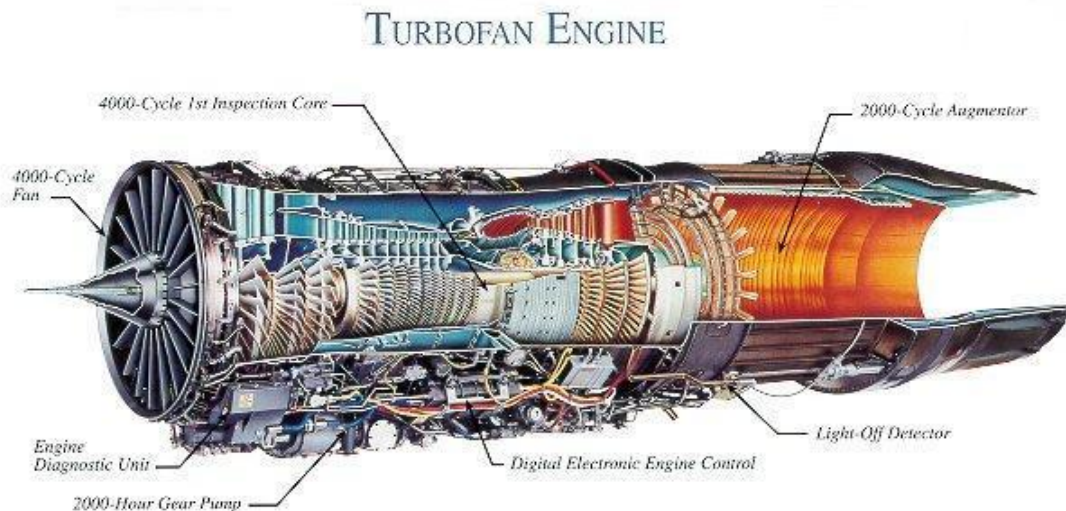


**ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ
ΙΔΡΥΜΑ (Α.Τ.Ε.Ι.) ΠΑΤΡΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΣΕ
ΠΟΛΙΤΙΚΑ ΚΑΙ ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΗ**



ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ

**ΜΑΥΡΟΘΑΝΑΣΗΣ
ΦΡΕΙΔΕΡΙΚΟΣ**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ

**ΕΥΠΟΛΙΑΣ
ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

ΠΑΤΡΑ 2006

Πρόλογος

Η συχνή χρήση των μηχανών εσωτερικής καύσης, εξαιτίας της εκτεταμένης χρήσης τους στο χώρο των αυτοκινήτων, κάνει άγνωστο το κόσμο των αεροστρόβιλων κινητήρων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρύτατα στο χώρο της αεροναυπηγικής και συγκεκριμένα για την προώθηση αεροσκαφών υψηλής ταχύτητας, πυραύλων, κ.ά.

Η ανάπτυξη των αεροστροβίλων σαν αεροπορικών κινητήρων υπήρξε τόσο γρήγορη της τελευταίες δεκαετίες, ώστε είναι δύσκολο να φανταστούμε ότι πριν μερικά χρόνια πολύ λίγοι άνθρωποι είχαν ακούσει για αυτόν τον τρόπο προώθησης. Και αυτό εξαιτίας των μικρών ταχυτήτων των αεροπλάνων που αρχικά εφοδιάζονταν με εμβολοφόρους αεροπορικούς κινητήρες. Έτσι η ανάπτυξη των αεροστρόβιλων κινητήρων ξεπέρασε το εμπόδιο αυτό.

Πρόωση είναι η δύναμη που μπορεί να κινήσει ένα αεροσκάφος ή ένα πύραυλο στον αέρα και χρησιμοποιείται για να υπερνικήσει την έλξη και το βάρος του. Αυτή η ώση δημιουργείται από την επιτάχυνση μιας μάζας αέρα μέσα στον κινητήρα προς την ατμόσφαιρα και παράγεται από κάποιο είδος προωθητικού συστήματος, όπως είναι και οι αεροστρόβιλοι κινητήρες.

Μέσα από αυτή τη πτυχιακή εργασία, μου δίνεται η ευκαιρία να αναφερθώ στον άγνωστο σε πολλούς και ενδιαφέρον κόσμο των αεροστρόβιλων κινητήρων (Gas turbine engines).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ

1.1. ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΚΙΝΗΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Έμπειροι μελετητές θα μπορούσαν να ρωτήσουν τους ανθρώπους, οι οποίοι περήφανα περιγράφουν πώς έφτασαν στην κατασκευή των στροβιλοκίνητων μηχανών μέσα από διαδοχικούς σχεδιασμούς : “Γιατί δεν σχεδιάσατε τη τελική σας μηχανή αμέσως, σώζοντας το χαμένο χρόνο των προκαταρκτικών φάσεων;”. Κάποιος άλλος μπορεί ομοίως να ρωτήσει : “Γιατί οι Ρωμαίοι δεν έφτιαξαν τους στροβίλους ύδατος; ”

Υπάρχουν δύο τύποι απαντήσεων σε αυτές τις ερωτήσεις, οι οποίοι είναι εξίσου διδακτικές. Στη μία, η απάντηση μπορεί να είναι ότι το καλύτερο αποτέλεσμα μπορεί να αποκαλυφθεί μέσα από δοκιμές και λάθη, μέσα από δομημένα πειράματα και μέσα από την ανάλυση. Αυτά τα βήματα μπορεί να πάρουν ώρες ή αιώνες, αλλά όταν αποκτιέται η γνώση, μπορεί να εφαρμοστεί στα αρχικά προβλήματα σχεδιασμού των στροβιλοκίνητων μηχανών χωρίς άλλες αλλαγές. Συνεπώς οι Ρωμαίοι είχαν την τεχνολογία να κατασκευάσουν έναν υψηλής απόδοσης στρόβιλο ύδατος. Χρειαζόντουσαν την δύναμη, την ισχύ του νερού και γι’ αυτό κατασκεύασαν τους νερόμυλους αλλά στερήθηκαν την κατανόηση της ρευστομηχανικής, η οποία αποκτήθηκε πολλούς αιώνες αργότερα.

Ο δεύτερος τύπος απάντησης είναι πιο σύνθετος και μπορεί να απαντήσει με μια ερώτηση : “Γιατί οι Ρωμαίοι δεν κατασκεύασαν τους αεροστρόβιλους κινητήρες; “. Το πρώτο μέρος της απάντησης είναι προφανές, δεν τους χρειαζόντουσαν. Εάν κάναμε την ίδια ερώτηση στους μηχανικούς του δέκατου ένατου αιώνα, τότε υπήρξε η ανάγκη για τις μηχανές, τότε υπήρξαν επαναλαμβανόμενες προσπάθειες για να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν αεροστρόβιλοι κινητήρες και τότε ήταν διαθέσιμα τα κατάλληλα υγρά και αέρια

καύσιμα, θα διαπιστώσουμε ότι η γνώση της ρευστομηχανικής ήταν ακόμη ελλιπής, ιδιαίτερα για το πώς να επιτύχουν τη διάχυση του ρευστού αποτελεσματικά. Επίσης χρειαζόντουσαν μεγάλη εξέλιξη σε άλλους τομείς όπως η μεταλλουργία, τα γρανάζια υψηλών ταχυτήτων και η καύση. Οι εξελίξεις σε μερικούς τομείς μπορεί να επέτρεπαν να κατασκευαστούν στροβιλοκίνητες μηχανές και αεροστρόβιλοι κινητήρες, αλλά θα οδηγούσαν στην ανάγκη για κατασκευή στροβίλων από υλικά που θα άντεχαν σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Η ιστορία των μηχανών δεν είναι επομένως μόνο για να την μελετάμε, αλλά είναι και το υπόβαθρο για την περαιτέρω ανάπτυξη τους. Φυσικά όποιος δεν είναι γνώστης της ιστορίας, δεν είναι βέβαιο ότι καταδικάζεται να την επαναλαμβάνει.

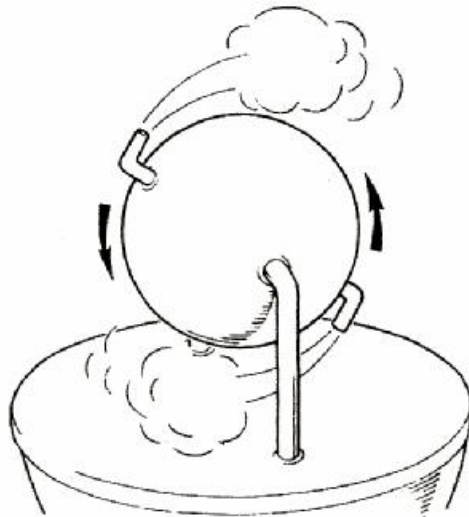
Θα πρέπει όμως να μαθαίνουμε από τα λάθη. Για παράδειγμα στο τέλος της δεκαετίας του '80 υπήρξε πολύς ενθουσιασμός για τους ακτινωτούς αεροστρόβιλους αεροσυμπιεστές. Κανένα όμως μέλος της ομάδας δεν γνώριζε να απαντήσει για την καταστρεπτική διάβρωση τους μετά από μια ώρα λειτουργίας. Οι σχεδιαστές εξέτασαν την ταχύτητα των στροφείων που θα απαιτούταν για να επιταχύνουν κάθε μικρό μόριο, για να περάσει μέσα από το στροφέιο. Τρία τέτοια προγράμματα έδειξαν ότι τα μικρά μόρια διάβρωναν τα κεραμικά των στροφείων και συνεπώς η κατασκευή ακτινωτών αεροστρόβιλων αεροσυμπιεστών ήταν ανέφικτη.

Οι σχεδιαστές δεν μπορούν να αποφύγουν τέτοιου είδους προβλήματα ένα δεν γνωρίζουν την ιστορία. Οι δεξιότητες των σχεδιαστών ακονίζονται από τις εμπειρίες τους, τις εμπειρίες των άλλων και από τη γνώση της ιστορίας.

1.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ

Οι Ρωμαίοι κατασκεύασαν τους νερόμυλους περίπου το 70 π.χ. για να αλέθουν το σιτάρι. Φαίνεται ότι ήταν οι αληθινοί ιδρυτές, γιατί τα κινέζικα γραπτά αναφέρουν την πρώτη χρήση των νερόμυλων εκεί, πολλά χρόνια αργότερα.

Οι αεριωθητές στη σημερινή τους μορφή είναι σχετικά πρόσφατη επιινόηση αλλά η αρχή στην οποία στηρίζεται η λειτουργία τους ήταν γνωστή από χιλιάδες χρόνια. Η πρώτη εφαρμογή της αεριώθησης έγινε από τον Έλληνα μαθηματικό και μηχανικό Ήρωνα τον δεύτερο π.χ. αιώνα στην Αλεξάνδρεια. Η συσκευή την οποία χρησιμοποίησε ονομαζόταν αιολοπύλη (παρακάτω σχήμα). Αποτελείται από κλειστό δοχείο γεμάτο με νερό και στρεπτή σφαίρα με δύο αντιδιαμετρικά ακροφύσια κεκαμένα σε αντίθετη κατεύθυνση και κάθετα προς τον άξονα περιστροφής της. Το νερό θερμαίνεται, ο παραγόμενος ατμός διαβιβάζεται στη σφαίρα και βγαίνει από τα ακροφύσια προκαλώντας έτσι την περιστροφή της. Λέγεται ότι ο Ήρωνας κατασκεύασε την αιολοπύλη μετά από παραγγελία των Αιγυπτίων ιερέων, οι θα την χρησιμοποιούσαν για την κίνηση των πυλών των ναών, κατά βούληση αθέατοι, ώστε να δημιουργούν την εντύπωση θαύματος.



Η μηχανή του Ήρωνα.

Ξέρουμε λίγα για τους στρόβιλους ατμού μέχρι να γράψει για αυτούς ο Taqi-al-Din, ένας ισλαμικός μηχανικός , που περιέγραφε ένα στρόβιλο ατμού ο οποίος κινούσε μια σούβλα. Είχε εμπνευστεί από τον Giovanni Branca ο οποίος πρότεινε έναν παρόμοιο στρόβιλο ατμού το 1629. Αυτός χρησιμοποιούσε την ενέργεια του ατμού, ο οποίος έπεφτε επάνω σε έναν στρεπτό δίσκο , που είχε κοιλότητες στην περιφέρεια του και τον έστρεφε. Το σχέδιο του Μπράνκα είναι αξιοσημείωτο γιατί για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκε ο στρεφόμενος δίσκος και για αυτό θεωρείται ο δημιουργός του στρόβιλου ατμού.

Τον 17^ο μ.Χ. αιώνα ο Ισαάκ Νεύτωνας διατύπωσε τους νόμους για την κίνηση των σωμάτων, μεταξύ των οποίων περιέχεται και η αρχή στην οποία βασίζεται η αερίωση. Σύμφωνα με το τρίτο αξίωμα του νόμου του Νεύτωνα :”Οι δυνάμεις τις οποίες εξασκούν δύο σώματα το ένα επάνω στο άλλο , είναι ίσες κατά μέτρο και αντίθετης φοράς”. Δηλαδή θα πρέπει σε κάθε δράση, να υπάρχει μια ίση και αντίθετη αντίδραση. Για την εξήγηση του νόμου σχεδιάστηκε μια άμαξα που κινιόταν με αερίωση. Η άμαξα είχε ένα δοχείο γεμάτο νερό, που θερμαινόταν, και ο ατμός που παραγόταν έβγαινε από το ακροφύσιο προς τα πίσω, δημιουργώντας μια ώθηση προς τα εμπρός. Φυσικά τέτοιο όχημα δεν κατασκευάστηκε ποτέ.

Ο μεγάλος Σουηδός μαθηματικός Leonard Euler (1707-1783), στην ακαδημία επιστημών Berlin ανέλυσε τον στρόβιλο του Ήρωνα και έβγαλε συμπεράσματα, μαζί με το γιο του Albert το 1750. Δημοσίευσε την διατύπωση του νόμου του Newton για τις στροβιλοκίνητες μηχανές, σήμερα παγκοσμίως γνωστή ως εξίσωση του Euler. Με αυτό τον τρόπο, το 1754, επετράπη μια πιο επιστημονική προσέγγιση για το σχεδιασμό στροβιλοκίνητων μηχανών από τις προηγούμενες μεθόδους.

Η μετακίνηση προς τις μοντέρνες στροβιλοκίνητες μηχανές ξεκίνησε πραγματικά τον 18^ο αιώνα. Το 1705 ο Denys Papin δημοσίευσε πλήρεις περιγραφές των φυγοκεντρικών ανεμιστήρων και αντλιών που είχε αναπτύξει. Τη

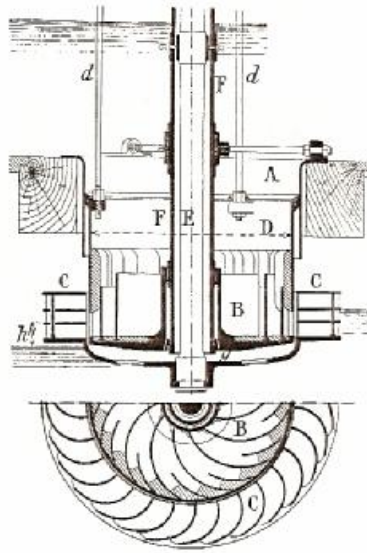
περίοδο από το 1737 έως το 1753 δημοσιεύτηκαν στη Γαλλία, από το Bernard Forest de Belidor, τέσσερις τόμοι βιβλίων που περιέγραφαν τους νερόμυλους με κυρτά κινούμενα πτερύγια, οι οποίοι ήταν πρόδρομοι αυτών που σήμερα ονομάζουμε Γαλλικοί στρόβιλοι.

Η μελέτη των στροβιλοκίνητων μηχανών ξεκίνησε, από τον Βρετανό μελετητή John Smeaton (1724-1792), από το 1752 και μετά. Έδειξε ότι η αποδοτικότητα των υπερυψωμένων νερόμυλων υπερβαίνει το εξήντα τοις εκατό έναντι των συνηθισμένων που δεν ξεπερνά το τριάντα τοις εκατό. Καθόρισε επίσης τη δύναμη ως ισοδύναμη του βαθμού ανύψωσης ενός βάρους, μια έννοια που είναι ακόμη θεμελιώδης στη θερμοδυναμική.

Η μελέτη της κίνησης του ρευστού μέσα σε σωλήνα και η μελέτη των ιδανικών νερόμυλων ξεκίνησε το 1767 από τον Jean Charles Borda. Μέχρι εκείνο το σημείο δεν υπήρχαν καθόλου στρόβιλοι. Η λέξη στρόβιλος ορίστηκε το 1822 από έναν άλλο Γάλλο, τον Claude Burdin, από την λατινική της ρίζα και χρησιμοποιείται " για κάτι που περιστρέφεται".

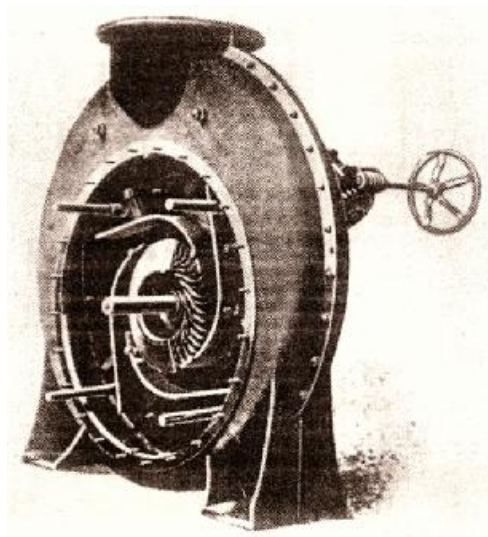
Το 1843, στις Ηνωμένες Πολιτείες, ο Elwood Morris παρήγαγε έναν στρόβιλο τύπου Fourneyron και τον ακολούθησε κατασκευάζοντας έναν παρόμοιο στρόβιλο ο Uriah A. Boyden το 1845. Αυτός πρόσθεσε έναν ακτινωτό διαχύτη ο οποίος ανέβασε την απόδοση στο 88 τοις εκατό και οι στρόβιλοι που κατασκεύαζε απέδιδαν περισσότερους από 190 hp.

Το 1851, ο James B. Francis μαζί με τον Boyden άρχισε μια σειρά δοκιμών με στροβίλους. Οι υψηλής απόδοσης ακτινωτοί στρόβιλοι που κατασκευάστηκαν μέχρι το 1875 είναι σήμερα γνωστοί παγκοσμίως ως στρόβιλοι του Francis.



Στρόβιλος τύπου Fourneyron.

Το 1846, στη Βρετανία, ο James Thomson άρχισε να δουλεύει στους ακτινωτούς υψηλής απόδοσης στρόβιλους με σπειροειδές περίβλημα και εσωτερικά οδηγά πτερύγια (Inlet Guide Vanes). Κατοχύρωσε τους στρόβιλους αυτούς ως στρόβιλους Vortex το 1850 παίρνοντας το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας και συνέχισαν να παράγονται για ογδόντα χρόνια. Το 1883, ο Osborne Reynolds, δημοσίευσε τις μελέτες του για την μεταβολή από τη στρωτή στη στροβιλώδη ροή και το 1892 ο Rayleigh εισήγαγε την διαστατική ανάλυση.



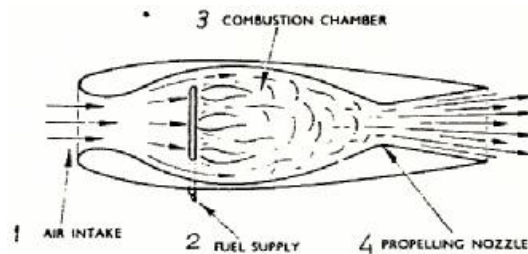
Στρόβιλος Vortex

Μετά τις πρώτες σκέψεις για την κατασκευή αεριωθητών και τη θεωρητική θεμελίωση της δυνατότητας πρόωσης με αντίδραση από τον Νεύτωνα τον 17^ο αιώνα δεν επιτεύχθηκε ουσιαστική πρόοδος μέχρι την αρχή του 20^{ου} αιώνα.

Μια σημαντική αλλά άκαρπη προσπάθεια ξεκίνησε το 1895 στις Ηνωμένες Πολιτείες, όταν ο Sanford Moss επηρεασμένος από τις θερμοδυναμικές απόψεις του καθηγητή Fred Hesse's επινόησε το θερμοδυναμικό κύκλο με σταθερή πίεση (κύκλος Brayton ή Joule). Έγραψε το σχέδιο του για έναν αεροστρόβιλο κινητήρα το 1900 και έκανε το διδακτορικό του πάνω σε αυτό, στα εργαστήρια του πανεπιστημίου του Cornell στις Η.Π.Α. Η πρώτη αεροπορική εφαρμογή της κατασκευής ήταν η κίνηση υπερσυμπιεστών. Ο Moss έγινε προϊστάμενος ομάδας τεχνικών στην εταιρεία General Electric το 1903 και διεξήγαγε πειράματα στο σχεδιασμό συμπιεστών. Συνεργάστηκε με τους καθηγητές Thomson και Rice και έβγαλαν συμπεράσματα για την διάχυση των αερίων σε υποηχητικούς και υπερηχητικούς συμπιεστές. Τελείωσε την εργασία του στην General Electric το 1907, αλλά ο υπερσυμπιεστής που είχε σχεδιάσει κατασκευάστηκε το 1918 και μάλιστα χρησιμοποιήθηκε το 1928 στον κινητήρα του αεροσκάφους Απάτσι της Ράιτ, το οποίο κατάρριψε το ρεκόρ ύψους. Ο Moss έγινε ερευνητής μηχανικός στους στροβίλους και συνέχισε να δουλεύει στους αεροστρόβιλους κινητήρες αεροσκαφών μέχρι τη δεκαετία του '40.

Υπήρξαν πολλές άκαρπες προσπάθειες να κατασκευαστούν αεροστρόβιλοι κινητήρες τις δύο πρώτες δεκαετίες του περασμένου αιώνα όπως ο Adolph Vogt (1904) και ο Hugo Junkers. Η κατασκευή τους όμως καθυστέρησε γιατί οι κατασκευαστές προσπαθούσαν να επιτύχουν καλύτερα χαρακτηριστικά λειτουργίας και ειδική κατανάλωση καυσίμου στους υπάρχοντες αεροπορικούς κινητήρες, με αποτέλεσμα να οδηγούνται σε πολύπλοκα και ανεφάρμοστα σχέδια λόγω της ελλιπούς τεχνολογικής ανάπτυξης.

Ο Γάλλος μηχανικός Ρενέ Λορέν πήρε το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1913 για ένα κινητήρα αεριώθησης, που στην πραγματικότητα ήταν ένας αθόδουλος, που εκείνη την εποχή ήταν αδύνατο να κατασκευαστεί.



1. Εισαγωγή αέρα
2. Παροχή καυσίμου
3. Θάλαμος καύσης
4. Στένωση (προωθητικό ακροφύσιο)

Ο αεριωθητής του Λόρεν.

Το 1926 ο Griffith ανέπτυξε μια θεωρία για την σχεδίαση ενός στροβίλου που θα βασιζόταν στη ροή αέρα γύρω από πτερύγια με κατάλληλη αεροτομή. Πρότεινε έναν αεροστροβίλο αξονικής ροής με πολλές βαθμίδες και με μια ιδανική συναρμογή συμπιεστού και στροβίλου, βαθμίδα προς βαθμίδα. Τα σχέδια ήταν πολύπλοκα για την εποχή τους και δεν οδήγησαν σε κανένα πρακτικό αποτέλεσμα.

Την δεκαετία του '40 η επιτυχή ανάπτυξη των αξονικών αεροστροβίλων κινητήρων γινόταν ταυτόχρονα αλλά ανεξάρτητα από τέσσερις ανθρώπους : τον Whittle στην Βρετανία, και τους Von Ohain, Wagner, Schelp στη Γερμανία.

