του λόγου συμπίεσης και της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων από το θάλαμο, και
- στη μείωση της στάθμης θορύβου λειτουργίας και των εκπομπών καυσαερίων στην ατμόσφαιρα.
- Οι φάσεις λειτουργίας εμβολοφόρου και αεριοστρόβιλου κινητήρα είναι οι ίδιες. Στον εμβολοφόρο κινητήρα οι φάσεις πραγματοποιούνται διαδοχικά, η μία μετά την άλλη. Αντίθετα, στον αεριοστρόβιλο οι ίδιες φάσεις λειτουργίας πραγματοποιούνται ταυτόχρονα και συνεχώς, από ένα εξάρτημα αποκλειστικά η κάθε μία.
- Ο θεωρητικός κύκλος λειτουργίας του αεριοστρόβιλου κινητήρα στηρίζεται στο **θερμοδυναμικό κύκλο του Μπράιτον (Brayton)**. Σε σχέση με το θεωρητικό κύκλο λειτουργίας του εμβολοφόρου κινητήρα, όπου η διεργασία της καύσης είναι ισόχωρη, εδώ η καύση πραγματοποιείται υπό σταθερή (ή σχεδόν σταθερή) πίεση.
- Η εισαγωγή του αέρα, που πραγματοποιείται από ειδικό **αεραγωγό εισαγωγής (air inlet duct)**, ουσιαστικά αποτελεί τμήμα του αεροσκάφους και όχι του κινητήρα. Σκοπός του αεραγωγού είναι να κατευθύνει το ρεύμα του εισερχόμενου αέρα προς το συμπίεστή με τις λιγότερες δυνατές απώλειες και με ομοιόμορφη ροή.
- Ο **συμπιεστής (compressor)** συμπιέζει τον εισερχόμενο αέρα στον κινητήρα. Βρίσκεται ακριβώς μετά τον αεραγωγό εισαγωγής. Η λειτουργία του συμπιεστή έχει άμεση επίδραση στη συνολική απόδοση του κινητήρα. Οι τύποι των συμπιεστών που χρησιμοποιούνται στους αεριοστρόβιλους κινητήρες είναι:
 - **φυγοκεντρικής ροής,**
 - **αξονικής ροής,** ο οποίος αποτελείται από περιστρεφόμενο μέρος (ρότορας, rotor), και σταθερό μέρος (στάτορας, stator) τα σταθερά πτερύγια του οποίου έχουν τη γεωμετρία διαχύτη στην έξοδό τους, και
 - **αξονικής - φυγοκεντρικής ροής.**
- Ο **διαχύτης (diffuser)** κατευθύνει τη μάζα του αέρα, που εξέρχεται από το συμπίεστή, προς το θάλαμο καύσης, μετατρέποντας την κινητική ενέργεια του αέρα σε στατική πίεση. Στο διαχύτη η τιμή της πίεσης λαμβάνει τη μεγαλύτερη τιμή της μέσα στον κινητήρα.
- Ο βασικός σκοπός του **θαλάμου καύσης (combustion chamber)** είναι να επιτύχει την καύση συγκεκριμένης ποσότητας μείγματος αέρα (που

εξέρχεται από το συμπιεστή) και καυσίμου. Οι θάλαμοι καύσης διακρίνονται, ανάλογα με τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, στον:

- **Πολλαπλό τύπο,**
 - **Δακτυλιοειδή τύπο,** και
 - **Σώληνο-δακτυλιοειδή τύπο.**
- Ο **στρόβιλος (turbine)** παρέχει την απαιτούμενη ισχύ για την περιστροφή του συμπιεστή, απορροφώντας ενέργεια από τα καυσαέρια και μετατρέποντάς τη σε μηχανική. Συμπληρωματικά, εξασφαλίζει την κίνηση των **παρελκομένων (accessories)**. Στον ελικοστρόβιλο και τον αξονοστρόβιλο κινητήρα, ο στρόβιλος συμμετέχει στην κίνηση του έλικα. Χρησιμοποιείται αποκλειστικά στρόβιλος αξονικού τύπου. Οι αεριοστρόβιλοι που λειτουργούν με υψηλούς λόγους συμπίεσης χρειάζονται πολυβάθμιους στρόβιλους. Η βαθμίδα του στρόβιλου αποτελείται από:
 - Μία σειρά **σταθερών πτερυγίων (vanes)**. Η δίοδος που σχηματίζεται μεταξύ τους παρουσιάζει στένωση προς την πλευρά του χείλους εκφυγής τους, προσομοιάζοντας το σχήμα ενός ακροφυσίου. Τα σταθερά πτερύγια ακολουθούνται από
 - Μία **σειρά κινητών πτερυγίων (blades)**. Η διατομή της περιοχής μεταξύ δύο διαδοχικών από αυτά μειώνεται προς το χείλος εκφυγής τους.
 - Η προστασία των σταθερών και των κινητών πτερυγίων του στρόβιλου από τις υψηλές θερμοκρασίες των καυσαερίων επιτυγχάνεται, σε μεγάλο βαθμό με την ψύξη τους με αέρα.
 - Το σύστημα εξαγωγής οδηγεί τα καυσαέρια, μετά την τελευταία κινητή βαθμίδα στρόβιλου, στην ατμόσφαιρα. Έχει ως στόχο τη μεγιστοποίηση της κινητικής ενέργειας των καυσαερίων στην έξοδο, με αντίστοιχη μείωση της πίεσης στα επίπεδα της ατμοσφαιρικής. Το σύστημα εξαγωγής αποτελείται από:
 - **τον κώνο εξαγωγής (exhaust cone),**
 - **τον αγωγό εξαγωγής (exhaust duct ή jet pipe ή tailpipe),**
 - **το ακροφύσιο εξαγωγής (exhaust nozzle).**
 - Ο **θόρυβος** που παράγει ένας στροβιλοκινητήρας, είναι πιο ενοχλητικός, συγκριτικά με τον θόρυβο κινητήρων άλλων τύπων και οφείλεται σε μεγάλο βαθμό κυρίως στην ανάμειξη των θερμών καυσαερίων υψηλής