Ο Frank Whittle ενώ ήταν ακόμη μαθητής στο Βασιλικό Αεροπορικό Κολλέγιο μελέτησε τη κίνηση αεροπλάνου με αεριώθηση. Το 1930 υπέβαλλε

μελέτη για την κατασκευή ενός αεροστρόβιλου και πήρε το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, αλλά δεν ήταν ο πρώτος ο οποίος πέτυχε την πρώτη πτήση. Ο αεροστρόβιλος που είχε σχεδιάσει είχε έναν φυγοκεντρικό συμπιεστή , θάλαμο καύσης και ένα στρόβιλο δύο βαθμίδων με κεραμικά κινητά πτερύγια. Οι προτάσεις του απορρίφθηκαν από όλους τους κατασκευαστές αεροκινητήρων στη Βρετανία (στην πραγματικότητα δεν υπήρχε κανένας κατασκευαστής) και δεν του δόθηκε καμιά κυβερνητική υποστήριξη εκτός από σπουδές στο Cambridge μέχρι το 1936.

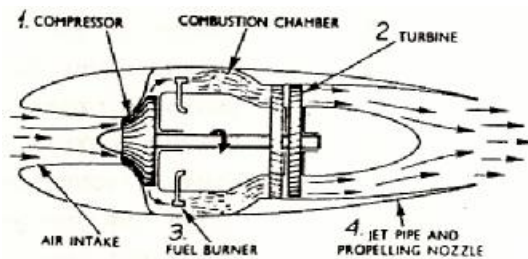
Ίδρυσε την Power Jets το 1935 μαζί με άλλους αλλά παρεγράφηκε το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας του επειδή δεν μπορούσε να αντέξει το οικονομικό κόστος (πέντε λίρες Αγγλίας) που απαιτήθηκε για να το ανανεώσει. Τα κινητά πτερύγια καθώς και η μεταβλητή γωνία των κινητών πτερυγίων έδωσε στους Βρετανικούς κινητήρες μεγαλύτερη απόδοση απ' αυτούς των Γερμανών.

Ο Whittle ήθελε να φτιάξει ένα θάλαμο καύσης με περίπου δέκα φορές μεγαλύτερη δυνατότητα καύσης για την καύση υγρών καυσίμων και να υπερνικήσει τις αποτυχίες των στροβίλων του. Λύση στο πρόβλημα της καύσης έδωσε ο Ian Lubbock της Shell το 1940 και ένα χρόνο αργότερα κατασκευάστηκαν κινητά πτερύγια από κράμα νικελίου, χρωμίου, κοβαλτίου λύνοντας αποτελεσματικά τα προβλήματα του Whittle.

Το 1939 ανατέθηκε από τη Βρετανική κυβέρνηση στην Power Jets η κατασκευή ενός αεριωθητή για την κίνηση ενός πειραματικού αεροπλάνου. Οι τεχνικοί της Power Jets και ο Whittle κατασκεύασαν τον κινητήρα W1 που δοκιμάστηκε με επιτυχία σε πτήση το 1941. Έπειτα ο κινητήρας του Whittle αναπτύχθηκε από την Rolls Royce.

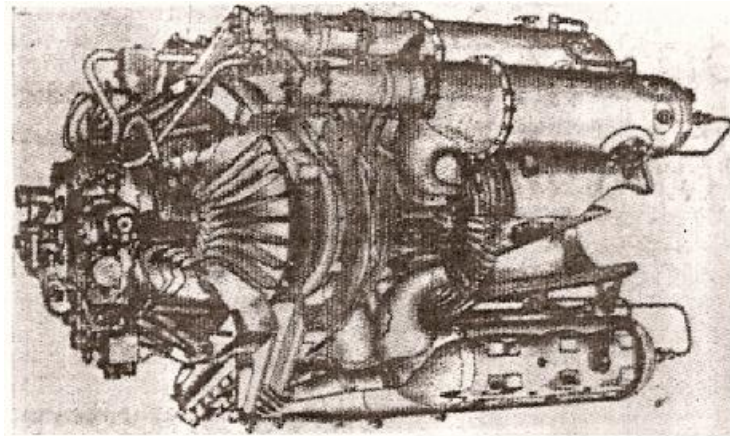
Μέχρι το 1941 οι Η.Π.Α. δεν είχαν καμία πρόοδο στην κατασκευή αεριωθητών εκτός από την επιτυχία στην παραγωγή στροβιλοκίνητων υπερσυμπιεστών. Το 1941 με βάση μια συμφωνία με την Βρετανία για την

ανταλλαγή ιδεών παραλήφθηκε ο κινητήρας του Whittle για περαιτέρω μελέτη και ανάπτυξη. Η κατασκευή του κινητήρα ανατέθηκε στην εταιρεία General Electric και η κατασκευή του πειραματικού αεροπλάνου για την δοκιμή του κινητήρα στην εταιρεία BELL. Το 1942, ένα χρόνο αργότερα από την πρώτη Βρετανική πτήση, είχαμε την πρώτη πτήση με το αεροσκάφος XP-59 A και κινητήρα GE-1A. Το 1944 κατασκευάστηκε και δοκιμάστηκε με επιτυχία, στις Η.Π.Α. ο πρώτος αεριωθητής από την εταιρεία Westinghouse. Οι αεριωθητές αυτοί είχαν συμπιεστή αξονικής ροής και δακτυλιοειδή θάλαμο καύσης.



1. Συμπιεστής
2. Στρόβιλος
3. Εγχυτήρας καυσίμου
4. Σωλήνας εξαγωγής και προωθητικό ακροφύσιο

Αεροστροβίλος τύπου Whittle

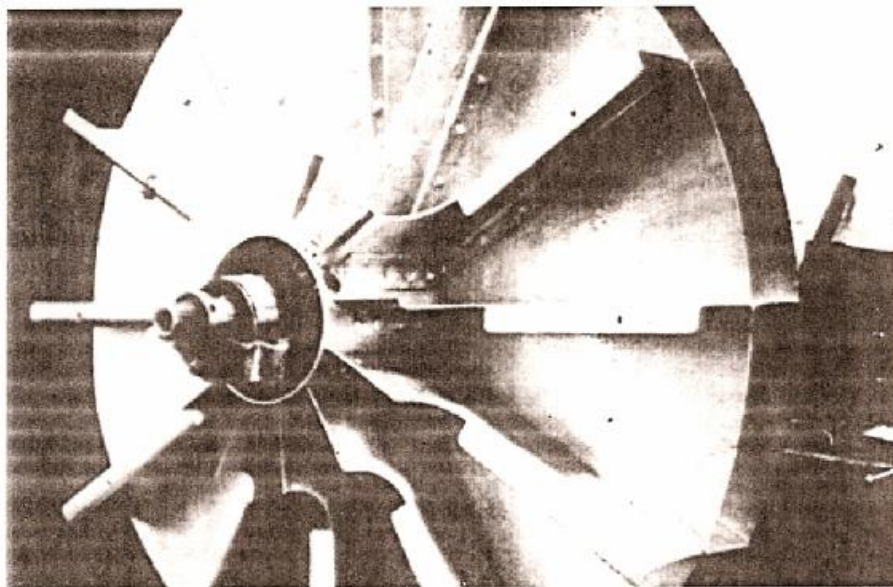


Whittle W2/700 αεροστροβίλος κινητήρας 1943

Ο αντίστοιχος ερευνητής του Whittle στη Γερμανία ήταν ο Hans Von Ohain. Πήρε το πτυχίο Φυσικής το 1936 και αμέσως προσελήφθει από την

εταιρεία Heinkel. Αν και άρχισε δοκιμές αργότερα από τον Whittle πέτυχε την πρώτη λειτουργία του κινητήρα του και την πρώτη του πτήση νωρίτερα. Αυτό γιατί είχε καλύτερη υποστήριξη από την εταιρεία του, η οποία ήθελε να κατασκευάσει το πιο γρήγορο αεροπλάνο του κόσμου και εξαιτίας των σωστών αποφάσεων του.

Ήξερε ότι για να έχει τη συνεχή υποστήριξη της εταιρείας του θα έπρεπε να παρουσιάσει κάτι αξιόλογο. Κατασκεύασε έναν αεριωθητή, παρόμοιο με αυτόν του Whittle, με τη διαφορά ότι ο συμπιεστής είχε πτερύγια μόνο από τη μια πλευρά του δίσκου. Είχε έναν το φυγοκεντρικό συμπιεστή, έναν στρόβιλο φτιαγμένο από χάλυβα και απόφυγε το πρόβλημα της καύσης με υγρά καύσιμα χρησιμοποιώντας υδρογόνο για την πρώτη λειτουργία του το 1937. Με μεγαλύτερη υποστήριξη από την εταιρεία Heinkel ήταν σε θέση να λύσει το πρόβλημα της καύσης πριν από τον Whittle και πέτυχε την πρώτη πτήση αεριωθούμενου αεροπλάνου, το Heinkel-178, τον Αύγουστο του 1939.



Φυγοκεντρικός συμπιεστής Von Ohain

Ο Herbert Wagner καθηγητής αεροδυναμικής, το 1935, πήρε την άδεια από την Junkers και σχεδίασε έναν ελικοστρόβιλο κινητήρα. Το 1937 μαζί με τον

Muller σχεδίασαν έναν κινητήρα με συμπιεστή αξονικής ροής, πέντε βαθμίδων, ένα μονό δαχτυλοειδή θάλαμο καύσης και ένα στρόβιλο δύο βαθμίδων ο οποίος συμπεριλήφθηκε στο πρόγραμμα της Γερμανικής Αεροπορίας.

Ο Helmet Schelp πήγε για σπουδές στις Η.Π.Α. και πήρε μεταπτυχιακό στο ινστιτούτο τεχνολογίας Stevens. Επέστρεψε στην Γερμανία το 1936, προσελήφθηκε στο πρόγραμμα της Γερμανικής Αεροπορίας και μελέτησε τα προβλήματα αεροσκαφών υψηλής ταχύτητας. Γνώριζε τις εργασίες άλλων μελετητών και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ένας αεροστρόβιλος κινητήρας με συμπιεστή αξονικής ροής θα ήταν η καλύτερη λύση. Μαζί με τον Mauch επισκέφθηκε τους σημαντικότερους Γερμανικούς κατασκευαστές κινητήρων, όπως B.M.W. και Junkers και τους έπεισε να αναλάβουν την ανάπτυξη και την κατασκευή αεριωθητών αξονικής ροής. Οι εταιρείες έκαναν σημαντικότερη εργασία και οι κινητήρες τους και τα σχέδια τους χρησιμοποιήθηκαν σαν πρότυπα από τους νικητές του Β' Παγκόσμιου Πολέμου. Από τους πιο ενδιαφέροντες κινητήρες που σχεδιάστηκαν ήταν ο Junko 004. Είχε συμπιεστή αξονικής ροής οχτώ βαθμίδων, λόγω πίεσης 3:1, ισεντροπική απόδοση 78% και στρόβιλο μιας βαθμίδας με εξαγωγή μεταβλητής διατομής. Ο θάλαμος καύσης ήταν επιχρωμιωμένος με ασάλι και τα κινητά πτερύγια των στροβίλων που αρχικά ήταν συμπαγή, έγιναν από κράμα μαγγανίου και ψύχονταν εσωτερικά με αέρα.

Ο Griffith, του Βρετανικού Βασιλικού Ιδρύματος Αεροπλάνων, επηρεασμένος από τους αξονικούς συμπιεστές, σχεδίασε ένα συμπιεστή αξονικής ροής οχτώ βαθμίδων, ο οποίος λειτούργησε το 1938 αλλά απέτυχε μηχανικά. Ο Armstrong Siddeley λειτούργησε ένα κινητήρα το 1939, ακολουθώντας τα σχέδια του Griffith, ο οποίος είχε πολλούς άξονες, κάτι που χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα σε μεγάλους αεροστρόβιλους κινητήρες.

Τα σχέδια των γερμανικών κινητήρων του Β' Παγκοσμίου Πολέμου παραλήφθηκαν από τους Δυτικούς Συμμάχους και τους Ρώσους, μαζί με

πολλούς Γερμανούς τεχνικούς και αποτέλεσαν την βάση της ανάπτυξης πολλών νέων σειρών αεριωθητών.

Μετά το 1950 άρχισαν να κατασκευάζονται συμπιεστές αξονικής ροής με δυνατότητα μεταβολής της γωνίας προσβολής των πτερυγίων και αεροστρόβιλοι με διπλό άξονα. Για την αύξηση της ώσης επινοήθηκαν τα συστήματα μετάκαυσης, τα οποία αρχικά χρησιμοποιήθηκαν από τους Γερμανούς και τους Άγγλους αλλά τελειοποιήθηκαν από τους Αμερικανούς.

Κατά την δεκαετία μετά το 1940 αναπτύχθηκε η κατασκευή αεροστροβίλων, των οποίων η διαθέσιμη ενέργεια δεν προοριζόταν για την παραγωγή αεριώθησης αλλά για την κίνηση μιας έλικας. Αυτοί οι κινητήρες ονομάζονται ελικοστρόβιλοι και κατασκευάστηκαν αρχικά από την Rolls Royce και την General Electric.

Στα μεταφορικά αεροσκάφη χρησιμοποιήθηκαν αεροστρόβιλοι διπλής ροής ή αλλιώς αεροστρόβιλοι με ανεμιστήρα. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτών των κινητήρων είναι η χαμηλή ειδική κατανάλωση, ο μικρότερος θόρυβος λειτουργίας και το μικρότερο βάρος για την ίδια ώση σε σχέση με τους αεροστρόβιλους απλής ροής.

Κατά την δεκαετία μετά το 1960 αναπτύχθηκαν κινητήρες διπλής ροής όλων των μεγεθών ώσης απλού, διπλού και τριπλού άξονα. Το ποσοστό δευτερεύουσας σε σχέση με την πρωτεύουσα ροή έχει φθάσει μέχρι 8:1 και ο βαθμός συμπίεσης μέχρι 25:1. Την ίδια δεκαετία αναπτύχθηκαν οι κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν από τα υπερηχητικά μεταφορικά αεροπλάνα όπως ο αεροστρόβιλος Όλυμπος 593 με ώση 35.000 - 40.000 λίβρες, που κατασκευάστηκε από την Rolls Royce για το Κογκόρντ.

Πολλές εταιρίες που ασχολήθηκαν με την ανάπτυξη αεροστροβίλων κινητήρων πτώχευσαν. Παρέμειναν μόνο τρεις μεγάλες εταιρείες, η General

Electric και Pratt & Whitney στις Η.Π.Α. και η Rolls Royce στην Βρετανία, των οποίων ο μεγαλύτερος αεροστρόβιλος στα τέλη του αιώνα πλησίασε σε ώση τα 45 KN. Έχουν υπάρξει μόνο τρεις γενιές αεροκινητήρων από το 1946 και είναι τόσο δαπανηρό να αναπτυχθεί ένας καινούργιος κινητήρας, ώστε οι εταιρείες έχουν διαμορφώσει συμμαχίες με εταιρείες που μέχρι πρόσφατα ήταν ανταγωνιστές.

1.3. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

Σύμφωνα με την θεμελιώδη εξίσωση της στροβιλομηχανής έχουμε δύο κατηγορίες στροβιλομηχανών:

1. τις μηχανές απορροφήσεως μηχανικής ενέργειας και
2. τις μηχανές παραγωγής μηχανικής ενέργειας .

Οι μηχανές της πρώτης κατηγορίας (ανεμιστήρες, συμπιεστές και αντλίες) χαρακτηρίζονται ως συμπιεστές και οι μηχανές της δεύτερης κατηγορίας ονομάζονται κατά κανόνα στρόβιλοι. Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν και οι αεριωθητές. Οι μηχανές που περιλαμβάνονται σε κάθε κατηγορία , επειδή έχουν κοινά γνωρίσματα, χρησιμοποιούνται τόσο για συμπιεστά όσο και για συμπιεστά ρευστά.

1.4. ΕΙΔΗ ΑΕΡΙΩΘΗΤΩΝ

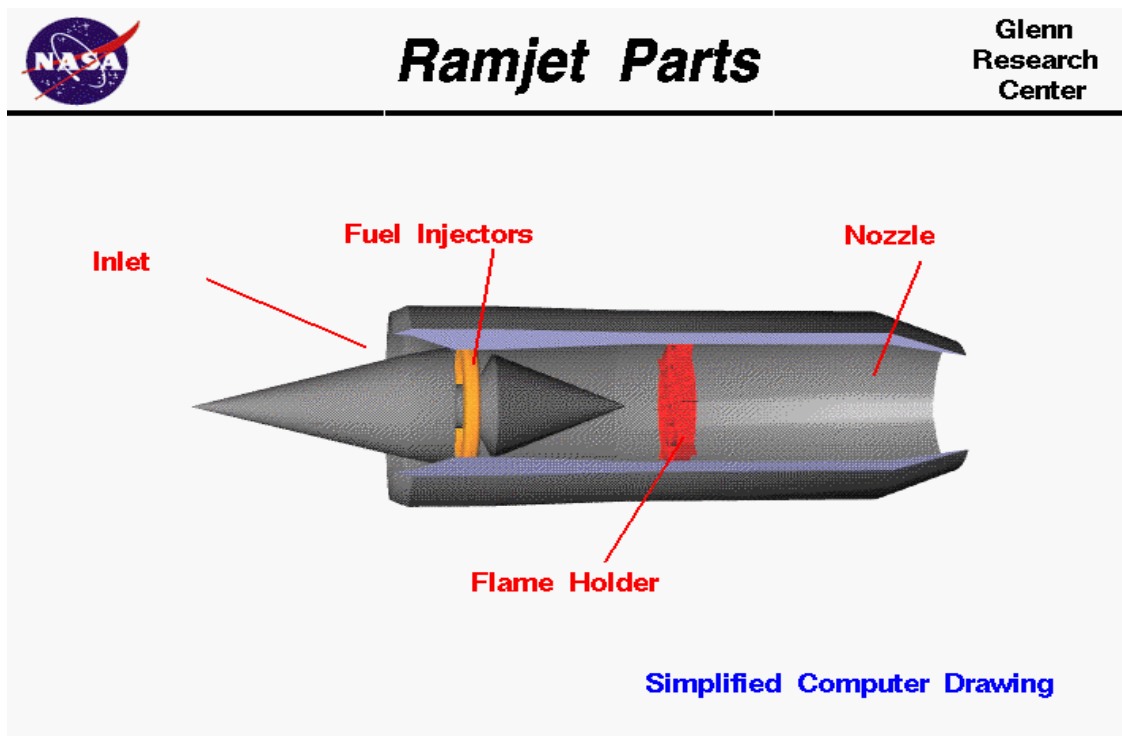
Τα είδη των αεριωθητών διαφέρουν μόνο ως προς τον τρόπο, με τον οποίο επιταχύνουν την ροή και την επιτάχυνση του αέρα μέσα τους. Έχουμε διάφορα είδη αεριωθητών όπως:

- Ø Αθόδυλος (Ram jet)
- Ø Παλμικός αθόδυλος (Pulse jet)
- Ø Αεροστρόβιλος (Gas turbine)
- Ø Πύραυλος (Rocket)

- ∅ Στροβιλο-αθόδυλος (Turbo-ram jet)
- ∅ Πυραυλο-στροβίλος (Turbo-rocket)

1.4.1. ΑΘΟΔΥΛΟΣ (Ram jet)

Ονομάζεται και αεροθερμοδυναμικός αυλός. Είναι ο πιο απλός τύπος αεριωθητή, δεν έχει κινούμενα μέρη και αποτελείται από τον αεραγωγό, τον θάλαμο καύσης ο οποίος περιλαμβάνει τους ψεκαστήρες καυσίμου και τον διατηρητή της φλόγας και το ακροφύσιο.



Αθόδυλος

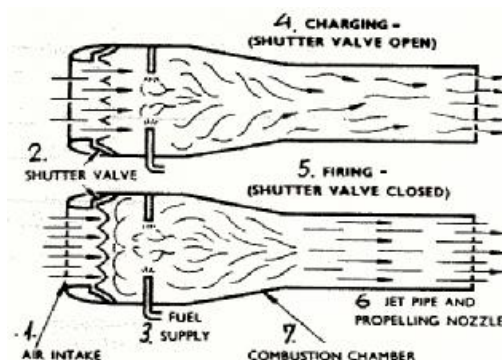
1. Εισαγωγή (Inlet)
2. Ψεκαστήρες καυσίμου (Fuel Injectors)
3. Διατηρητής φλόγας (Flame Holder)
4. Προωθητικό ακροφύσιο

Για υπερηχητικές πτήσεις το ιδανικό σύστημα προώθησης είναι ο αθόδουλος. Ο αθόδουλος χρησιμοποιεί την αρχική ταχύτητα ενός αεροσκάφους για να αναρροφήσει αέρα, γι' αυτό και δεν έχει κινητά μέρη. Ο εισερχόμενος αέρας αυξάνει τη πίεση του και μειώνεται η ταχύτητα του μέσα στον αποκλίνοντα αγωγό. Το καύσιμο ψεκάζεται για καύση και η φλόγα διατηρείται με την βοήθεια του κόκκινου δακτυλίου, κάτι το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στα συστήματα μετάκαυσης (Afterburner) των μαχητικών αεροσκαφών. Τα καυσαέρια περνούν μέσα από το ακροφύσιο, του οποίου το σχήμα επιταχύνει τη ροή τους και παράγει την ώση. Η ανάγκη για αρχική επιτάχυνση για να αρχίσει τη λειτουργία του, τον κάνει ακατάλληλο για αυτόνομη αεροπορική πρόωση.

1.4.2. ΠΑΛΜΙΚΟΣ ΑΘΟΔΥΛΟΣ (Pulse jet)

Ο παλμικός αθόδουλος είναι παρόμοιος με τον αθόδουλο εκτός από μια σειρά ελατηριωτών βαλβίδων εισαγωγής που βρίσκονται μπροστά από το τμήμα της καύσης. Είναι πιο ισχυρής κατασκευής λόγω των υψηλότερων πιέσεων που αναπτύσσονται. Χρησιμοποιεί διακεκομμένη καύση και έτσι μπορεί να ξεκινήσει από την ηρεμία.

Ο αέρας εισέρχεται από τις ανοικτές βαλβίδες και περνά στο θάλαμο καύσης, όπου καίγεται το καύσιμο που ψεκάζεται από τους ψεκαστήρες. Η εκτόνωση των καυσαερίων που δημιουργείται προκαλεί άνοδο της πίεσης και κλείνει τις βαλβίδες για να αποτρέψει τη φλόγα να εξέλθει από την εισαγωγή, ενώ τα καυσαέρια επιταχύνονται προς τα πίσω. Η πτώση πίεσης που ακολουθεί, επιτρέπει το άνοιγμα των βαλβίδων για την εισαγωγή αέρα και την επανάληψη του κύκλου.



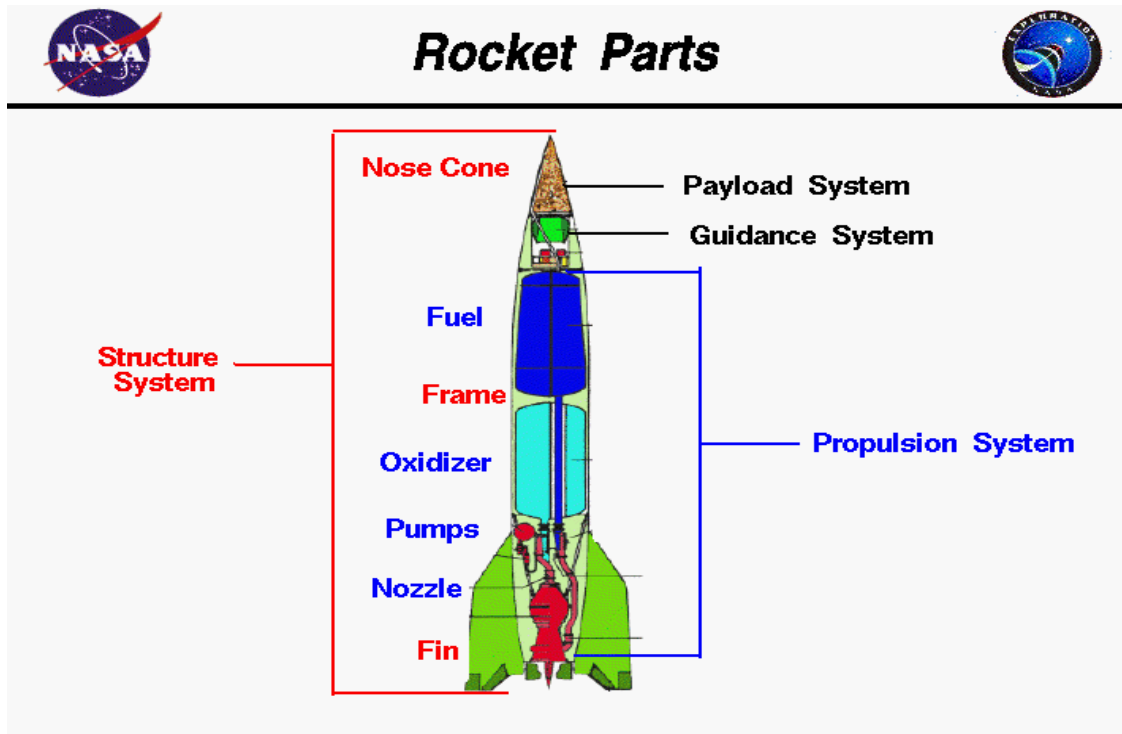
Παλμικός αθόδουλος

1. Εισαγωγή αέρα
2. Ελατηριωτές βαλβίδες εισαγωγής
3. Παροχή καυσίμου
4. Πλήρωση
5. Έκρηξη
6. Σωλήνας εξαγωγής και προωθητικό ακροφύσιο
7. Θάλαμος καύσης

Αυτός ο τύπος κινητήρα χρησιμοποιήθηκε στις Γερμανικές βόμβες V-1 στον Β' Παγκόσμιο πόλεμο και επιτύγχανε 40 κύκλους το λεπτό. Είναι ακατάλληλος για αεροπορική χρήση λόγω της μικρής του απόδοσης, των υψηλών κραδασμών και υψηλών θορύβων που παρουσιάζει.

1.4.3. ΠΥΡΑΥΛΟΣ (Rocket)

Ο πύραυλος διαφέρει από τους άλλους αεριωθητές στο ότι δεν χρησιμοποιεί τον ατμοσφαιρικό αέρα και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρόωση έξω από την ατμόσφαιρα. Αποτελείται από τέσσερα συστήματα, το δομικό σύστημα (Structure system), το σύστημα ωφέλιμων φορτίων (Payload system), το σύστημα καθοδήγησης (Guidance system) και το σύστημα προώθησης (Propulsion system). Εμείς θα ασχοληθούμε με το σύστημα προώθησης. Υπάρχουν δύο κατηγορίες πυραύλων, αυτοί που χρησιμοποιούν υγρά καύσιμα και αυτοί που χρησιμοποιούν στερεά καύσιμα. Στους πυραύλους που χρησιμοποιούν υγρά καύσιμα, το οξυγόνο και το καύσιμο αποθηκεύονται σε ξεχωριστούς χώρους, και ψεκάζονται στο θάλαμο καύσης όπου καίγονται για την παραγωγή του ρεύματος εξαγωγής των καυσαερίων. Στους πυραύλους που χρησιμοποιούν στερεά καύσιμα, το οξυγόνο και το καύσιμο αναμιγνύονται μαζί σε ξεχωριστό χώρο και είναι απαραίτητη η ύπαρξη σπινθήρα για την έναρξη της καύσης.



Πύραυλος

1.4.4. ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ (Gas turbine)

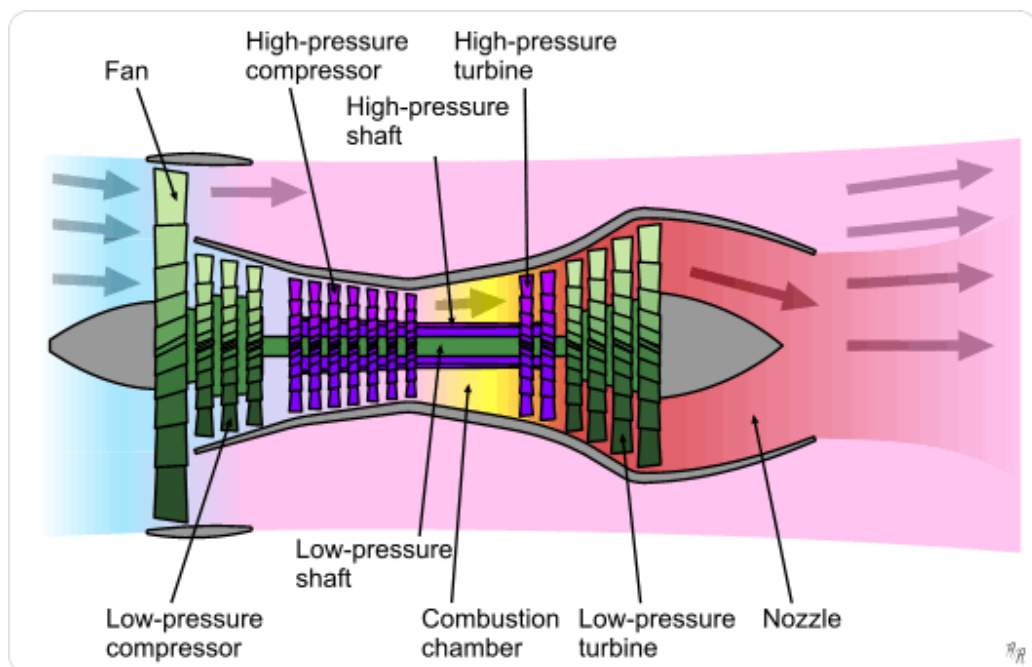
Λόγω των προβλημάτων των προηγούμενων αεριωθητών, σήμερα χρησιμοποιούνται οι αεροστρόβιλοι κινητήρες οι οποίοι επιτρέπουν την παραγωγή ώσης και σε χαμηλές ταχύτητες. Ο αεροστρόβιλος αναρροφά αέρα και μετά την συμπίεση του, τον καίει με το καύσιμο που ψεκάζεται και έτσι προκαλεί την επιτάχυνση του.

Ο αεροστρόβιλος αποτελείται από δύο κινούμενα μέρη, τον συμπιεστή και τον στρόβιλο, και έναν ή περισσότερους θαλάμους καύσης. Ο αέρας συμπιέζεται στον συμπιεστή, καίγεται στους θαλάμους καύσης και τα καυσαέρια που δημιουργούνται, αφού προσδώσουν μέρος της ενέργειάς τους για την κίνηση του

στροβίλου, εξέρχονται από τον κινητήρα. Ο στροβίλος μέσω ενός άξονα κινεί τον συμπιεστή.

Τα προβλήματα σε αυτού του είδους τους αεριωθητές προέρχονται από τις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας των θαλάμων καύσης και του στροβίλου, τις μεταβλητές ποσότητες αέρα που διέρχονται μέσα από αυτούς και τις δυσκολίες σχεδίασης του τμήματος εξαγωγής.

Για χαμηλές ταχύτητες πτήσης χρησιμοποιούνται κυρίως οι ελικοστροβίλοι (Turbo-prop) κινητήρες ενώ για μεγαλύτερες ταχύτητες πτήσης οι απλοί αεροστροβίλοι. Πιο σύγχρονοι κινητήρες είναι οι αεροστροβίλοι διπλής ροής (Turbo-fan), οι οποίοι δημιουργούν ροή μεγαλύτερων μαζών αέρα με μικρότερη επιτάχυνση, αυξάνοντας έτσι τη απόδοσή τους. Ακόμη καλύτερη απόδοση έχουν οι αεροστροβίλοι διπλού ή και τριπλού άξονα.



Αεροστροβίλος διπλής ροής δύο αξόνων (Turbo-fan engine)

Οι αεροστρόβιλοι διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες:

- Ανάλογα με τον τρόπο εκμετάλλευσης της ενέργειας:
 1. Αεροστρόβιλους που χρησιμοποιούν την ενέργεια που παρέχεται από την καύση για την δημιουργία ορμορεύματος και την παραγωγή ώσης (Turbo-jet, Turbo-fan).
 2. Ελικοστρόβιλους που χρησιμοποιούν ολόκληρο ή μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που παρέχεται από την καύση για την κίνηση κοινής έλικας (Turbo-prop).

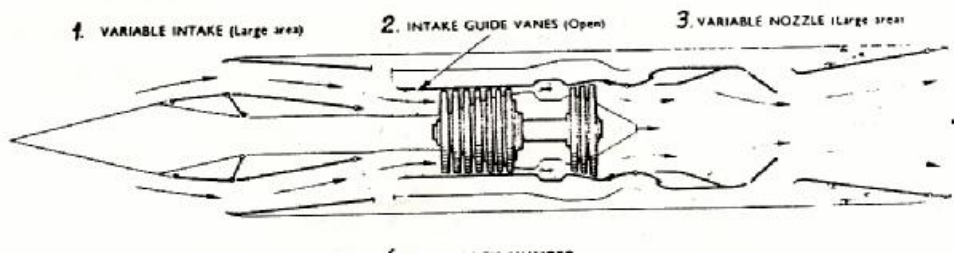
- Ανάλογα προς τη ροή του αέρα:
 1. Αεροστρόβιλοι απλής ροής, όπου όλος ο αέρας που εισέρχεται ακολουθεί την ίδια σειρά μεταβολών μέχρι την έξοδο του (Turbo-jet).
 2. Αεροστρόβιλοι διπλής ροής, όπου μέρος του αέρα υφίσταται μόνο μια αρχική συμπίεση και ενώνεται τελικά με το κύριο ρεύμα μετά τον στρόβιλο (Turbo-fan).

- Ανάλογα προς τον αριθμό των αξόνων μεταξύ συγκροτήματος συμπιεστή και στροβίλου:
 1. Αεροστρόβιλους απλού άξονα.
 2. Αεροστρόβιλους διπλού άξονα.
 3. Αεροστρόβιλους τριπλού άξονα.

Αν έχουμε διπλό ή τριπλό άξονα τότε θα έχουμε και διπλό ή τριπλό αντίστοιχα συμπιεστή και στρόβιλο. Κάθε στρόβιλος κινεί έναν συμπιεστή.

1.4.5. ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΑΘΟΔΥΛΟΣ (Turbo-ram jet)

Ο στροβιλο-αθόδυλος είναι συνδυασμός του αεροστροβίλου (που χρησιμεύει για ταχύτητες μέχρι 3 MAX) με τον αθόδυλο, που έχει καλή απόδοση σε υψηλούς αριθμούς MAX). Κατά την απογείωση και την επιτάχυνση ο κινητήρας λειτουργεί σαν κοινός αεροστροβίλος με μετακαυστήρα. Μετά τα 3 MAX ο αεροστροβίλος σβήνει και ο αέρας παρακάμπτει τον συμπιεστή, θάλαμο καύσης και στρόβιλο και οδηγείται στον σωλήνα του μετακαυστήρα, ο οποίος τώρα λειτουργεί σαν θάλαμος καύσης.



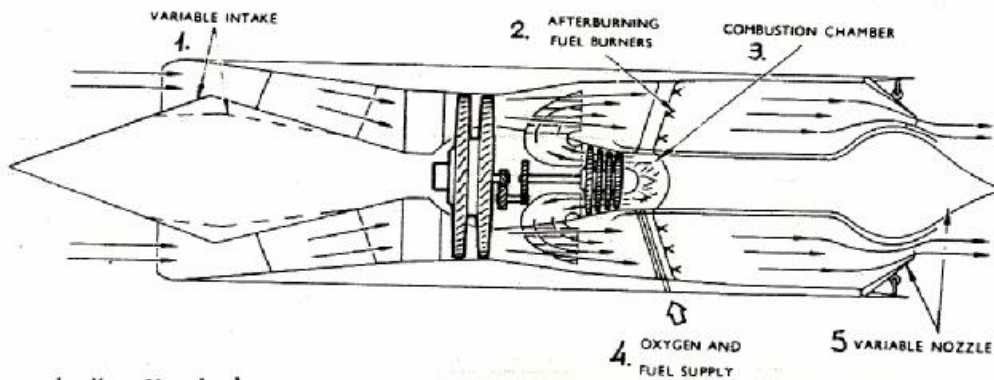
Στροβιλο-αθόδυλος

1. Μεταβλητή εισαγωγή
2. Οδηγία πτερύγια εισαγωγής
3. Μεταβλητό ακροφύσιο

1.4.6. ΠΥΡΑΥΛΟ-ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ (Turbo-rocket)

Η βασική διαφορά του από τον στροβιλο-αθόδυλο είναι ότι μεταφέρει το δικό του οξυγόνο και δεν έχει ανάγκη τον ατμοσφαιρικό αέρα. Η ισχύς για την κίνηση του στροβίλου λαμβάνεται από την καύση κηροζίνης και υγρού οξυγόνου μέσα σε ένα θάλαμο καύσης τύπου πυραύλου.

Βασικό του πλεονέκτημα είναι ο μικρός του όγκος και το μικρό του βάρος. Μειονέκτημα του είναι η υψηλή ειδική του κατανάλωση.



Πυραυλο-στροβίλος

1. Μεταβλητή εισαγωγή
2. Καυστήρες μετάκαυσης
3. Θάλαμος καύσης
4. Παροχή οξυγόνου και καυσίμου
5. Μεταβλητό ακροφύσιο

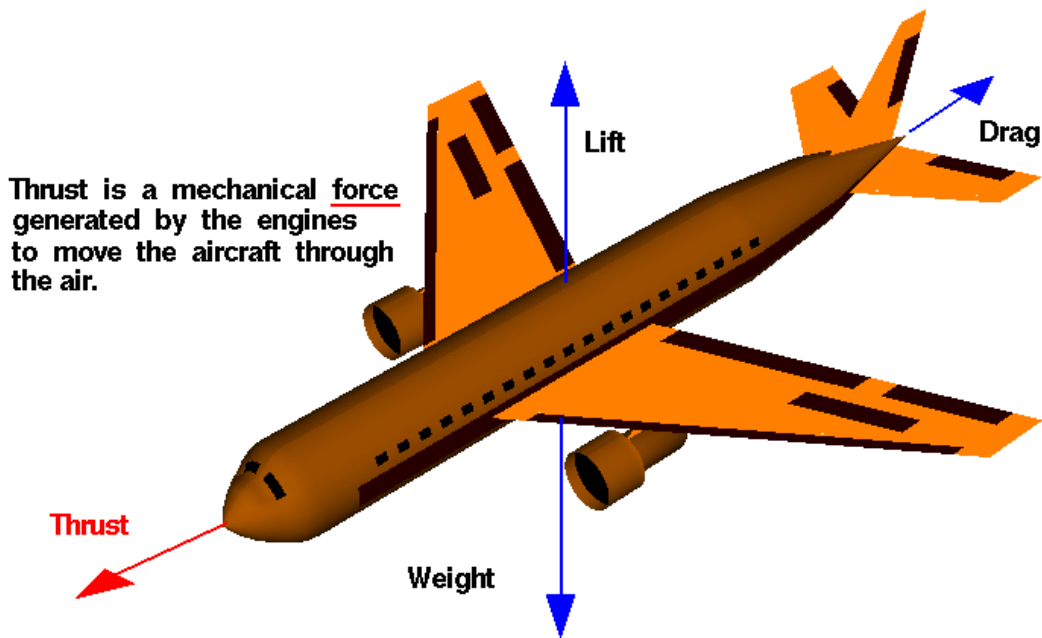
1.5. ΏΣΗ

Ώση είναι η δύναμη η οποία κινεί ένα αεροσκάφος στον αέρα. Η ώση χρησιμοποιείται για να υπερνικήσει την οπισθέλκουσα ενός αεροσκάφους ή το βάρος ενός πυραύλου. Η ώθηση παράγεται από τους κινητήρες ενός αεροσκάφους μέσω κάποιου προωθητικού συστήματος. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται η φορά και η διεύθυνση των δυνάμεων, οι οποίες ασκούνται σε ένα αεροσκάφος κατά την διάρκεια της πτήσης.



What is Thrust?

Glenn
Research
Center



Thrust: Ώθηση

Drag: Οπισθέλκουσα

Lift: Άνωση

Weight: Βάρος

(Η ώθηση είναι μια μηχανική δύναμη η οποία παράγεται από τους κινητήρες για να κινηθεί ένα αεροπλάνο στον αέρα)

Η ώθηση είναι μια μηχανική δύναμη και παράγεται από την αντίδραση της επιτάχυνσης μιας μάζας αέρα. Δεδομένου ότι η ώθηση είναι μια δύναμη, είναι ένα διάνυσμα με μέγεθος και φορά. Ο κινητήρας λειτουργεί συμπιέζοντας τον αέρα και επιταχύνοντας τα καυσαέρια προς τα πίσω ενώ η ώση παράγεται κατά την αντίθετη κατεύθυνση από την επιτάχυνση των καυσαερίων. Το μέγεθος της ώσης εξαρτάται από την ποσότητα των καυσαερίων που επιταχύνονται και από την πτώση πίεσης του αέρα μέσα στον κινητήρα. Για να επιταχύνουμε τον αέρα θα πρέπει να δαπανήσουμε ενέργεια, η οποία παράγεται ως θερμότητα από την καύση ποσότητας καυσίμου στους θαλάμους καύσης. Το σύστημα προώθησης

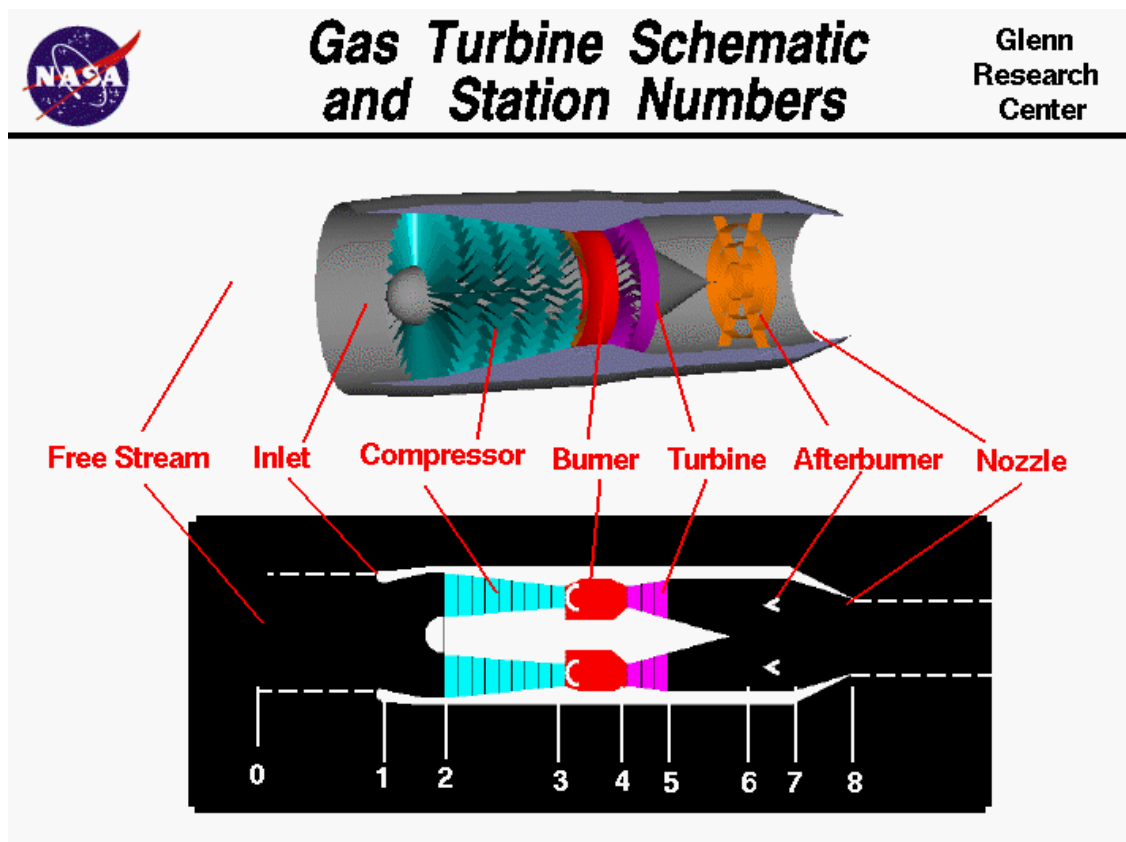
που χρησιμοποιείται μπορεί να ποικίλει από αεροσκάφος σε αεροσκάφος αλλά παράγει την ώθηση με παρόμοιο τρόπο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΑΣΙΚΑ ΤΜΗΜΑΤΑ ΕΝΟΣ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

ΑΕΡΟΚΙΝΗΤΗΡΑ

2.1. ΣΤΑΘΜΟΙ ΕΝΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΔΙΕΘΝΩΣ

Οι αεροστρόβιλοι κινητήρες είναι πολύπλοκες μηχανές με πολλά κινούμενα μέρη. Για να καταλάβουμε πώς λειτουργούν αυτοί οι κινητήρες οι μηχανικοί σχεδίασαν τα σχηματικά διαγράμματα των κινητήρων. Το σχηματικό διάγραμμα είναι ένα δισδιάστατο σχέδιο του κινητήρα όπου απεικονίζονται τα σημαντικότερα μέρη του. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το μοντέλο ενός αεροστρόβιλου κινητήρα με μετάκαυση και το σχηματικό του διάγραμμα και υπάρχει αντιστοιχία των βασικών τμημάτων του.



Σχηματικό διάγραμμα αεροστρόβιλου κινητήρα

Έτσι αριθμούνται διάφορα σημεία του κινητήρα, τα οποία ονομάζονται σταθμοί. Το ελεύθερο ρεύμα του αέρα ορίζεται ως σταθμός 0, και η είσοδος του αέρα στον κινητήρα ως σταθμός 1. Το σημείο πριν την είσοδο στον συμπιεστή ορίζεται ως σταθμός 2. Η έξοδος από τον συμπιεστή και η είσοδος στους θαλάμους καύσης ορίζεται ως σταθμός 3 ενώ η έξοδος από τους θαλάμους καύσης και η είσοδος στους στρόβιλους είναι ο σταθμός 4. Η έξοδος από τους στρόβιλους είναι ο σταθμός 5 και το σημείο πριν τη μετάκαυση ο σταθμός 6. Ο σταθμός 7 είναι το σημείο μετά την μετάκαυση και πριν την είσοδο στο ακροφύσιο και ο σταθμός 8 είναι το σημείο όπου ξεκινά ο λαιμός του ακροφύσιου.

Θα αναρωτηθεί κανείς γιατί οι μηχανικοί όρισαν τους σταθμούς στους κινητήρες. Πρώτον γιατί αυτό βοηθάει στην απλούστερη περιγραφή των αεροστρόβιλων κινητήρων. Για παράδειγμα οι μηχανικοί μπορούν να αναφέρονται στην θερμοκρασία εισόδου στους στρόβιλους απλά ως T4 ή στην πίεση εξόδου συμπιεστή ως P3. Αυτό κάνει τις διάφορες μελέτες, εργασίες και συζητήσεις πιο κατανοητές. Δεύτερον οι σταθμοί στους αεροστρόβιλους κινητήρες αντιστοιχούν στην αρχή και στο τέλος των επιμέρους θερμοδυναμικών διαδικασιών στο θερμοδυναμικό κύκλο του κινητήρα. Ο θερμοδυναμικός κύκλος του Brayton περιγράφει το θερμοδυναμικό κύκλο ενός αεροστρόβιλου κινητήρα και κατά την περιγραφή των διαδικασιών στο διάγραμμα P-V δείχνουμε το τέλος μιας διαδικασίας με την χρησιμοποίηση του αριθμού των σταθμών.