ταχύτητας με τον περιβάλλοντα αέρα. Στο στροβιλοανεμιστήρα κυριότερη πηγή θορύβου αποτελεί ο ανεμιστήρας. Η μέγιστη ένταση του θορύβου δημιουργείται, όταν το αεροπλάνο βρίσκεται σε γωνία 45° ως προς τον παρατηρητή, ενώ η μείωσή της δεν είναι τόσο ταχεία. Γενικά, χρησιμοποιούνται διατάξεις για τη μείωση του παραγόμενου θορύβου όπως ηχομονωτική επένδυση και αγωγοί που επιτυγχάνουν αύξηση της επιφάνειας ανάμιξης των θερμών καυσαερίων με τον περιβάλλοντα ψυχρό αέρα.

- Ο ευρύτερα διαδεδομένος τρόπος για την ταχεία επιβράδυνση του αεροσκάφους, μετά την προσγείωσή του, είναι η χρήση **αναστροφέων ώσης (thrust reversers)**. Το εξάρτημα αυτό δημιουργεί μία «δύναμη φρεναρίσματος», αλλάζοντας τη μορφή της διαδρομής στην έξοδο του αέρα παράκαμψης ή / και των καυσαερίων, έτσι ώστε αυτά να κατευθυνθούν προς το εμπρόσθιο τμήμα της ατράκτου.
- Η **μετάκαυση** πραγματοποιείται στο **μετακαυστήρα**, που τοποθετείται μεταξύ του στροβίλου και του ακροφυσίου εξαγωγής. Τα καυσαέρια που εξέρχονται από το στρόβιλο, αναμειγνύονται με ποσότητα καυσίμου, καίγονται και αποκτούν περισσότερη ενέργεια η οποία θα αξιοποιηθεί κατά την εκτόνωσή τους στο ακροφύσιο εξαγωγής. Το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της ταχύτητας εξαγωγής των καυσαερίων και, συνακόλουθα, της παραγόμενης ώσης από τον κινητήρα έως 100%, με δεδομένη την αυξανόμενη κατανάλωση καυσίμου.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

(2.1 Γενικά για την αεριώθηση)

1. Εξηγήστε τη λειτουργία της μηχανής του Ήρωνα.
2. Αναλύστε την εφαρμογή που βρίσκει ο τρίτος νόμος του Νεύτωνα στους κινητήρες αειώθησης.
3. Τα καυσαέρια ωθούν τον αέρα πίσω από τον κινητήρα και το αεροσκάφος κινείται στην αντίθετη κατεύθυνση.

ΣΩΣΤΟ ΛΑΘΟΣ

4. Ποιοι παράγοντες καθορίζουν την παραγόμενη ώση του κινητήρα;
5. Συμπληρώστε το κενό: Όσο είναι η τιμή της θερμοκρασίας εισαγωγής των καυσαερίων στο στρόβιλο τόσο περισσότερη ενέργεια απορροφάται από αυτόν.
6. Συμπληρώστε τα κενά: Ο κινητήρας αεριώθησης δίνει επιτάχυνση σε σχετικά μάζα αέρα ενώ ο ελικοφόρος κινητήρας δίνει επιτάχυνση σε μάζα αέρα.
7. Αναφέρετε τους τύπους αεριωθητών.
8. Γιατί ο πύραυλος έχει τη δυνατότητα να κινείται σε οποιοδήποτε ύψος. Μέσα και έξω από την ατμόσφαιρα;
9. Για ποιο λόγο πρέπει ο αθόδυλος να αποκτήσει με κάποιο τρόπο μεγάλη ταχύτητα για να παράγει ώση;
10. Ποια είναι τα βασικά μέρη του αεριοστρόβιλου κινητήρα και η λειτουργία τους;
11. Στον αεριοστρόβιλο κινητήρα η παραγωγή ώσης είναι ανάλογη του ποσού θερμότητας που εκλύεται κατά την καύση.

ΣΩΣΤΟ ΛΑΘΟΣ

12. Τι είναι ο λόγος πίεσης μηχανής (Engine Pressure Ratio – ERP);
13. Ο στροβιλοαντιδραστήρας επιτυγχάνει την καλύτερη ειδική κατανάλωσης καυσίμου σε σχέση με οποιονδήποτε άλλο αεριοστρόβιλο κινητήρα.

ΣΩΣΤΟ ΛΑΘΟΣ

14. Συμπληρώστε το κενό: στον ελικοστρόβιλο κινητήρα η προσφερόμενη από τα καυσαέρια ώση είναι πολύ