2.2. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ BRAYTON

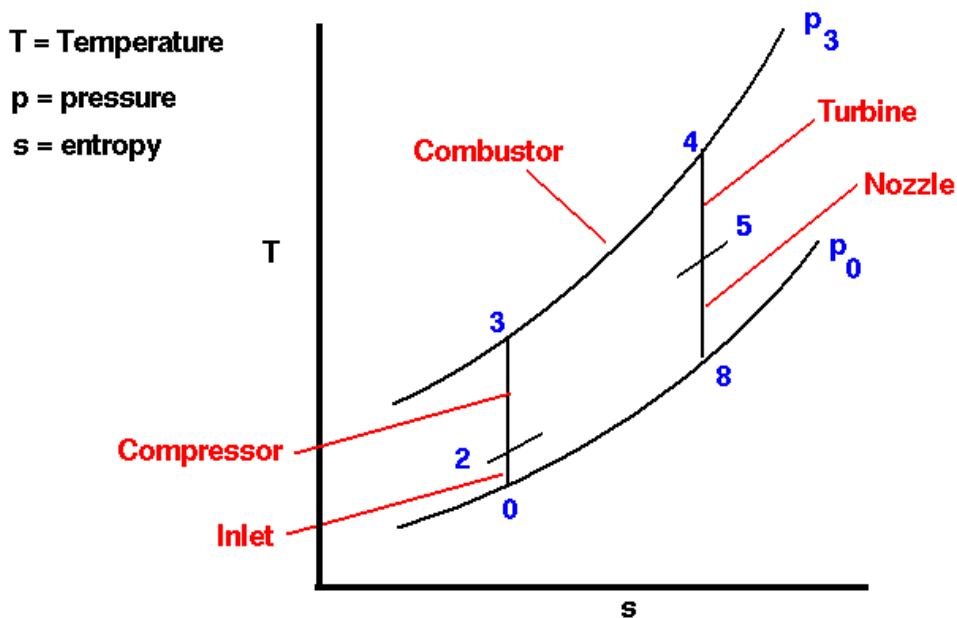
Η λειτουργία ενός αεροστρόβιλου κινητήρα περιγράφεται από τον θερμοδυναμικό κύκλο του Brayton. Για να καταλάβουμε όμως πώς λειτουργεί ένα προωθητικό σύστημα θα πρέπει να μελετήσουμε την θερμοδυναμική των αερίων. Τα αέρια έχουν διάφορες ιδιότητες που μπορούμε να παρατηρήσουμε με τις

αισθήσεις μας, όπως η πίεση P , η θερμοκρασία T , η μάζα M , και ο όγκος V που καταλαμβάνει το αέριο. Η προσεκτική επιστημονική παρατήρηση έχει καθορίσει ότι αυτές οι μεταβλητές συσχετίζονται και οι τιμές αυτών καθορίζουν την κατάσταση του αερίου. Μια θερμοδυναμική διαδικασία όπως η θέρμανση ή η συμπίεση αλλάζει τις τιμές των μεταβλητών αυτών, με τρόπο που περιγράφεται από τους νόμους της θερμοδυναμικής. Η εργασία που κάνει ένα αέριο και η θερμότητα που μεταφέρει εξαρτάται από την αρχική και τελική κατάσταση καθώς και από τον τρόπο που πραγματοποιήθηκε αυτή η μεταβολή. Είναι δυνατόν να εκτελεστεί μια σειρά διαδικασιών, στην οποία η κατάσταση του αερίου αλλάζει κατά την διάρκεια κάθε διαδικασίας αλλά τελικά το αέριο επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση. Μια τέτοια σειρά διαδικασιών καλείται θερμοδυναμικός κύκλος.



Ideal Brayton Cycle T-s diagram

Glenn
Research
Center



Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος του Brayton

0-3 : Αδιαβατική συμπίεση

3-4 : Καύση με σταθερή πίεση

4-8 : Αδιαβατική εκτόνωση

8-0 : Αποβολή θερμότητας με σταθερή πίεση(εξαγωγή καυσαερίων)

Η παραπάνω εικόνα δείχνει ένα διάγραμμα T-S του κύκλου του Brayton. Χρησιμοποιώντας το σύστημα αρίθμησης των σταθμών του κινητήρα θα αναλύσουμε το παραπάνω διάγραμμα. Θα ξεκινήσουμε από το ελεύθερο ρεύμα αέρα στο σταθμό 0, το οποίο επιβραδύνεται κατά την είσοδο στο συμπιεστή στο σταθμό 2. Με δεδομένο ότι η ροή του αέρα επιβραδύνεται, η στατική του πίεση αυξάνεται και η ροή του συμπιέζεται. Σε ιδανικές συνθήκες η συμπίεση είναι ισεντροπική και η θερμοκρασία αυξάνεται όπως δείχνει το διάγραμμα. Η συμπίεση του αερίου συνεχίζεται και αυξάνει η πίεση και η θερμοκρασία ισεντροπικά μέχρι το σταθμό 3, την έξοδο του συμπιεστή. Δεδομένου ότι η συμπίεση είναι ιδανικά ισεντροπική, μια κάθετη γραμμή στο διάγραμμα T-S περιγράφει την διαδικασία. Στην πραγματικότητα η συμπίεση δεν είναι ισεντροπική και η γραμμή της συμπίεσης έχει μικρή κλίση λόγω της αύξησης της εντροπίας S. Κατά την διαδικασία της καύσης στους θαλάμους καύσης, η πίεση παραμένει σταθερή από τον σταθμό 3 στο σταθμό 4. Η αύξηση της θερμοκρασίας εξαρτάται από το είδος του καυσίμου και από την αναλογία αέρα – καυσίμου. Τα καυσαέρια έπειτα διέρχονται από τους στροβίλους, από το σταθμό 4 στο σταθμό 5. Επειδή ο στροβίλος και ο συμπιεστής βρίσκονται στον ίδιο άξονα, παράγουν το ίδιο έργο και υπό ιδανικές συνθήκες η θερμοκρασία αλλάζει το ίδιο. Έπειτα το ακροφύσιο φέρνει τη ροή ισεντροπικά, πίσω στην αρχική κατάσταση από το σταθμό 5 στο σταθμό 8. Εξωτερικά η ροή επιστρέφει στο ελεύθερο ρεύμα αέρα, από το σταθμό 8 στο σταθμό 0. Η περιοχή που περικλείει το διάγραμμα T-S εκφράζει το έργο του κινητήρα δηλαδή την ώση που παράγει ο κινητήρας.

2.3. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΑΕΡΑ (Inlet)

Τα περισσότερα επιβατικά και στρατιωτικά αεροσκάφη χρησιμοποιούν αεροστροβίλους κινητήρες (Jet engines). Υπάρχουν διάφορα είδη αεροστροβίλων, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω, αλλά όλοι οι κινητήρες έχουν κοινά τμήματα. Όλοι οι αεροστροβίλοι κινητήρες έχουν έναν αεραγωγό (inlet) ο οποίος οδηγεί το ελεύθερο ρεύμα αέρα μέσα στον κινητήρα. Ο αεραγωγός βρίσκεται μπροστά από τον συμπιεστή, και ενώ δεν μεταβάλλει καμία ιδιότητα του αέρα που εισέρχεται, η απόδοση του αεραγωγού έχει επιρροή στην ώση που παράγει ο κινητήρας. Πρέπει να έχει την δυνατόν μικρότερη οπισθέλκουσα στη ροή του αέρα, να εξασφαλίζει ομοιόμορφη ροή αέρα προς τον συμπιεστή και να αναλαμβάνει όλη την ενέργεια του αέρα χωρίς καμιά απώλεια πίεσης. Απώλειες πίεσης μπορεί να δημιουργηθούν και λόγω τριβής στα τοιχώματα της εισαγωγής και λόγω κακής αεροδυναμικής σχεδίασης του αεραγωγού. Επομένως το σχήμα, το μέγεθος και η θέση του αεραγωγού εξαρτάται από την ταχύτητα που θα αναπτύσσει το αεροσκάφος, τον αριθμό των κινητήρων κ.ά. Παρακάτω φαίνονται διάφορα είδη αεραγωγών.

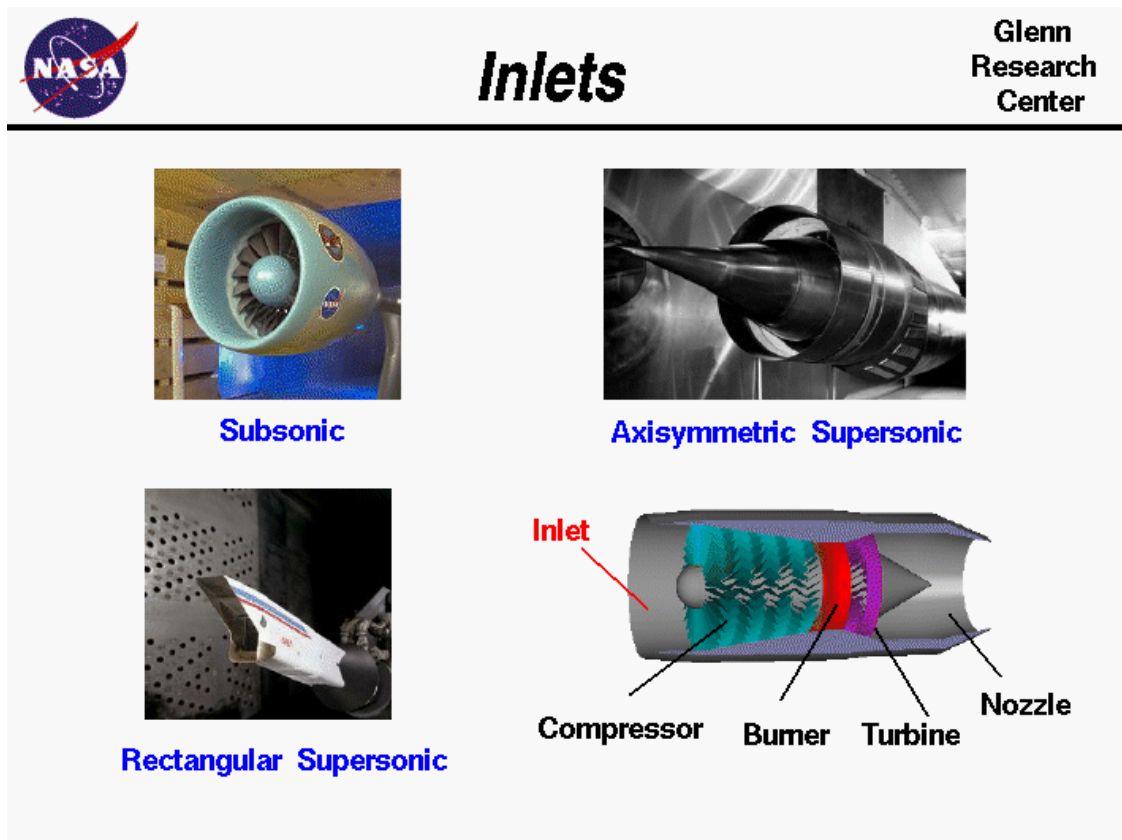
∅ Υποηχητική εισαγωγή (Subsonic)

Για τα αεροσκάφη που δεν ξεπερνούν την ταχύτητα του ήχου, όπως τα μεγάλα επιβατικά αεροσκάφη, ένας απλός, ευθύς και σύντομος αεραγωγός λειτουργεί αρκετά καλά. Η επιφάνεια του από το εξωτερικό προς το εσωτερικό είναι μια συνεχής ομαλή καμπύλη με μεγαλύτερο πάχος από μέσα προς τα έξω. Το εξωτερικό άκρο ονομάζεται χείλος και είναι σχετικά παχύ.

∅ Υπερηχητική εισαγωγή (Supersonic)

Ο αεραγωγός για ένα υπερηχητικό αεροσκάφος έχει σχετικά αιχμηρό χείλος. Το χείλος του αεραγωγού είναι αιχμηρό για να ελαχιστοποιεί τις απώλειες από τα κύματα κρούσης που εμφανίζονται κατά την διάρκεια της υπερηχητικής πτήσης. Ο αεραγωγός θα πρέπει να επιβραδύνει τη ροή στις υποηχητικές ταχύτητες προτού να φθάσει ο αέρας στο συμπιεστή, δηλαδή στην αρχή να έχει

σχήμα συγκλίνουν για να μειωθεί η ταχύτητα από υπερηχητική σε ταχύτητα με 1 MAX και στη συνέχεια αποκλίνουν για να μειωθεί η ταχύτητα ακόμη περισσότερο σε 0.5 MAX περίπου. Μερικοί αεραγωγοί όπως στο σχήμα χρησιμοποιούν ένα κεντρικό κώνο για να μειώσουν τη ροή του αέρα σε υποηχητικές ταχύτητες. Άλλου είδους αεραγωγοί είναι οι ορθογώνιοι, μεταβλητής γεωμετρίας οι οποίοι χρησιμοποιούνται στα μαχητικά αεροσκάφη F-14 και F-15.



Είδη αεραγωγών

Ένας αεραγωγός θα πρέπει να λειτουργεί αποτελεσματικά σε όλη την διάρκεια της πτήσης του αεροσκάφους. Στα πολύ μικρής ταχύτητας αεροσκάφη ή όταν βρίσκονται στο έδαφος, το ελεύθερο ρεύμα αέρα εισέρχεται στον κινητήρα από τον συμπιεστή. Στις υψηλές ταχύτητες, ένας καλός αεραγωγός θα πρέπει να επιτρέπει στο αεροσκάφος να ελιχθεί σε υψηλές γωνίες προσβολής χωρίς να

διαταράσσεται η ροή προς τον συμπιεστή. Επειδή ο αεραγωγός είναι τόσο σημαντικός στην λειτουργία των αεροσκαφών και στις επιδόσεις τους εξελίσσεται σε αεροδυναμικές σήραγγες από εξειδικευμένο προσωπικό και όχι από των κατασκευαστή των κινητήρων. Βέβαια η άψογη συνεργασία αυτών των δύο θα έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

2.4. ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ (Compressors)

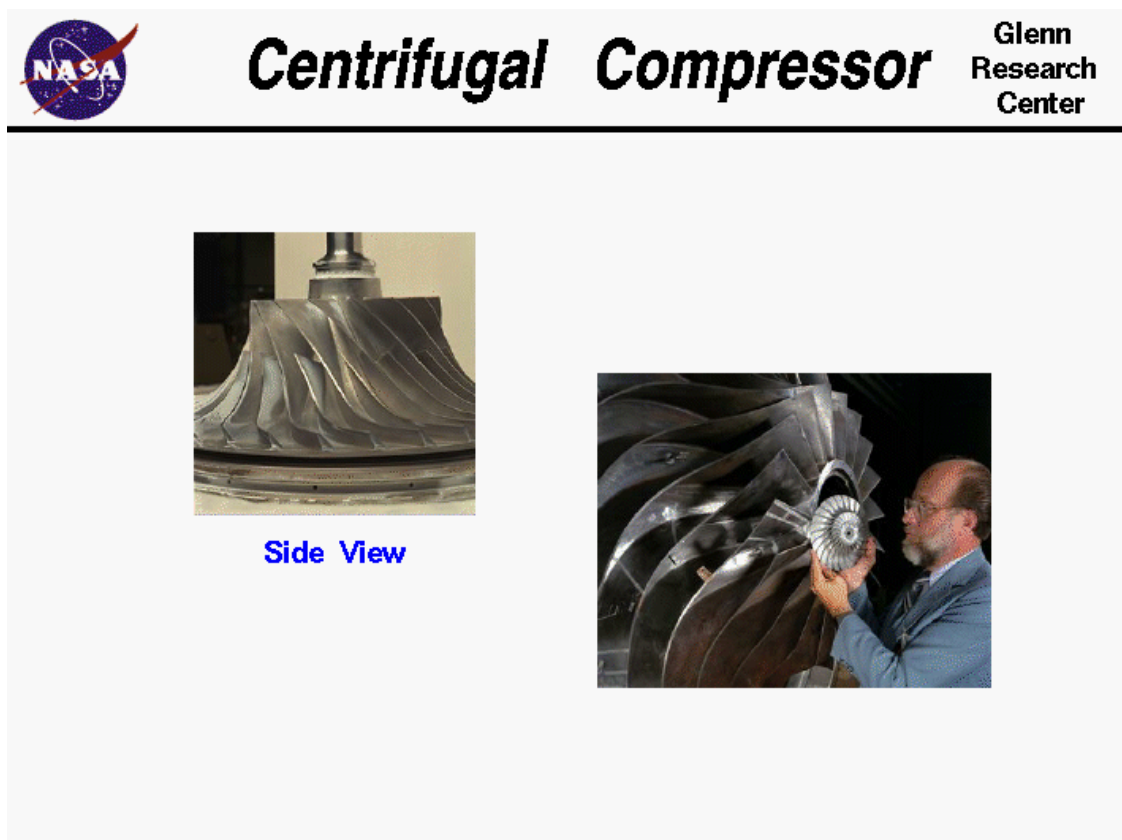
Κοινό τμήμα των αεροστρόβιλων κινητήρων αποτελεί και ο συμπιεστής, ο οποίος αυξάνει την πίεση του εισερχόμενου αέρα πριν εισέλθει στους θαλάμους καύσης και η απόδοση του επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του κινητήρα. Όπως φαίνεται και στην εικόνα υπάρχουν δύο κύριοι τύποι συμπιεστών: ο αξονικός (Axial compressor) και ο φυγοκεντρικός συμπιεστής (Centrifugal compressor).

Ο φυγοκεντρικός συμπιεστής αποτελείται από μία ή δύο βαθμίδες. Με τον όρο βαθμίδα εννοούμε μία σειρά κινητών και σταθερών πτερυγίων. Κάθε βαθμίδα χρησιμοποιεί ένα στρεφόμενο τμήμα να επιταχύνει τον αέρα και έναν διαχύτη για να αυξήσει την πίεση. Ο αξονικός αποτελείται από πολλές βαθμίδες και χρησιμοποιεί διαδοχικές σειρές κινητών και σταθερών πτερυγίων, για να επιταχύνει και να συμπιέσει διαδοχικά τον αέρα μέχρι την επιθυμητή πίεση. Ο φυγοκεντρικός κατασκευάζεται ευκολότερα. Ο αξονικός αναρροφά μεγαλύτερη μάζα αέρα, άρα μεγαλύτερη ώση και μπορεί να σχεδιαστεί για μεγαλύτερους βαθμούς συμπίεσης, άρα μεγαλύτερη απόδοση λειτουργίας, δηλαδή μικρότερη ειδική κατανάλωση. Γι' αυτούς τους λόγους οι συμπιεστές αξονικής ροής χρησιμοποιούνται περισσότερο στους κινητήρες αεροσκαφών.

∅ Φυγοκεντρικός συμπιεστής (Centrifugal compressor)

Στον φυγοκεντρικό συμπιεστή ο αέρας στρέφεται από την αξονική στην ακτινική διεύθυνση στο στροφέιο του συμπιεστή. Χρησιμοποιήθηκαν στις πρώτες

αεριοθούμενες μηχανές και χρησιμοποιούνται ακόμα σε μικρούς αεροστρόβιλους κινητήρες. Το στροφείο στρέφεται με μεγάλη ταχύτητα και οι φυγόκεντρες δυνάμεις που δημιουργούνται ωθούν την ροή ακτινικά προς τα έξω κατά μήκος των πτερυγίων και έχουμε μια μικρή αύξηση της πίεσης. Έπειτα ο αέρας εισέρχεται στους διαχύτες στους οποίους η κινητική ενέργεια του αέρα μετατρέπεται σε ενέργεια πίεσης. Η μισή αύξηση της πίεσης πραγματοποιείται στο στροφείο και η μισή στους διαχύτες.



Φυγόκεντρικός συμπιεστής (Centrifugal compressor)

Ø Αξονικός συμπιεστής (Axial compressor)

Στον αξονικό συμπιεστή ο αέρας ρέει παράλληλα με τον άξονα περιστροφής του κινητήρα. Αποτελείται από ένα ή περισσότερα στρεφόμενα

μέρη που φέρουν στην περιφέρεια τους πτερύγια (ρότορας). Οι σειρές αυτών των πτερυγίων στρέφονται ανάμεσα σε σειρές σταθερών πτερυγίων (στάτορας) , τα οποία είναι προσαρμοσμένα σε εξωτερικό κυλινδρικό περίβλημα. Κάθε συμπιεστής κινείται από δικό του στρόβιλο ώστε να εξασφαλίζεται ο μέγιστος δυνατός λόγος συμπίεσης.

Ο αέρας επιταχύνεται από τα κινητά πτερύγια και οδηγείται προς τα επόμενα σταθερά πτερύγια. Η αύξηση της πίεσης προέρχεται από την διάχυση του αέρα μεταξύ των σταθερών και κινητών πτερυγίων. Η τελευταία σειρά σταθερών πτερυγίων χρησιμεύει για την εξομάλυνση της ροής από πιθανούς στροβιλισμούς και ο αέρας να εισέλθει στο θάλαμο καύσης σαν ομοιόμορφο αζονικό ρεύμα.

Μερικοί συμπιεστές έχουν μια πρόσθετη σειρά σταθερών πτερυγίων που ονομάζονται πτερύγια εισόδου ή οδηγά πτερύγια (ανεμιστήρας), για να κατευθύνουν τον αέρα προς την πρώτη βαθμίδα. Ο ανεμιστήρας (Fan) είναι στην πραγματικότητα ο συμπιεστής χαμηλής πίεσης και παίρνει κίνηση από ξεχωριστό στρόβιλο. Έχει μεγάλα κινητά και σταθερά πτερύγια και είναι σχεδιασμένος να συμπιέζει πολύ μεγαλύτερη μάζα αέρα από το συμπιεστή μέσης και υψηλής πίεσης. Μεγάλο ποσοστό του αέρα παρακάμπτει τους άλλους δύο συμπιεστές και εξέρχεται στην ατμόσφαιρα από ιδιαίτερο δακτυλιοειδές ακροφύσιο (By-pass flow). Το υπόλοιπο ποσοστό περνά από το συμπιεστή μέσης και υψηλής πίεσης και οδηγείται προς τους θαλάμους καύσης.

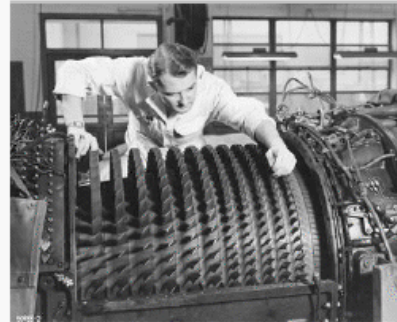


Axial Compressor

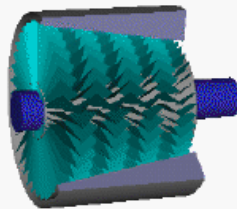
Glenn
Research
Center



Single Rotor



Multistage Compressor
(only rotors shown)

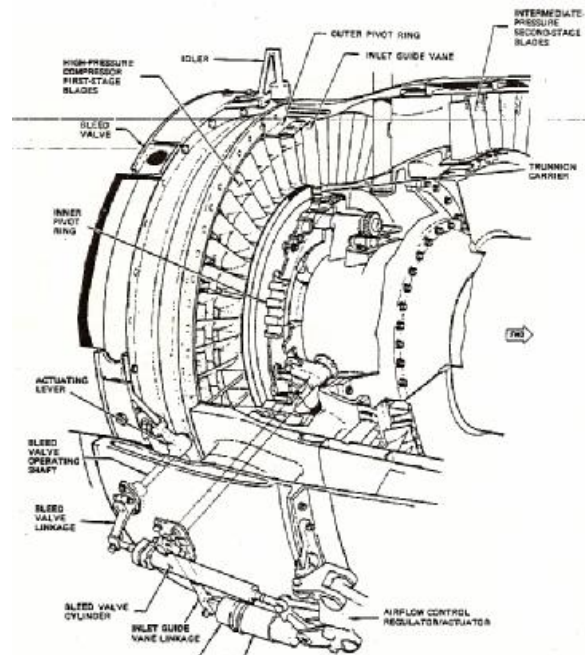


Αξονικός συμπιεστής (Axial compressor)

Στον αξονικό συμπιεστή η αύξηση της πίεσης σε κάθε βαθμίδα είναι μικρή, γι' αυτό άλλωστε και οι πολλές βαθμίδες, γιατί η διάχυση και η γωνία απόκλισης του αέρα στα πτερύγια πρέπει να είναι μικρή ώστε να αποφευχθούν απώλειες που οφείλονται σε απόσπαση της ροής και απώλεια στήριξης (Stall) των πτερυγίων. Αν κάποιος παράγοντας διαταράξει τη σχέση ανάμεσα στην πίεση, την ταχύτητα και τις στροφές, τότε η ροή γύρω από τα πτερύγια τείνει να αποκολληθεί και να γίνει στροβιλώδης μέχρι την απώλεια στήριξης του πτερυγίου. Εάν το φαινόμενο συνεχιστεί τότε θα πέσουν σε απώλεια στήριξης όλα τα πτερύγια και θα έχουμε την λεγόμενη αντίθλιψη του συμπιεστή.

Ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι οι συμπιεστές κατασκευάζονται να αποδίδουν καλύτερα σε ορισμένες συνθήκες λειτουργίας, συνήθως σε υψηλές

ταχύτητες και στροφές του κινητήρα, με αποτέλεσμα να υπάρχει ο κίνδυνος της απώλειας στήριξης των πτερυγίων στις άλλες περιοχές των συνθηκών λειτουργίας του αεροκινητήρα. Για να αποφύγουμε αυτό το ανεπιθύμητο φαινόμενο στη λειτουργία του κινητήρα χρησιμοποιούνται εσωτερικά οδηγά πτερύγια μεταβαλλόμενης γωνίας (Inlet Guide Vanes), που τοποθετούνται ανάμεσα από κάποια βαθμίδα του συμπιεστή, για την καλύτερη λειτουργία του στις χαμηλές στροφές αλλά και να “καθαρίζουν” τον κινητήρα από απώλειες στήριξης του συμπιεστή. Παρακάτω φαίνονται τα εσωτερικά οδηγά πτερύγια σε έναν αεροστρόβιλο κινητήρα με by-pass ροή.



Εσωτερικά οδηγά πτερύγια μεταβαλλόμενης γωνίας (Inlet Guide Vanes)

2.5. ΘΑΛΑΜΟΙ ΚΑΥΣΗΣ (Combustion chamber)

Όλοι οι αεροστρόβιλοι κινητήρες έχουν ένα τμήμα καύσης, στο οποίο το καύσιμο αναμιγνύεται με ποσότητες αέρα που παρέχονται από τον συμπιεστή και καίγεται. Οι θάλαμοι καύσης βρίσκονται ανάμεσα στο συμπιεστή και στον στρόβιλο και τοποθετούνται περιφερειακά του κεντρικού άξονα. Κατασκευάζονται

από υλικά που να αντέχουν στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες που δημιουργούνται, καθώς και στη διάβρωση που τείνει να δημιουργηθεί από τα προϊόντα της καύσης.

Η καύση γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε ο αέρας να εκτονώνεται και επιταχύνεται (πάνω στους στροβίλους), για να δώσει ένα ομαλό, ομοιόμορφο ρεύμα θερμού αέρα σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα. Ακόμη επειδή η θερμοκρασία, που χρειάζεται ο στρόβιλος, μεταβάλλεται με τις στροφές του κινητήρα θα πρέπει ο θάλαμος καύσης να διατηρεί σταθερή και αποτελεσματική καύση σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα.

Το πρώτο πράγμα που πρέπει να επιτυγχάνει ο θάλαμος καύσης θα πρέπει να είναι η επιβράδυνση του ρεύματος του αέρα και άρα η αύξηση της στατικής του πίεσης, ώστε η φλόγα να παραμένει αναμμένη σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας. Αμέσως μετά με κάποια πτερύγια στροβιλισμού, εσωτερικά του θαλάμου, ο στροβιλώδης αέρας δημιουργεί μια ροή αντίθετη προς την διεύθυνση της κανονικής και έτσι προκαλείται μια επιθυμητή ανακυκλοφορία με χαμηλή ταχύτητα. Με αυτόν τον τρόπο η φλόγα σταθεροποιείται και ακινητοποιείται μέσα στο θάλαμο καύσης.

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι θαλάμων καύσης που χρησιμοποιούνται στους αεροστρόβιλους κινητήρες.

Ø Πολλαπλός θάλαμος καύσης (Can combustion chamber)

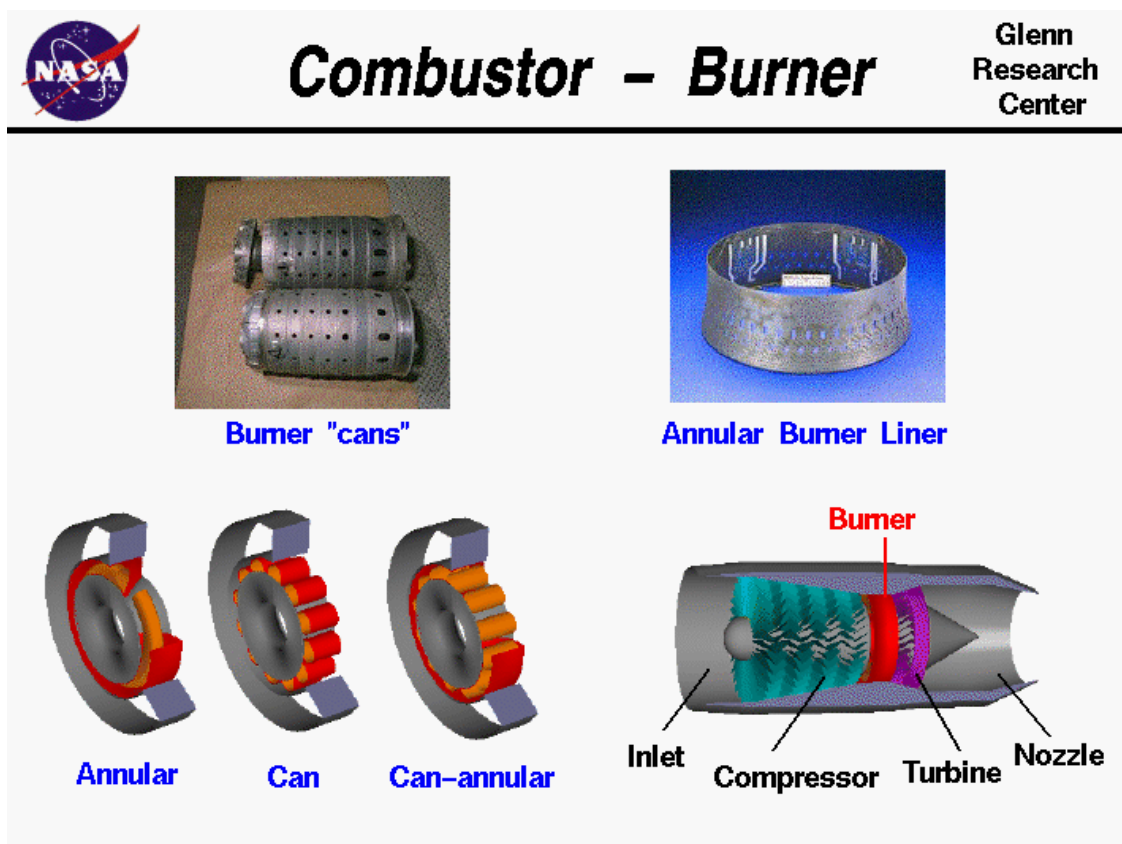
Χρησιμοποιείται συνήθως στους αεροστρόβιλους με φυγοκεντρικό συμπιεστή και είναι η εξέλιξη του αρχικού τύπου θαλάμου καύσης που σχεδιάστηκε από τον Whittle. Κατά την εκκίνηση η φλόγα διαδίδεται σε όλους τους φλογοσωλήνες από τον ένα ή δύο θαλάμους όπου γίνεται η αρχική ανάφλεξη. Όλοι οι θάλαμοι συνδέονται μεταξύ τους και έτσι λειτουργούν με την ίδια πίεση.

- ∅ Σωληνο-δακτυλιοειδής θάλαμος καύσης (Can-annular combustion chamber)

Είναι συνδυασμός του πολλαπλού και του δακτυλιοειδούς θαλάμου καύσης. Και εδώ η ανάφλεξη γίνεται σε έναν ή δύο θαλάμους καύσης και διαδίδεται στους υπόλοιπους μέσω των φλογοσωλήνων, με τους οποίους συνδέονται μεταξύ τους, αλλά υπάρχουν και σπές ανάμειξης του αέρα μεταξύ των θαλάμων καύσης που επιτυγχάνουν καλύτερη καύση από τον πολλαπλό θάλαμο καύσης.

- ∅ Δακτυλιοειδής θάλαμος καύσης (Annular combustion chamber)

Αποτελείται από έναν δακτυλιοειδή φλογοσωλήνα, που περιέχεται μεταξύ ενός εξωτερικού και ενός εσωτερικού κυλινδρικού περιβλήματος. Σ' αυτόν το θάλαμο καύσης η διάδοση της φλόγας είναι βελτιωμένη διότι δεν υπάρχουν οι σωληνώσεις που συνδέουν τους ξεχωριστούς θαλάμους καύσης.



Θάλαμοι Καύσης (Combustion chamber)

2.6. ΣΤΡΟΒΙΛΟΙ (Turbines)

Όλοι οι αεροστρόβιλοι κινητήρες έχουν ένα άλλο κοινό τμήμα τους που είναι ο στρόβιλος. Σκοπός του είναι να παρέχει την ισχύ που χρειάζεται για να κινηθεί ο συμπιεστής και τα παρελκόμενα του μέσω του τμήματος παρελκομένων του κινητήρα. Ακόμη στους ελικοστρόβιλους κινητήρες (Turbo-prop) χρησιμοποιείται για την παροχή ισχύος σε μια έλικα. Την ισχύ αυτή ο στρόβιλος την παραλαμβάνει από τα καυσαέρια που εξέρχονται από τους θαλάμους καύσης και εκτονώνονται σε χαμηλότερη πίεση και θερμοκρασία πάνω σε αυτών.

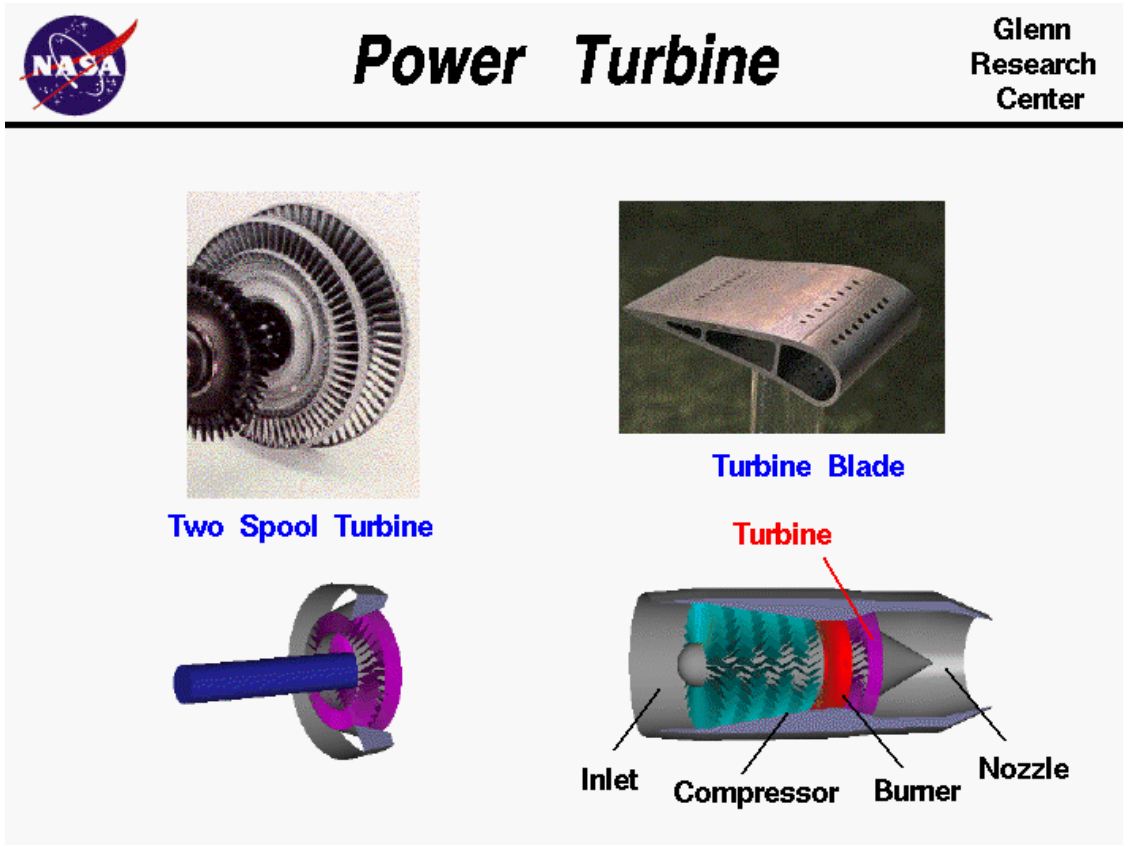
Ο στρόβιλος αποτελείται, όπως και ο συμπιεστής, από αρκετές βαθμίδες. Κάθε βαθμίδα αποτελείται από μια σειρά σταθερών οδηγών πτερυγίων και μια σειρά κινητών πτερυγίων (Turbine blade). Ο αριθμός των βαθμίδων εξαρτάται από τον αριθμό των αξόνων του κινητήρα καθώς και από την επιτρεπόμενη διάμετρο του κινητήρα. Ο αριθμός των αξόνων ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του αεροστρόβιλου. Οι αεροστρόβιλοι μεγάλου βαθμού συμπίεσης έχουν συνήθως δύο άξονες (Two spool) που κινούν ένα συμπιεστή υψηλής πίεσης και έναν χαμηλής.

Δύο είναι οι βασικές διαφορές μεταξύ του στροβίλου και του συμπιεστή που θα αναφέρουμε παρακάτω. Η υψηλή θερμοκρασία καυσαερίων στη είσοδο του στροβίλου δημιουργεί προβλήματα αντοχής του υλικού σοβαρότερα από εκείνα για τον συμπιεστή και έχει οδηγήσει σε ψύξη των πτερυγίων στους σύγχρονους κινητήρες αεροσκαφών. Ακόμη η υψηλή θερμοκρασία οδηγεί σε μικρότερη ταχύτητα για τα πτερύγια του στροβίλου σε σχέση με τα πτερύγια του συμπιεστή και αυτό διευκολύνει κάπως τα αεροδυναμικά προβλήματα. Μια δεύτερη μεγάλη διαφορά είναι ότι η πίεση πέφτει στο στρόβιλο αντί να αυξάνει όπως στον συμπιεστή. Η πτώση πίεσης λεπταίνει τα οριακά στρώματα,

μειώνοντας τα προβλήματα αποκόλλησης και κάνοντας την αεροδυναμική σχεδίαση πιο εύκολη.

Τα βασικά τμήματα ενός στροβίλου είναι τα ακροφύσια εξαγωγής από τους θαλάμους καύσης, τα σταθερά πτερύγια, οι δίσκοι του στροβίλου και τα κινητά πτερύγια. Η επιθυμία για μεγαλύτερη ώση ανά μονάδα ροής μάζας αέρα οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο. Η εισαγωγή αερόψυκτων στροβίλων και η μεγάλη πρόοδος στα υλικά κατασκευής των πτερυγίων βοήθησε προς αυτήν τη κατεύθυνση (κράματα με βάση το νικέλιο). Από τις πολλές μεθόδους που υπάρχουν για την ψύξη του στροβίλου, μόνον η απευθείας ψύξη με αέρα έχει πρακτικές εφαρμογές. Αέρας που προέρχεται από τον συμπιεστή, μεταφέρεται πίσω και εισάγεται στο δίσκο του στροβίλου και στα πτερύγια από τις ρίζες τους, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η αύξηση της θερμοκρασίας.

Η αύξηση της θερμοκρασίας θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε τα πτερύγια να μπορούν να εργάζονται για ικανοποιητικό χρόνο χωρίς προβλήματα κόπωσης, κάμψης και θερμικής κρούσης. Πρέπει να αντέχουν στις υψηλές φυγοκεντρικές τάσεις που δημιουργούνται, παρά την υψηλή θερμοκρασία που αναπτύσσουν. Τέλος πρέπει να αντέχουν στη διάβρωση και την οξειδωση. Από τα προηγούμενα συμπεραίνουμε, ότι για ένα δεδομένο υλικό πτερυγίων και ένα ελάχιστο αποδεκτό όριο ζωής, υπάρχει ένα αντίστοιχο όριο μέγιστης θερμοκρασίας εισόδου καυσαερίων και ένα όριο μέγιστης ισχύος του αεροστρόβιλου.



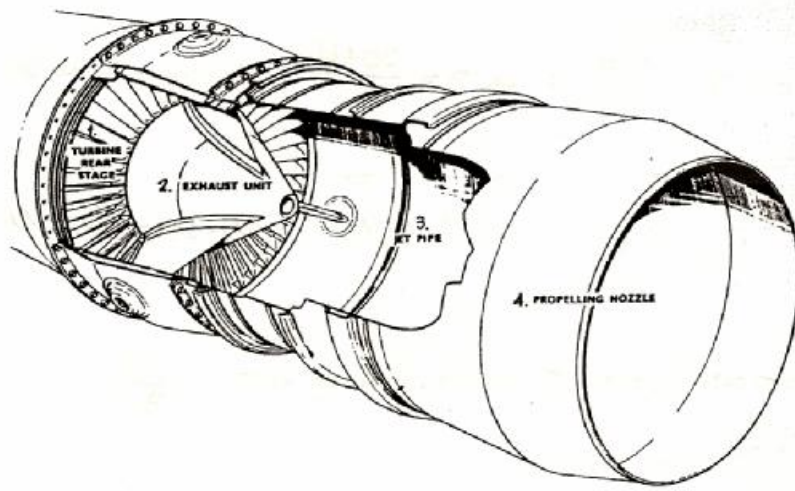
Στρόβιλος (Turbine)

2.7. ΑΚΡΟΦΥΣΙΟ (Nozzle)

Όλοι οι αεροστροβίλοι κινητήρες έχουν ένα σύστημα εξαγωγής (ακροφύσιο), που οδηγεί τα καυσαέρια από τον στρόβιλο προς την ατμόσφαιρα με ορισμένη ταχύτητα και διεύθυνση. Η ταχύτητα και η διεύθυνση των καυσαερίων είναι αυτά που δημιουργούν την ώση του αεροστροβίλου κινητήρα. Η σχεδίαση του ακροφυσίου εξαγωγής επηρεάζει σημαντικά τις επιδόσεις του κινητήρα, την θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο, την ροή του αέρα και την ταχύτητα και πίεση των καυσαερίων εξαγωγής.

Ένα βασικό σύστημα εξαγωγής καυσαερίων είναι το συγκλίνον ακροφύσιο (Convergent) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τα καυσαέρια εξέρχονται

στην ατμόσφαιρα μέσω του ακροφυσίου εξαγωγής, που σχηματίζει συγκλίνοντα αγωγό, για αύξηση της ταχύτητας εξαγωγής. Αμέσως μετά την έξοδο των καυσαερίων από το στρόβιλο, και πριν εισέλθουν στο ακροφύσιο, για να μην έχουμε απώλειες ενέργειας λόγω στροβιλισμού της ροής από την περιστροφή του στροβίλου, τοποθετούνται μεγάλα σταθερά πτερύγια για να ευθυγραμμίζουν τη ροή των καυσαερίων.



1. Πίσω βαθμίδα στροβίλου
2. Τμήμα εξαγωγής

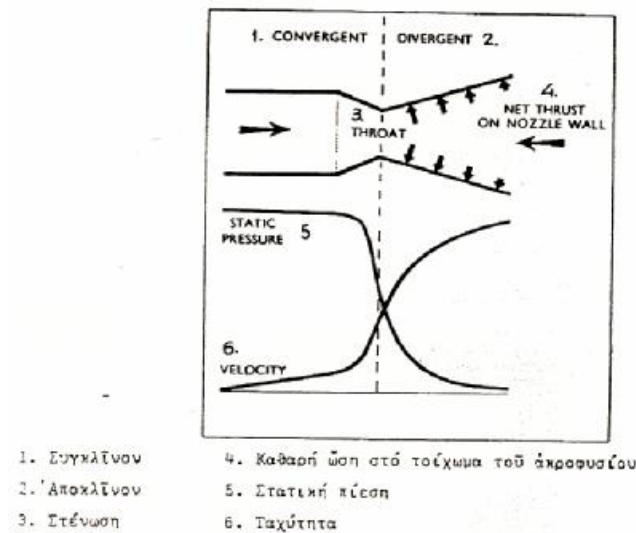
3. Σωλήνας εξαγωγής
4. Προωθητικό άκροφύσιο

Συγκλίνον ακροφύσιο (Convergent)

Σε έναν αεροστρόβιλο η ταχύτητα των καυσαερίων εξαγωγής είναι υποηχητική μόνο σε συνθήκες χαμηλής ώσης. Στις περισσότερες συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα η ταχύτητα εξαγωγής φθάνει την ταχύτητα του ήχου σχετικά με την θερμοκρασία των καυσαερίων και τότε το ακροφύσιο λέγεται "στραγγαλισμένο" (Choked). Αυτό σημαίνει ότι δεν είναι δυνατή η περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας εκτός εάν αυξηθεί η θερμοκρασία των καυσαερίων. Καθώς αυξάνεται η ολική πίεση προς τα πίσω, πάνω από την τιμή που αντιστοιχεί στο "στραγγαλισμό" του ακροφυσίου, η στατική πίεση στην εξαγωγή αυξάνεται πάνω από την ατμοσφαιρική. Αυτή η διαφορά πίεσης στο ακροφύσιο εξαγωγής δίνει την ώση πίεσης και είναι αποτελεσματική μόνο στην επιφάνεια εξόδου του ακροφυσίου.

Με τον συγκλίνοντα τύπο ακροφυσίου έχουμε απώλεια ενέργειας γιατί τα καυσαέρια δεν εκτονώνονται αρκετά γρήγορα ώστε να αποκτήσουν αμέσως την ατμοσφαιρική πίεση. Έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα συγκλίνον-αποκλίνον ακροφύσιο (Convergent-divergent) για να ανακτήσουμε μέρος της απώλειας ενέργειας.

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα τα καυσαέρια καθώς εισέρχονται στο συγκλίνον τμήμα επιταχύνονται μέχρι να αποκτήσουν την ταχύτητα του ήχου στο λαιμό ($M=1$). Στο αποκλίνον τμήμα επιταχύνονται σε υπερηχητικές ταχύτητες μέχρι την έξοδο του ακροφυσίου. Η αντίδραση στην αύξηση της ταχύτητας και της ορμής επιδρά στα εσωτερικά τοιχώματα αυτού του τμήματος. Από τις δυνάμεις που δημιουργούνται, αυτή η οποία είναι παράλληλη προς τον άξονα του ακροφυσίου, δημιουργεί παραπάνω αύξηση στην ώση.



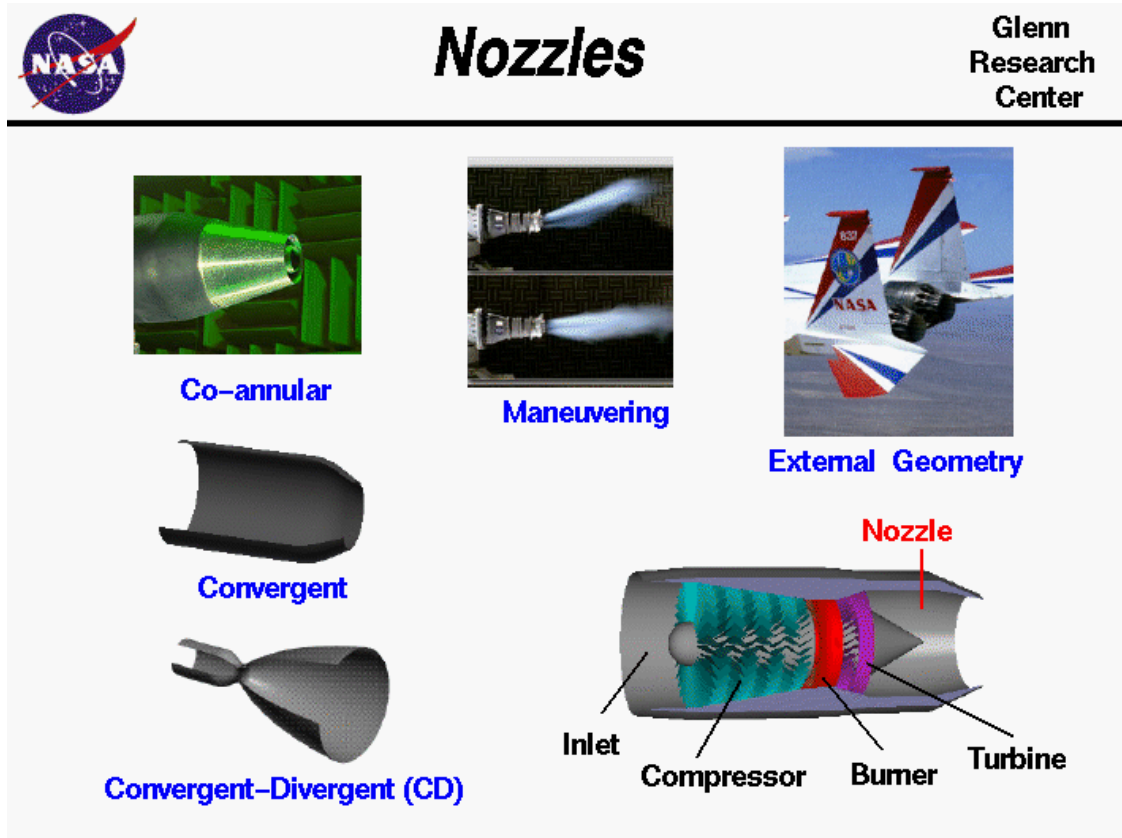
Ροή συγκλίνοντος-αποκλίνοντος ακροφυσίου

Ένα άλλο είδος ακροφυσίου είναι το ακροφύσιο εξαγωγής μεταβλητής διατομής όπου μπορούμε με διάφορους τρόπους να μεταβάλλουμε τη διατομή του ανάλογα με τις στροφές του κινητήρα. Κατά την εκκίνηση και σε χαμηλές

στροφές και θερμοκρασίες του κινητήρα θα πρέπει η διατομή του ακροφυσίου να είναι μεγάλη ώστε να έχουμε μειωμένη αντίσταση στη ροή από την πίεση στο στρόβιλο. Σε υψηλές στροφές και θερμοκρασίες του κινητήρα η διατομή του ακροφυσίου μικραίνει ώστε να έχουμε αύξηση της ώσης. Συνήθως χρησιμοποιείται σε μαχητικά αεροσκάφη που διαθέτουν σύστημα μετάκαυσης.

Στους αεροστρόβιλους διπλής ροής χρησιμοποιείται συνήθως το δι-δακτυλιοειδές ακροφύσιο(δύο δακτύλιοι, ο ένας εσωτερικά του άλλου)(Co-annular). Το θερμό ρεύμα καυσαερίων εξάγεται στην ατμόσφαιρα από τον εσωτερικό δακτύλιο, το ψυχρό ρεύμα από τον εξωτερικό δακτύλιο και τα δύο ρεύματα αναμιγνύονται στην έξοδο για την επίτευξη μέγιστης απόδοσης.

Άλλο είδος ακροφυσίου είναι το ακροφύσιο με το οποίο μπορούμε να επιτύχουμε αλλαγή της κατεύθυνσης των καυσαερίων μέχρι και αναστροφή της ώσης(Maneuvering). Χρησιμοποιείται στα μαχητικά αεροσκάφη, όπως F-15 κ.ά., για να γίνουν πιο ευέλικτα και πιο επιχειρησιακά. Στα επιβατικά αεροσκάφη χρησιμοποιείται για την ταχεία επιβράδυνση τους μετά την προσγείωση έτσι ώστε να σταματήσουν σε μικρό μήκος διαδρόμου και να αποφύγουν να χρησιμοποιήσουν σε μεγάλο βαθμό το σύστημα πέδησης. Στους κινητήρες με έλικα η αναστροφή ώσης συνήθως επιτυγχάνεται μόνο με αναστροφή του βήματος της έλικας ενώ στους αεροστρόβιλους των επιβατικών αεροσκαφών χρησιμοποιούνται διάφοροι τρόποι όπως θυρίδες οι οποίες ανοίγουν και αλλάζουν την κατεύθυνση της ροής του αέρα κ.ά..



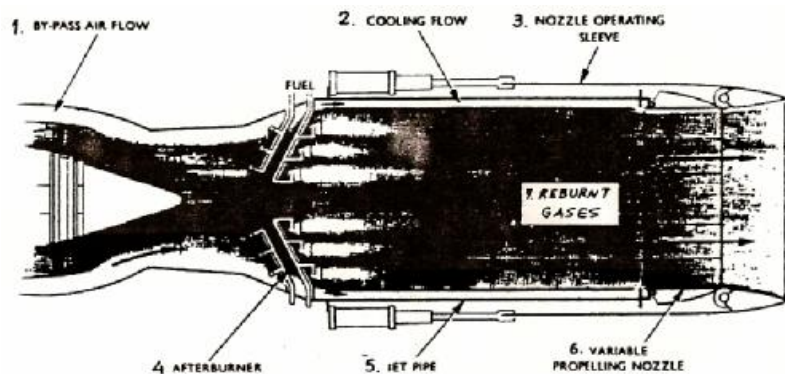
Είδη ακροφυσίων (Nozzles)

2.8. ΜΕΤΑΚΑΥΣΗ (Afterburner)

Σκοπός της μετάκαυσης είναι η αύξηση της ώσης ενός αεροστροβίλου κινητήρα για ένα σχετικά μικρό χρονικό διάστημα. Χρησιμοποιείται μόνο σε μαχητικά αεροσκάφη και χρησιμοποιήθηκε και στο υπερηχητικό επιβατικό αεροσκάφος Concorde. Το όφελος από την χρησιμοποίηση της μετακαύσης είναι η ταχεία απογείωση και άνοδος του αεροσκάφους καθώς και η βελτίωση των επιδόσεων του κατά την διάρκεια της μάχης.

Η διατομή του ακροφυσίου είναι μεγαλύτερη από εκείνη που θα είχε ο ίδιος κινητήρας χωρίς μετάκαυση και συνήθως χρησιμοποιείται το ακροφύσιο μεταβλητής διατομής. Έτσι αποφεύγεται η αύξηση της πίεσης που θα προέκυπτε

από την χρήση της μετάκαυσης και θα είχε δυσμενή αποτελέσματα στην λειτουργία του κινητήρα. Η ώση του κινητήρα με μετάκαυση, όταν δεν λειτουργεί το σύστημα, είναι λίγο μικρότερη από ότι αν ο κινητήρας δεν είχε σύστημα μετάκαυσης λόγω του διαφορετικού ακροφυσίου που χρησιμοποιείται και των εμποδίων που παρεμβάλλονται στην ροή εξαγωγής των καυσαερίων. Στους κινητήρες με διπλή ροή (ροή παράκαμψης) η μετάκαυση πραγματοποιείται μετά την συνένωση των δύο ρευμάτων (θερμού-ψυχρού) του αέρα.



Μετάκαυση σε αεροστρόβιλο διπλής ροής

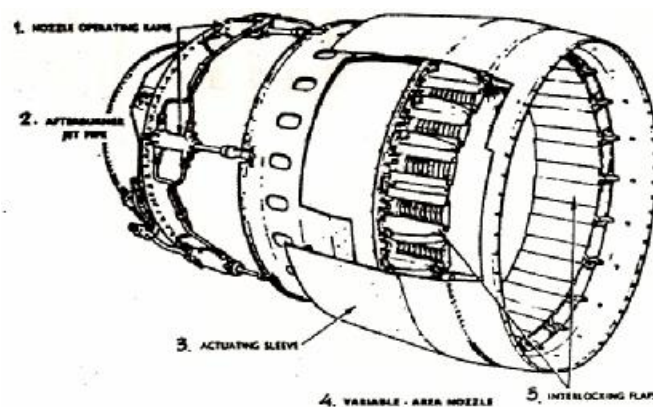
1. Ρεύμα αέρα παράκαμψης
2. Ροή ψύξης
3. Γρύλλοι ρύθμισης διατομής ακροφυσίου
4. Μετακαυστήρας
5. Σωλήνας εξαγωγής
6. Μεταβλητό προωθητικό ακροφύσιο
7. Καυσαέρια δεύτερης καύσης

Τα καυσαέρια από τον στρόβιλο εισέρχονται στον σωλήνα εξαγωγής. Επειδή η ταχύτητα τους είναι υψηλή, για να μπορέσει να επιτευχθεί καύση, με κατάλληλο σχήμα του σωλήνα εξαγωγής επιτυγχάνουμε μείωση της ταχύτητας και αύξηση της πίεσης. Και πάλι όμως η μείωση της ταχύτητας δεν είναι αρκετή για να μπορέσει το καύσιμο να καεί πριν εξέλθει από το ακροφύσιο, γι' αυτό και χρησιμοποιούνται συγκροτήματα που ονομάζονται σταθεροποιητές φλόγας μετά

τους εγχυτήρες καυσίμου. Αυτοί δημιουργούν στροβιλισμό της ροής και μεγαλύτερη μείωση της ταχύτητας ώστε να διευκολυνθεί η καύση, και έτσι έχουμε ανάφλεξη του μείγματος και σταθεροποίηση της φλόγας με την ελάχιστη απώλεια πίεσης σε όλες τις συνθήκες πτήσης.

Η έγχυση του καυσίμου για την μετάκαυση γίνεται από εγχυτήρες που τοποθετούνται περιφερειακά του σωλήνα εξαγωγής ενώ η ανάφλεξη γίνεται συνήθως μέσω σπινθήρα από σπινθηριστή που βρίσκεται δίπλα στον εγχυτήρα. Θα μπορούσε να υποθέσει κάποιος ότι λόγω των υψηλών θερμοκρασιών των καυσαερίων στο σωλήνα εξαγωγής, το καύσιμο από τους εγχυτήρες θα αναφλεγόταν αμέσως. Στην πράξη όμως δεν συμβαίνει γιατί η ανάφλεξη δεν είναι δυνατή σε θερμοκρασία κάτω από 800 βαθμούς κελσίου. Εάν και πάλι συνέβαινε κάτι τέτοιο, δεν θα ήταν εφικτό να συμβεί και σε μεγάλο ύψος όπου η ατμοσφαιρική πίεση είναι μικρότερη. Η φλόγα που αρχίζει την καύση πρέπει να έχει μεγάλη ένταση ώστε να είναι δυνατή η ανάφλεξη σε μεγάλα ύψη.

Στην πραγματικότητα το ακροφύσιο μεταβλητής διατομής αποτελείται από τον σταθερό σωλήνα εξαγωγής και το ακροφύσιο μεταβλητής διατομής που προσαρμόζεται σε αυτόν. Το ακροφύσιο μεταβλητής διατομής αποτελείται από αρθρωτές θυρίδες που με την πίεση των αερίων ωθούν το κινητό περίβλημα στην ανοικτή θέση. Στην κίνηση αυτή αντιστέκεται το περίβλημα λόγω της κίνησης που δέχεται από τους γρύλλους, οι οποίοι βρίσκονται περιφερειακά του σωλήνα εξαγωγής. (Βλέπε παρακάτω σχήμα)

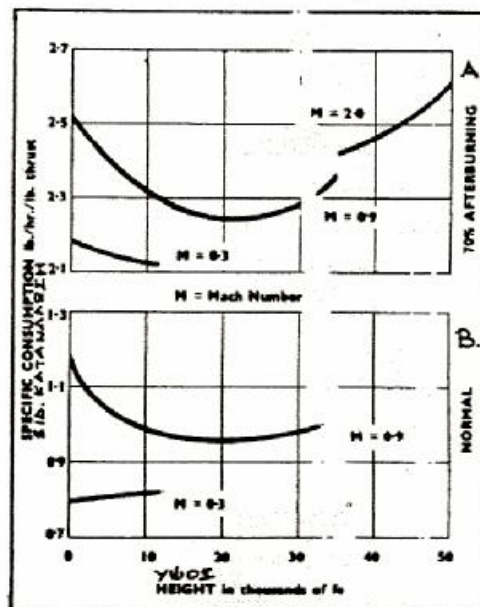


Πρωθητικό ακροφύσιο μετάκαυσης

1. Γρύλλοι μεταβολής διατομής του ακροφυσίου
2. Σταθερός σωλήνας εξαγωγής
3. Χιτώνιο ελέγχου
4. Πτερύγια που αλληλοσυνδέονται
5. Ακροφύσιο μεταβλητής διατομής

Η αύξηση της ώσης, που επιτυγχάνεται με την χρήση της μετάκαυσης, εξαρτάται από την αύξηση της ταχύτητας εξαγωγής των καυσαερίων, που με την σειρά της εξαρτάται από την αύξηση της θερμοκρασίας στην εξαγωγή. Θα πρέπει όμως να σημειώσουμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τη θερμοκρασία αντοχής των μετάλλων του τμήματος εξαγωγής.

Αναφερθήκαμε αρχικά στο μικρό χρονικό διάστημα χρήσης του συστήματος της μετάκαυσης. Αυτό διότι η χρήση του συστήματος αυξάνει σημαντικά την ειδική κατανάλωση καυσίμου, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, και απαιτεί μεγαλύτερες δεξαμενές καυσίμου άρα μεγαλύτερο βάρος. Η αύξηση της ώσης είναι κατά 70% μεγαλύτερη με τη χρήση του συστήματος.



Μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης με το ύψος για αεροστρόβιλο χωρίς μετάκαυση(B) και με μετάκαυση(A). Οι διάφορες καμπύλες δείχνουν την μεταβολή για διάφορους αριθμούς MAX.

Επειδή όμως η μείωση του χρόνου και της απόστασης απογείωσης είναι μεγάλη, η αύξηση της ειδικής κατανάλωσης δεν είναι τόσο τρομερή. Ακόμη η μετάκαυση χρησιμοποιείται για την απογείωση σε θερμές ημέρες ή αεροδρόμια με μεγάλο υψόμετρο γιατί αλλιώς θα έπρεπε να χρησιμοποιούνται μεγαλύτεροι κινητήρες, άρα αύξηση του βάρους και της οπισθέλκουσας του αεροσκάφους.

Συνεπώς σύμφωνα με τα παραπάνω η μετάκαυση θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο κατά την απογείωση και για μικρά χρονικά διαστήματα κατά την διάρκεια της μάχης, λόγω της μεγάλης αύξησης της ώσης που επιτυγχάνεται για να είναι αποτελεσματική.

2.9. ΣΧΕΔΙΑΣΗ – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Τα βασικότερα τμήματα ενός αεροστρόβιλου κινητήρα είναι αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω. Θα αναρωτηθεί κανείς πώς φθάνουμε στην κατασκευή ενός τέτοιου κινητήρα και πόσο απλή είναι αυτή η διαδικασία.

Η σχεδίαση ενός νέου κινητήρα και η μελέτη της κατασκευής του απαιτούν πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Κάθε ένα από τα παραπάνω τμήματα που αναφέρθηκαν πρέπει να σχεδιαστούν, να κατασκευαστούν και να ελεγχθούν μόνα τους αλλά και πάνω σε ολόκληρο τον κινητήρα, όταν αυτός συναρμολογηθεί, σε συνθήκες πολύ δυσμενέστερες από αυτές που θα συναντήσει στην πραγματική του λειτουργία. Οι δοκιμές στο έδαφος γίνονται μέσα σε ειδικές αεροδυναμικές σήραγγες, οι οποίες διαθέτουν τον απαραίτητο εξοπλισμό για την λειτουργία και την μέτρηση των χαρακτηριστικών ενός αεροστρόβιλου. Οι δοκιμές στον αέρα γίνονται αρχικά με τον κινητήρα

αναρτημένο σε κάποιο κατάλληλο αεροσκάφος και έπειτα επάνω στο αεροσκάφος στο οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί.

Η σχεδίαση ενός αεροστρόβιλου κινητήρα δημιουργεί την ανάγκη επίλυσης αεροδυναμικών, θερμοδυναμικών, αντοχής, και μηχανολογικών προβλημάτων. Τα αεροδυναμικά προβλήματα οφείλονται στις διαφορετικές συνθήκες ροής. Τα θερμοδυναμικά προβλήματα οφείλονται στους υψηλούς βαθμούς συμπίεσης και θερμοκρασιών, αλλά και στην δυσκολία στην απαγωγή θερμότητας και ψύξης των θερμών τμημάτων. Από πλευράς αντοχής τα τμήματα του κινητήρα καταπονούνται λόγω των αεροδυναμικών και φυγοκεντρικών δυνάμεων, καθώς και από τον κίνδυνο οξειδωσης και διάβρωσης λόγω των υψηλών θερμοκρασιών των καυσαερίων. Τα μηχανολογικά προβλήματα οφείλονται στις υψηλές ταχύτητες περιστροφής και τις απαιτήσεις ακρίβειας, αξιοπιστίας, μικρού όγκου και βάρους όλης της κατασκευής.

Επειδή ο χρόνος εξέλιξης ενός κινητήρα είναι πολύ μεγάλος και το κόστος πολύ υψηλό, οι κινητήρες οι οποίοι κατασκευάζονται βασίζονται σε προγενέστερους της ίδιας εταιρείας, οπότε η σχεδίαση και η κατασκευή συντομεύονται. Έτσι έχουμε οικογένειες κινητήρων οι οποίοι έχουν την ίδια βασική σχεδίαση αλλά διαφέρουν στα χαρακτηριστικά και στις επιδόσεις τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο κινητήρας Όλυμπος 593 Β της Αγγλικής Μπρίστολ ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στο Άγγλο-Γαλλικό υπερηχητικό αεροσκάφος Concorde. Πριν τοποθετηθεί σε αυτό είχε συμπληρώσει 14.000 ώρες επίγειων δοκιμών, 200 ώρες δοκιμών σε πτήση πάνω σε ένα αεροσκάφος Βάλκαν και 17.000 ώρες δοκιμών στο Concorde.

Η εξέλιξη του κινητήρα συνεχίζεται και μετά την χρησιμοποίησή του, γι' αυτό παράγονται και βελτιωμένοι τύποι κινητήρων. Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί ιδιαίτερη σημασία στη μείωση του θορύβου λειτουργίας και του καπνού από την εξαγωγή των καυσαερίων με τη βελτιωμένη σχεδίαση ορισμένων τμημάτων του κινητήρα.

2.10. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ – ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΟΤΤΟ-DIESEL

Ο κύκλος των αεροστρόβιλων κινητήρων έχει κάποιες ομοιότητες με τους κύκλους των άλλων μηχανών εσωτερικής καύσης.

Στους κινητήρες Otto ή Diesel ο αέρας περνάει από μια σειρά διαδικασιών που είναι παρόμοια με τους αεροστρόβιλους κινητήρες εσωτερικής καύσης. Ο ατμοσφαιρικός αέρας συμπιέζεται, θερμαίνεται, εκτονώνεται και αποβάλλεται στην ατμόσφαιρα για ψύξη και επανάληψη του κύκλου. Ωστόσο υπάρχουν δύο ζωτικής σημασίας διαφορές. Καταρχήν στους κινητήρες Otto και Diesel η διαδικασία του κύκλου πραγματοποιείται στο ίδιο μέρος (κύλινδρο του κινητήρα) σε διαφορετικούς χρόνους (διαφορετικές διαδρομές του εμβόλου). Στους αεροστρόβιλους κινητήρες η διαδικασία του κύκλου πραγματοποιείται σε διαφορετικούς χώρους (διαφορετικά τμήματα του κινητήρα) στον ίδιο χρόνο. Στην μηχανή εσωτερικής καύσης η διαδικασία του κύκλου πραγματοποιείται τμηματικά ενώ στον αεροστρόβιλο πραγματοποιείται ταυτόχρονα. Η δεύτερη διαφορά είναι ότι στις μηχανές εσωτερικής καύσης η καύση γίνεται με ισόχωρη μεταβολή ενώ η καύση στους αεροστρόβιλους πραγματοποιείται με σταθερή πίεση.

Το αποτέλεσμα της ταυτόχρονης διαδικασίας του κύκλου σε έναν αεροστρόβιλο κινητήρα είναι ότι μπορεί να συμπιέσει πολύ περισσότερο όγκο αέρα απ' ό τι μια μηχανή εσωτερικής καύσης του ίδιου όγκου. Ο στρόβιλος είναι συμπαγής και έχει υψηλό λόγο ώσης προς βάρος. Από την άλλη πλευρά ενώ είναι ευκολότερο να σχεδιαστούν αποδοτικότερα τμήματα του αεροστρόβιλου κινητήρα, στις μηχανές εσωτερικής καύσης είναι ευκολότερο να χρησιμοποιηθούν υψηλότερες θερμοκρασίες στον κύλινδρο επειδή η θερμοκρασία αναπτύσσεται στιγμιαία από ότι στην συνεχόμενη θερμοκρασία του θαλάμου καύσης ενός αεροστρόβιλου κινητήρα. Στο παρελθόν το θερμοδυναμικό όφελος από την υψηλότερη στιγμιαία θερμοκρασία των κινητήρων Diesel είχε εξουδετερώσει τα οφέλη από τους αεροστρόβιλους με αποδοτικά τμήματα. Η χρησιμοποίησή

ψυχόμενων πτερυγίων στους στροβίλους και η αύξηση των θερμοκρασιών λόγω των ανθεκτικότερων υλικών κατασκευής των πτερυγίων έκαναν τους αεροστρόβιλους να ξεπεράσουν την αποδοτικότητα των κινητήρων Diesel.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

ΚΙΝΗΤΗΡΑ TF-41

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

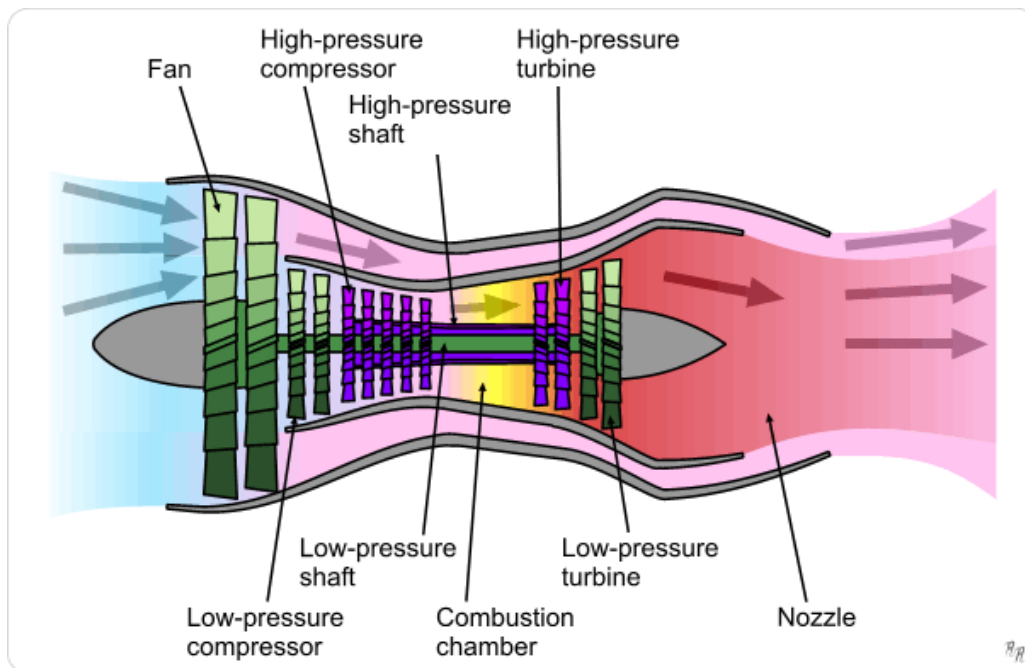
Παρακάτω θα προσπαθήσω να παρουσιάσω έναν πραγματικό αεροστρόβιλο κινητήρα διπλής ροής, δύο αξόνων, χωρίς μετάκαυση, τον αεροκινητήρα TF-41 (Turbo-Fan). Ο συγκεκριμένος κινητήρας χρησιμοποιήθηκε σε μαχητικά αεροσκάφη, A-7 Αμερικανικής κατασκευής, δεύτερης γενιάς με μεγάλη επιτυχία χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα στην λειτουργία του και στην συντήρηση του. Τέτοιου είδους πολεμικά αεροσκάφη διαθέτει και η Ελληνική Πολεμική Αεροπορία. Τα αεροσκάφη αυτά σχεδιάστηκαν την δεκαετία του '70, είναι βομβαρδιστικού τύπου και η αρχική τους σχεδίαση ήταν για χρήση σε αεροπλανοφόρα. Έχουν μεγάλη εμβέλεια και δυνατότητες, και αποτελούν ένα αξιόπιστο αεροσκάφος ακόμα και σήμερα.

Εμείς θα ασχοληθούμε περισσότερο με τον κινητήρα που φέρει το συγκεκριμένο αεροπλάνο και θα προσπαθήσουμε να αναλύσουμε τον τρόπο λειτουργίας του συγκεκριμένου κινητήρα, σύμφωνα και με αυτά που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, σε γενικές γραμμές. Η χρήση του συγκεκριμένου κινητήρα TF-41, μετά τα τόσα χρόνια λειτουργίας του, έδειξε πόσο αξιόπιστος είναι, λόγω των μικρών προβλημάτων που παρουσίασε και των ελάχιστων προβλημάτων από την ανναρόφηση ξένων αντικειμένων (FOD : Foreign Object Damage) όπως πτηνά κ.ά.. Πολλά προβλήματα παρουσιάζονται στους κινητήρες από την ανναρόφηση τέτοιων αντικειμένων και η ικανότητα του κινητήρα αυτού να παρουσιάζει ελάχιστα προβλήματα από αυτά, αποτελεί ένα από τα πλεονεκτήματά του. Μερικά χρόνια μετά την αρχική σχεδίαση του κινητήρα, μελετήθηκε η χρήση της μετάκαυσης στο συγκεκριμένο κινητήρα, με

ικανοποιητικά αποτελέσματα αλλά δεν προχώρησε η παραγωγή του συγκεκριμένου τύπου κινητήρα.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα του συγκεκριμένου κινητήρα είναι ότι ήταν ο πρώτος κινητήρας και αεροσκάφος στο οποίο χρησιμοποιήθηκε σύστημα καταγραφής παραμέτρων του κινητήρα και του αεροσκάφους, το οποίο αποτελούσε καινοτομία για την εποχή του. Αυτό το σύστημα καταγραφής δεν είναι τίποτα άλλο από το λεγόμενο “μαύρο κουτί” που χρησιμοποιείται σήμερα σε όλα τα στρατιωτικά και πολιτικά αεροσκάφη, στην πιο σύγχρονη μορφή του. Από την αποκωδικοποίηση αυτού του κουτιού μπορούμε να πάρουμε σημαντικές πληροφορίες για την διερεύνηση μιας βλάβης και τα στοιχεία της πτήσης του αεροσκάφους. Λέγεται μαύρο, παρόλο που δεν είναι, για την ευκολότερη κατανόηση του από τον κόσμο. Περισσότερες πληροφορίες για το συγκεκριμένο σύστημα του κινητήρα TF-41 θα αναφέρουμε στο επόμενο κεφάλαιο.

Μια σύγχρονη απεικόνιση του αεροστρόβιλου κινητήρα διπλής ροής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Fan: Ανεμιστήρας

Low-pressure compressor: Συμπιεστής χαμηλής πίεσης

High-pressure compressor: Συμπιεστής υψηλής πίεσης

Low-pressure shaft: Άξονας χαμηλής πίεσης

High-pressure shaft: Άξονας υψηλής πίεσης

Combustion chamber: Θάλαμος καύσης

High-pressure turbine: Στρόβιλος υψηλής πίεσης

Low-pressure turbine: Στρόβιλος χαμηλής πίεσης

Nozzle: Ακροφύσιο

Η διάταξη των παραπάνω εξαρτημάτων είναι όπως βρίσκονται στην πραγματικότητα τα εξαρτήματα στον κινητήρα TF-41.

3.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Τα χαρακτηριστικά του κινητήρα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Εταιρεία κινητήρα	: ALLISON σε συνεργασία με τη ROLLS-ROYCE
Τύπος	: Turbo Fan (Διπλής ροής) - Αεροστρόβιλος (Gas Turbine) Εσωτερικής Καύσεως - Αξονικής Ροής (Axial Flow) - Διπλού συμπιεστή (Dual Compressor)
Ώση	: 15.000 lbs
Βάρος	: 3.350 lbs
Λόγος ώσης προς βάρος	: 4,5 lbs / 1 lbs
Επιτάχυνση μάζας-αέρα	: 263 lbs / 1 sec
Λόγος συμπίεσης (compression ratio)	: 21,4 : 1
Λόγος παράκαμψης (Bypass ratio)	: 0,74 :1

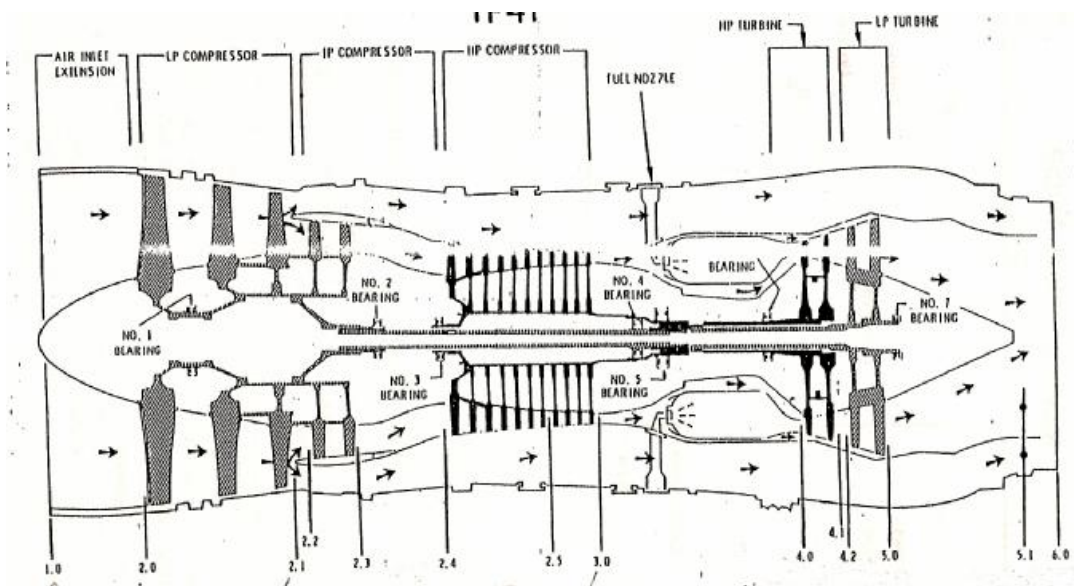
Ροή παράκαμψης(Bypass flow) : 43%

Χαρακτηριστικό αυτού του τύπου κινητήρα αποτελεί η ροή παράκαμψης (δευτερεύουσα ροή) η οποία έχει πολλά πλεονεκτήματα που θα αναφέρουμε παρακάτω. Στο συγκεκριμένο κινητήρα η ροή παράκαμψης αντιστοιχεί στο 43% της κύριας ροής.

3.3. ΣΤΑΘΜΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΑ TF-41

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι διάφοροι σταθμοί που χρησιμοποιούνται για τον κινητήρα TF-41 και όπως φαίνεται είναι σύμφωνοι με τους κανόνες που αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο για τους σταθμούς διεθνώς. Έτσι διαβάζοντας την βιβλιογραφία του συγκεκριμένου κινητήρα μπορούμε να κατανοήσουμε την έννοια για παράδειγμα του συμβόλου T3, που συμβολίζει την θερμοκρασία εξόδου από τον συμπιεστή υψηλής πίεσης. Ας δούμε αναλυτικότερα το σημείο του κινητήρα που συμβολίζει ο κάθε αριθμός.

- 1.0 : Είσοδος στο κινητήρα
- 2.0 : Είσοδος στο συμπιεστή χαμηλής (LP compressor)
- 2.1 : Είσοδος στη ροή παράκαμψης
- 2.2 : Είσοδος στο συμπιεστή ενδιάμεσης πίεσης (IP compressor)
- 2.3 : Έξοδος του συμπιεστή ενδιάμεσης πίεσης
- 2.4 : Είσοδος στο συμπιεστή υψηλής πίεσης (HP compressor)
- 2.5 : 7^η βαθμίδα του συμπιεστή υψηλής πίεσης
- 3.0 : Έξοδος του συμπιεστή υψηλής πίεσης
- 4.0 : Είσοδος στο στροβίλο υψηλής πίεσης
- 4.1 : Έξοδος του στροβίλου υψηλής πίεσης
- 4.2 : Είσοδος στο στροβίλο χαμηλής πίεσης
- 5.0 : Έξοδος του στροβίλου χαμηλής πίεσης
- 5.1 : Σημείο μέτρησης της πίεσης και της θερμοκρασίας των καυσαερίων
- 6.0 : Έξοδος από τον κινητήρα



Σχηματικό διάγραμμα κινητήρα TF-41

Παράλληλα στο παραπάνω διάγραμμα φαίνονται ο ακριβής αριθμός των βαθμίδων του συμπιεστή και των στροβίλων καθώς και ο αριθμός των τριβέων (Bearing) του κινητήρα στα οποία θα αναφερθούμε παρακάτω.

3.4. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ BRAYTON

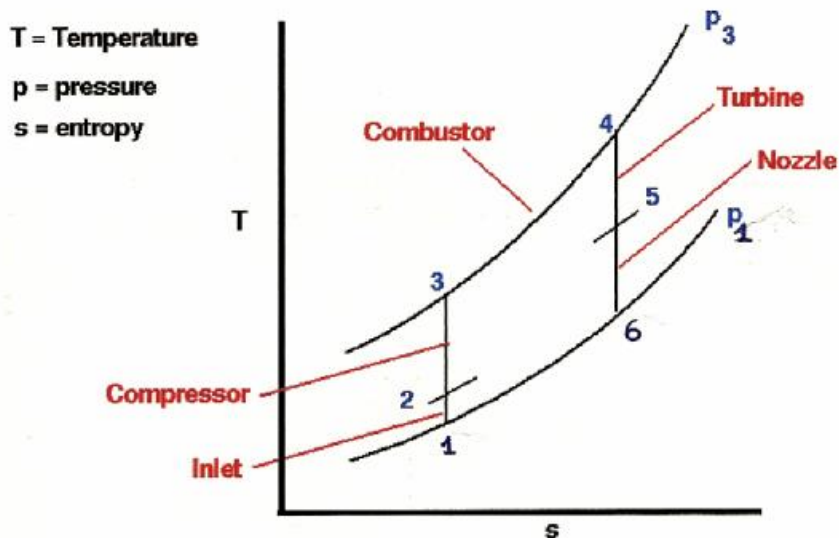
Όπως είπαμε και παραπάνω η λειτουργία όλων των αεροστροβίλων κινητήρων περιγράφεται από τον θερμοδυναμικό κύκλο του Brayton. Έτσι και η λειτουργία του αεροστροβίλου κινητήρα διπλής ροής TF-41 περιγράφεται από αυτόν το κύκλο λειτουργίας. Έχοντας αναφερθεί προηγουμένως και στους σταθμούς του συγκεκριμένου κινητήρα, μπορούμε να αναλύσουμε τον κύκλο λειτουργίας αυτού του κινητήρα σύμφωνα με το προηγούμενο σχηματικό διάγραμμα.

Το ελεύθερο ρεύμα αέρα από τον σταθμό 1 έως το σταθμό 3, δηλαδή την έξοδο του συμπιεστή υψηλής πίεσης του κινητήρα TF-41, συμπιέζεται. Θεωρώντας τις συνθήκες ιδανικές η συμπίεση είναι ισεντροπική και η θερμοκρασία και η πίεση αυξάνονται όπως φαίνεται στο διάγραμμα.



Ideal Brayton Cycle T-s diagram

Glenn
Research
Center



Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος του Brayton κινητήρα TF-41

Από το σταθμό 3 στο σταθμό 4 πραγματοποιείται η καύση του καυσίμου στους θαλάμους καύσης, όπως φαίνεται από το σχηματικό διάγραμμα του κινητήρα TF-41. Κατά την διάρκεια αυτής της μεταβολής η πίεση παραμένει σταθερή και η θερμοκρασία αυξάνεται σημαντικά. Από τον σταθμό 4 στο σταθμό 6 τα καυσαέρια εκτονώνονται (πτώση πίεσης) επάνω στους στροβίλους. Η μεταβολή είναι ισεντροπική και η θερμοκρασία μειώνεται όσο αυξήθηκε από τον σταθμό 1 στο σταθμό 3. Από τον σταθμό 6 στο σταθμό 1, τα καυσαέρια επιστρέφουν στο ελεύθερο ρεύμα αέρα υπό σταθερή πίεση. Στην πράξη το διάγραμμα έχει μικρή κλίση λόγω των απωλειών ενέργειας που έχουμε κατά την διάρκεια αυτών των μεταβολών. Το εμβαδόν που περικλείουν αυτές οι μεταβολές εκφράζει το έργο του κινητήρα, δηλαδή την ώση που παράγει.

3.5. ΚΥΡΙΑ ΤΜΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ TF-41

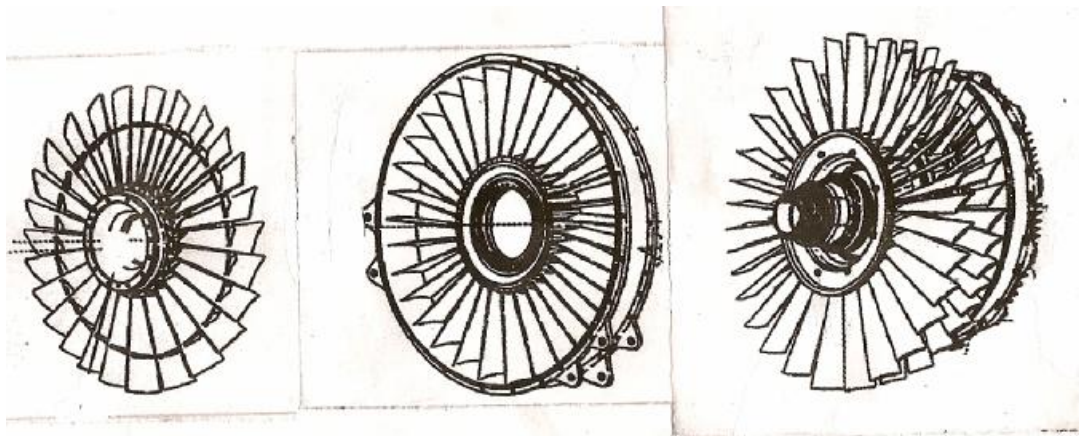
3.5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΑΕΡΑ (Inlet)

Η εισαγωγή αέρα στον αεροκινητήρα TF-41 είναι μια απλή υποηχητική εισαγωγή (Subsonic). Είναι μια συνεχής ομαλή καμπύλη, μεγάλου μήκους. Αυτό συμβαίνει λόγω σχεδίασης του αεροσκάφους γιατί ο κινητήρας βρίσκεται στο πίσω μέρος του διαμήκη άξονα του. Έχει μικρή οπισθέλκουσα και εξασφαλίζει ομαλή ροή του αέρα προς τον συμπιεστή με ικανοποιητική λειτουργία.

3.5.2. ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ (Compressors)

Ο συμπιεστής που χρησιμοποιεί ο συγκεκριμένος κινητήρας είναι αξονικής ροής και έχει μεγάλο λόγο συμπίεσης 21.4 : 1. Ο ρότορας κατασκευάζεται από κράμα αλουμινίου(η πρώτη βαθμίδα), τιτάνιο(η δεύτερη βαθμίδα), ατσάλι(η τρίτη βαθμίδα) και ο στάτορας από τιτάνιο. Αποτελείται από δύο συμπιεστές όπως φαίνεται και στο σχηματικό διάγραμμα κινητήρα. Τον συμπιεστή χαμηλής-ενδιάμεσης πίεσης και τον συμπιεστή υψηλής πίεσης.

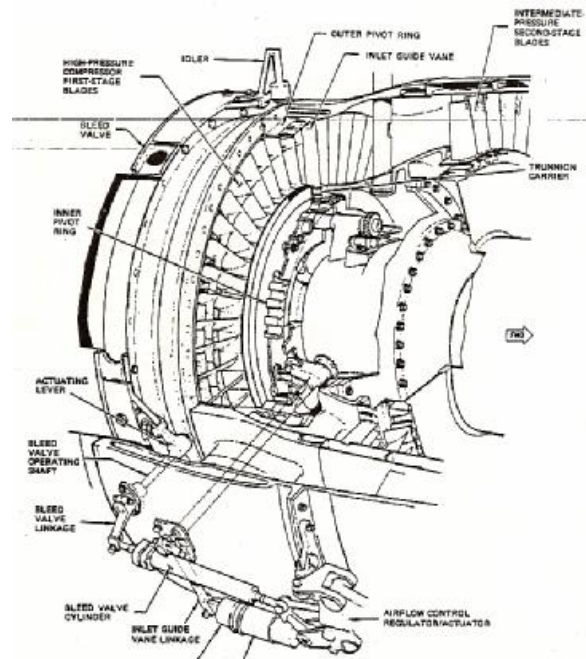
Ο συμπιεστής χαμηλής πίεσης αποτελείται από τρεις βαθμίδες πτερυγίων. Μπορεί να περιστραφεί με μέγιστη ταχύτητα 9.114 στροφές ανά λεπτό και η φορά περιστροφής του, βλέποντας τον κινητήρα από πίσω, είναι αντίθετη της φοράς των δεικτών του ρολογιού. Οι τρεις βαθμίδες των πτερυγίων του συμπιεστή χαμηλής αποτελούν τον ανεμιστήρα (Fan) του αεροκινητήρα ο οποίος έχει την δυνατότητα να επιταχύνει 263 lbs αέρα ανά δευτερόλεπτο. Η ροή του αέρα συμπιέζεται από τον συμπιεστή χαμηλής πίεσης και έπειτα ένα ποσοστό του αέρα περνά στον συμπιεστή ενδιάμεσης πίεσης, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό του αέρα διοχετεύεται προς την δευτερεύουσα ροή, τη ροή παράκαμψης (By-pass flow). Ο συμπιεστής ενδιάμεσης πίεσης αποτελείται από δύο βαθμίδες πτερυγίων. Τα κινητά του πτερύγια κατασκευάζονται από ατσάλι και τα σταθερά του από τιτάνιο.



Συμπιεστής χαμηλής και ενδιάμεσης πίεσης

Ο κινητήρας TF-41 είναι διπλού άξονα. Αποτελείται από τον άξονα χαμηλής πίεσης και από τον άξονα υψηλής πίεσης, όπως είδαμε στην σύγχρονη απεικόνιση του αεροστρόβιλου κινητήρα διπλής ροής. Ο άξονας χαμηλής πίεσης είναι με ιδιαίτερη διάταξη τοποθετημένος εσωτερικά του άξονα υψηλής πίεσης. Ο στρόβιλος χαμηλής πίεσης συνδέεται στην μια άκρη του στον άξονα χαμηλής πίεσης και κινεί τον συμπιεστή χαμηλής-ενδιάμεσης πίεσης, ο οποίος είναι συνδεδεμένος στην άλλη άκρη του άξονα. Το ίδιο συμβαίνει και με τον στρόβιλο υψηλής πίεσης, ο οποίος κινεί τον συμπιεστή υψηλής πίεσης μέσω του άξονα υψηλής πίεσης στον οποίο είναι συνδεδεμένοι.

Μετά τον συμπιεστή χαμηλής-ενδιάμεσης πίεσης είναι τοποθετημένα μια σειρά οδηγών πτερυγίων μεταβαλλόμενης γωνίας (Inlet Guide Vanes), και πριν τον συμπιεστή υψηλής πίεσης. Ο συγκεκριμένος συμπιεστής είναι κατασκευασμένος να αποδίδει καλύτερα στις υψηλές ταχύτητες και στροφές του κινητήρα. Έτσι για την εξίσου καλή λειτουργία του συμπιεστή στις χαμηλές στροφές αλλά και για τον "καθαρισμό" του κινητήρα από απώλειες στήριξης του συμπιεστή χρησιμοποιείται αυτή η σειρά πτερυγίων (48 σταθερά πτερύγια μεταβαλλόμενης γωνίας).

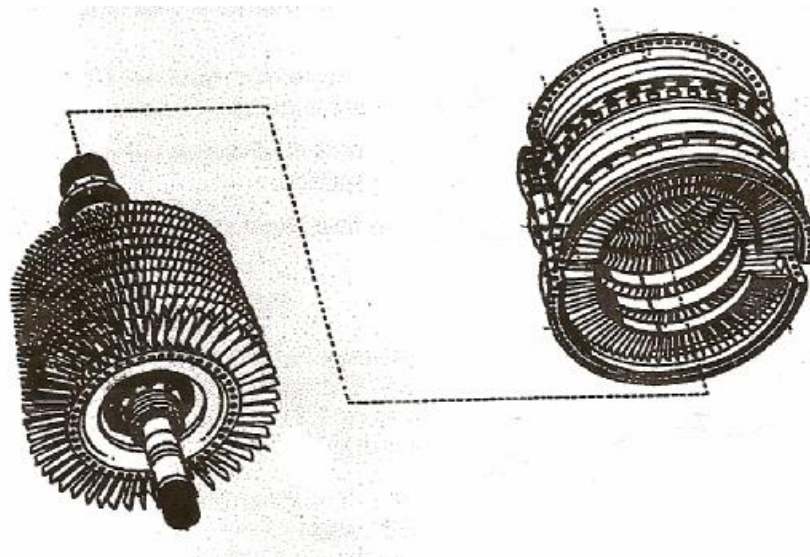


Εσωτερικά οδηγιά πτερύγια μεταβαλλόμενης γωνίας (Inlet Guide Vanes)

Η απώλεια στήριξης όλων των βαθμίδων του συμπιεστή μπορεί να οφείλεται στην διατάραξη της ροής του αέρα, δηλαδή η ροή του αέρα γύρω από τα πτερύγια να τείνει να αποκολληθεί και να γίνει στροβιλώδης, στη διαταραχή της ροής του καυσίμου από απότομες αυξομειώσεις της ισχύς του κινητήρα, από την αναρρόφηση ξένου αντικειμένου (F.O.D.) ή την αστοχία κάποιου πτερυγίου του συμπιεστή με αποτέλεσμα την διατάραξη της ροής και από την κακή λειτουργία των πτερυγίων (Inlet Guide Vanes).

Ο συμπιεστής υψηλής πίεσης αποτελείται από 11 βαθμίδες πτερυγίων και μπορεί να περιστραφεί με μέγιστη ταχύτητα 12.915 στροφές ανά λεπτό. Οι οχτώ πρώτες βαθμίδες του είναι κατασκευασμένες από τιτάνιο και οι επόμενες από ατσάλι. Είναι συνδεδεμένος με τον άξονα υψηλής πίεσης και παίρνει κίνηση από τον στρόβιλο υψηλής πίεσης, ο οποίος είναι και αυτός συνδεδεμένος στην άλλη πλευρά του άξονα. Ο αέρας που περνά από τον συμπιεστή υψηλής πίεσης συμπιέζεται ακόμη περισσότερο και οδηγείται στους θαλάμους καύσης. Αέρας από την 7^η βαθμίδα του συμπιεστή υψηλής πίεσης χρησιμοποιείται μέσω

κατάλληλων διατάξεων για την ψύξη του στροβίλου χαμηλής πίεσης, των σταθερών πτερυγίων και των δίσκων του, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται. Εξίσου αέρας από την 11^η βαθμίδα του συμπιεστή υψηλής πίεσης χρησιμοποιείται για την ψύξη των σταθερών πτερυγίων και των δίσκων του στροβίλου υψηλής πίεσης. Χρησιμοποιείται αέρας από διαφορετικές βαθμίδες του συμπιεστή για να μην διαταρράσεται η ροή του αέρα σε αυτών αλλά και γιατί οι ανάγκες του στροβίλου υψηλής πίεσης για ψύξη είναι μεγαλύτερες, λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται σε αυτόν.



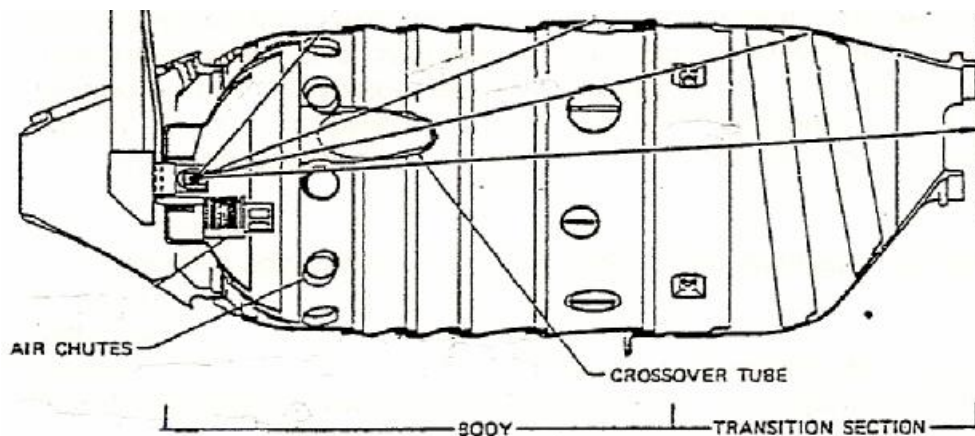
Συμπιεστής υψηλής πίεσης

3.5.3. ΘΑΛΑΜΟΙ ΚΑΥΣΗΣ (Combustion chamber)

Το τμήμα καύσης του κινητήρα TF-41 αποτελείται από δέκα θαλάμους καύσης σωληνο-δακτυλιοειδούς τύπου (can-annular). Σε κάθε θάλαμο καύσης, στο κέντρο του μπροστά τμήματος του, τοποθετείται ένας ψεκαστήρας. Επίσης υπάρχουν δύο σπινθηριστές σε αντιδιαμετρικούς θαλάμους καύσης. Το καύσιμο που ψεκάζεται αναμιγνύεται με τον αέρα και αναφλέγεται με την βοήθεια των δύο σπινθηριστών. Ταυτόχρονα η φλόγα μεταδίδεται στους υπόλοιπους θαλάμους καύσης οι οποίοι δεν διαθέτουν σπινθηριστές, μέσω των φλογωσωλήνων που

τους συνδέουν. Μετά την εκκίνηση οι σπινθηριστές σταματούν να λειτουργούν και η φλόγα διατηρείται μέσα στους θαλάμους καύσης.

Υπάρχει ένας διακόπτης με τον οποίο μπορείς να ενεργοποιήσεις τους σπινθηριστές χειροκίνητα. Αυτός χρησιμοποιείται από τους χειριστές σε μεγάλα ύψη όπου οι θερμοκρασίες είναι πάρα πολύ χαμηλές. Ακόμη ο κινητήρας διαθέτει ένα σύστημα το οποίο ενεργοποιεί τους σπινθηριστές. Το σύστημα αυτό τίθεται σε λειτουργία αυτόματα όταν έχουμε απότομες αυξομειώσεις της πίεσης εξόδου του αεροσυμπιεστή υψηλής πίεσης (P3), δηλαδή απότομες μεταβολές της ισχύος του κινητήρα. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται ο κίνδυνος να σβήσει η φλόγα στους θαλάμους καύσης, άρα ο κινητήρας, κατάσταση επικίνδυνη για τον χειριστή του αεροσκάφους κατά την διάρκεια της πτήσης.



Θάλαμος καύσης κινητήρα TF-41

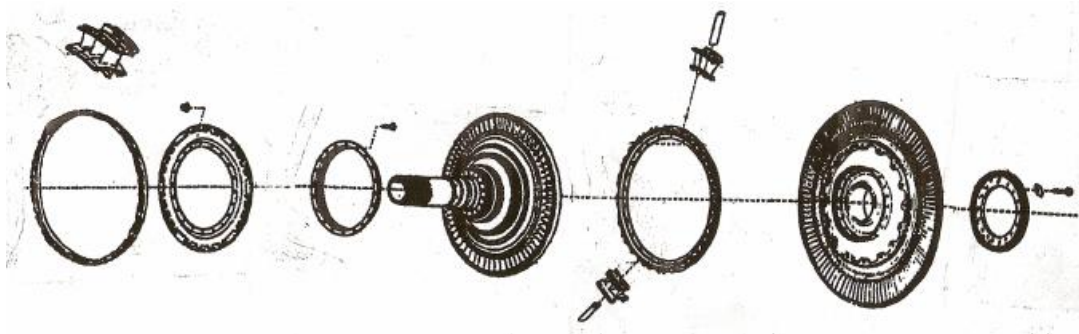
Ο θάλαμος καύσης αποτελείται από το κύριο σώμα (BODY) και από το μεταβαλλόμενο κομμάτι (TRANSITION SECTION). Ο θάλαμος καύσης είναι διαιρούμενος για να μπορεί να επιθεωρείται εσωτερικά αλλά και για να επιτυγχάνονται οι επιθυμητές διαστάσεις που προβλέπει ο κατασκευαστής για την τοποθέτηση του στον κινητήρα. Στο σχήμα φαίνονται οι σωλήνες (CROSSOVER TUBE) που συνδέουν τους θαλάμους καύσης μεταξύ τους και χρησιμοποιούνται για την διάδοση της φλόγας κατά την εκκίνηση και την

λειτουργία των θαλάμων στην ίδια πίεση. Ακόμη φαίνονται και οι οπές εισαγωγής του αέρα (AIR CHUTES) στους θαλάμους καύσης.

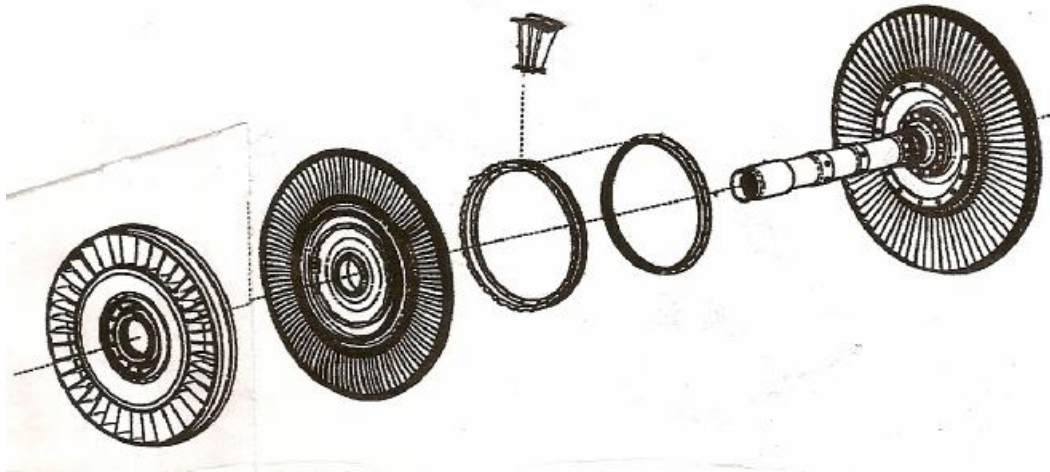
3.5.4. ΣΤΡΟΒΙΛΟΙ (Turbines)

Το τμήμα των στροβίλων του κινητήρα αποτελείται από τον στρόβιλο υψηλής πίεσης και μετά τον στρόβιλο χαμηλής πίεσης όπως φαίνεται και στο σχηματικό διάγραμμα του κινητήρα.

Ο στρόβιλος υψηλής πίεσης αποτελείται από δύο βαθμίδες πτερυγίων. Είναι αυτός ο οποίος κινεί τον συμπιεστή υψηλής πίεσης μέσω του άξονα υψηλής πίεσης. Ο στρόβιλος χαμηλής πίεσης αποτελείται και αυτός από δύο βαθμίδες πτερυγίων. Κινεί τον συμπιεστή χαμηλής πίεσης μέσω του άξονα χαμηλής πίεσης. Η ψύξη των κινητών πτερυγίων των στροβίλων χαμηλής και υψηλής πίεσης γίνεται αντίστοιχα από αέρα που προέρχεται από την 7^η και 11^η βαθμίδα του συμπιεστή υψηλής πίεσης.



Στρόβιλος υψηλής πίεσης



Στρόβιλος χαμηλής πίεσης

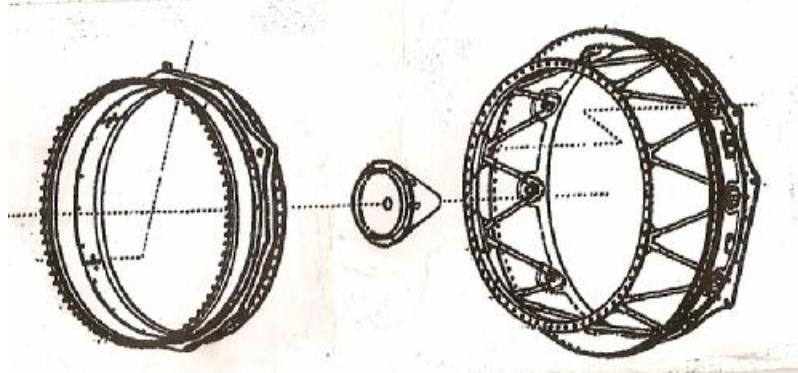
Οι απαιτήσεις για μεγαλύτερη ώση των κινητήρων οδηγούν σε αύξηση των θερμοκρασιών στο στρόβιλο. Έτσι τα πτερύγια τους θα πρέπει να κατασκευάζονται από υλικά που να αντέχουν στις υψηλές θερμοκρασίες αλλά και να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Λόγω της μεγάλης ώσης του κινητήρα μας, 15.000 lbs, και των πολύ υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται αμέσως μετά τους θαλάμους καύσης, η πρώτη βαθμίδα του στροβίλου υψηλής πίεσης κατασκευάζεται από χάλυβα(ατσάλι) ενώ οι υπόλοιπες από κράμα νικελίου.

3.5.5. ΤΜΗΜΑ ΕΞΑΓΩΓΗΣ (Exhaust Section)

Το τμήμα εξαγωγής του κινητήρα TF-41 αποτελείται από τον μείκτη της κύριας ροής και της ροής παράκαμψης και από το ακροφύσιο εξαγωγής των καυσαερίων στην ατμόσφαιρα .

Ο μείκτης της κύριας ροής και της ροής παράκαμψης (Bypass flow) είναι το σημείο εκείνο του κινητήρα, αμέσως μετά τους στροβίλους, στο οποίο έχουμε ανάμειξη του θερμού ρεύματος αέρα από τους στροβίλους και του ψυχρού ρεύματος από την ροή παράκαμψης. Αμέσως μετά την ανάμειξη αυτή υπάρχουν μεγάλα σταθερά πτερύγια τα οποία ευθυγραμμίζουν τη ροή των καυσαερίων προς το ακροφύσιο. Ο κινητήρας TF-41 χρησιμοποιεί ελαφρού τύπου συγκλίνον

ακροφύσιο (convergent) με το οποίο επιτυγχάνει αύξηση της ταχύτητας εξαγωγής των καυσαερίων στην ατμόσφαιρα.

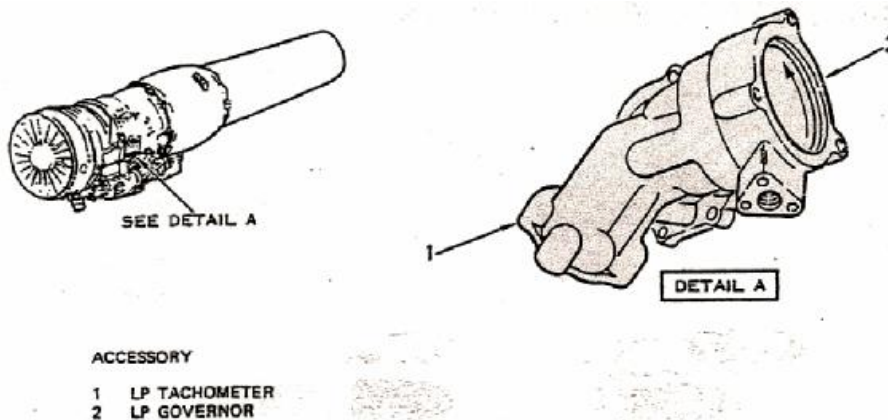


Μείκτης της κύριας ροής και της ροής παράκαμψης

3.5.6. ΤΜΗΜΑ ΠΑΡΕΛΚΟΜΕΝΩΝ (Accessory Section)

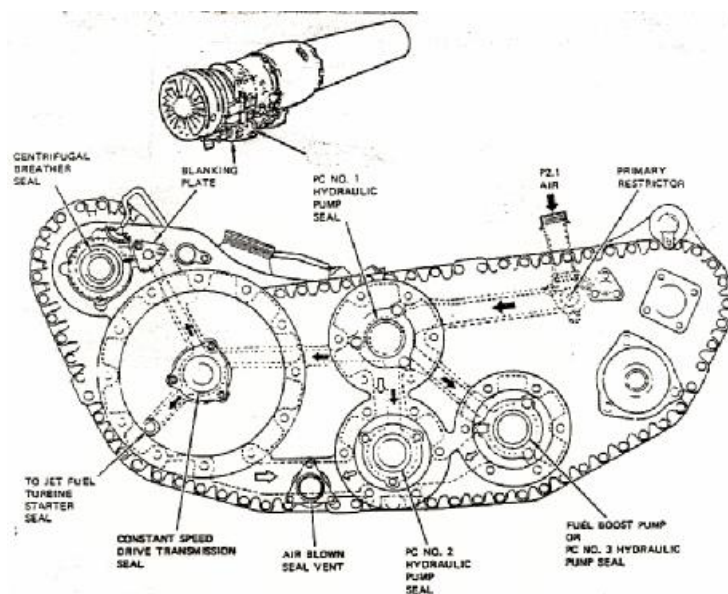
Το τμήμα παρελκομένων του κινητήρα TF-41 περιλαμβάνει τρία κιβώτια ταχυτήτων τα οποία δίνουν κίνηση σε επιμέρους εξαρτήματα που είναι απαραίτητα για την λειτουργία του κινητήρα. Το εσωτερικό κιβώτιο ταχυτήτων, κιβώτιο χαμηλής ταχύτητας και το κιβώτιο γραναζιών υψηλής ταχύτητας.

Το εσωτερικό κιβώτιο ταχυτήτων παίρνει τη κίνηση μέσω ενός άξονα, από τον συμπιεστή χαμηλής πίεσης και δίνει κίνηση στο κιβώτιο χαμηλής ταχύτητας και από τον συμπιεστή υψηλής πίεσης και δίνει κίνηση στο κιβώτιο υψηλής ταχύτητας.



Κιβώτιο χαμηλής ταχύτητας

Το εσωτερικό κιβώτιο ταχυτήτων βρίσκεται εσωτερικά του κινητήρα. Το κιβώτιο χαμηλής ταχύτητας βρίσκεται εξωτερικά του κινητήρα, στην αριστερή του πλευρά. Ο λόγος της ταχύτητας του προς την ταχύτητα του άξονα χαμηλής είναι 0.46 : 1. Το κιβώτιο δίνει κίνηση στη γεννήτρια στροφομέτρου (LP tachometer) για την ένδειξη της ταχύτητας του άξονα χαμηλής καθώς και στον ρυθμιστή στροφών χαμηλής πίεσης (LP Governor).



Κιβώτιο υψηλής ταχύτητας

Το κιβώτιο υψηλής ταχύτητας βρίσκεται και αυτό εξωτερικά του κινητήρα, στο κατώτερο σημείο του, και κατασκευάζεται από κράμα μετάλλου μαγνησίου. Ο λόγος της ταχύτητας του προς την ταχύτητα του άξονα υψηλής είναι 0.57 : 1. Το κιβώτιο δίνει κίνηση σε διάφορα εξαρτήματα του κινητήρα όπως ο εκκινητήρας, οι αντλίες υδραυλικής πίεσης, οι οποίες δίνουν πίεση για την κίνηση των πηδαλίων του αεροσκάφους, ο κύριος και ο δευτερεύον ρυθμιστής καυσίμου, οι αντλίες χαμηλής και υψηλής πίεσης καυσίμου, στον σταθεροποιητή στροφών για την κίνηση της γεννήτριας παροχής ηλεκτρικού ρεύματος και στην γεννήτρια

στροφομέτρου (NH tachometer) για την ένδειξη της ταχύτητας υψηλής πίεσης. Όλα τα κιβώτια ταχυτήτων λιπαίνονται από το κεντρικό σύστημα λίπανσης του κινητήρα, το, οποίο είναι τύπου ξηράς κυστίδας. Επίσης στο κιβώτιο υψηλής ταχύτητας γίνεται η ατμοσφαιρική αποκατάσταση όλου του συστήματος λίπανσης του κινητήρα προς την ατμόσφαιρα.

3.6. ΤΡΙΒΕΙΣ (BEARINGS)

Για την στήριξη και ομαλή λειτουργία των κινούμενων τμημάτων του κινητήρα, όπως οι συμπιεστές και οι στρόβιλοι, χρησιμοποιούνται οι τριβείς. Οι τριβείς είναι επτά και φαίνονται αριθμημένοι επάνω στο κινητήρα στο σχηματικό του διάγραμμα.

Ο No 1, ο οποίος είναι σταθερά πακτωμένος, και ο No 2 τριβέας είναι κυλινδροτριβείς (Roller Bearings), χρησιμοποιούνται για την ομαλή λειτουργία του ρότορα του συμπιεστή χαμηλής-ενδιάμεσης πίεσης και δέχονται ακτινικά φορτία. Ο No 3 και ο No 4 τριβέας χρησιμοποιούνται για την ομαλή λειτουργία του ρότορα του συμπιεστή υψηλής πίεσης. Ο No 3 είναι κυλινδροτριβέας και δέχεται ακτινικά φορτία και ο No 4 είναι σφαιροτριβέας (Ball Bearing) και δέχεται ακτινικά και ωστικά φορτία. Ο No 5 τριβέας είναι σφαιροτριβέας, χρησιμοποιείται για την στήριξη και ομαλή λειτουργία των αξόνων χαμηλής και υψηλής πίεσης και δέχεται ακτινικά και ωστικά φορτία. Ο No 6 τριβέας είναι κυλινδροτριβέας, χρησιμοποιείται για την ομαλή λειτουργία του στρόβιλου υψηλής πίεσης και δέχεται ακτινικά φορτία. Τέλος ο No 7 τριβέας, ο οποίος είναι κυλινδροτριβέας και σταθερά πακτωμένος, χρησιμοποιείται για την ομαλή λειτουργία του στρόβιλου χαμηλής πίεσης και δέχεται μόνο ακτινικά φορτία.

Όλοι οι τριβείς σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας του κινητήρα λιπαίνονται ικανοποιητικά από το κεντρικό σύστημα λίπανσης του, με ειδικού τύπου ελαιολιπαντικό.

3.7. ΡΟΗ ΠΑΡΑΚΑΜΨΗΣ (BYPASS FLOW)

Είπαμε παραπάνω ότι χαρακτηριστικό των κινητήρων με διπλή ροή (Turbofan) είναι η ροή παράκαμψης (δευτερεύουσα ροή). Η ροή παράκαμψης αποτελεί το 43% της κύριας ροής και ο λόγος παράκαμψης είναι 0.74 :1. Σκοπός της ροής αυτής είναι να αυξάνει τη μάζα του επιταχυνόμενου αέρα ώστε να επιτυγχάνουμε μεγαλύτερη ώση χωρίς να αυξηθεί το μέγεθος του βασικού κινητήρα. Αυτό αποτελεί και ένα από τα πλεονεκτήματα του κινητήρα.

Ο συγκεκριμένος τύπος κινητήρα έχει μεγαλύτερη μάζα επιταχυνόμενου αέρα με αποτέλεσμα μικρότερο βάρος σε σύγκριση με έναν κινητήρα αεροστροβίλο απλής ροής (Turbo-jet) της ίδιας ώσης. Η ροή παράκαμψης προστατεύει το αεροσκάφος από τη θερμική ακτινοβολία του κινητήρα αφού το ψυχρό ρεύμα αέρα δεν αφήνει τη θερμότητα να περάσει στο σκάφος και να του δημιουργήσει προβλήματα. Ακόμη ένα πλεονέκτημα της ροής αυτής είναι η μικρότερη κατανάλωση καυσίμου του κινητήρα αφού το 43% της κύριας ροής δεν καίγεται και αναμιγνύεται με τα καυσαέρια πριν την έξοδο τους προς την ατμόσφαιρα.

3.8. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Εφόσον αναφερθήκαμε στα επιμέρους τμήματα του κινητήρα TF-41 αναλυτικά, μπορούμε τώρα να περιγράψουμε ολοκληρωμένα τον τρόπο λειτουργίας του κινητήρα.

Ο αέρας εισέρχεται στον κινητήρα μέσω του αεραγωγού του αεροσκάφους και διοχετεύεται στον τριών βαθμίδων συμπιεστή χαμηλής πίεσης. Αυτές οι τρεις βαθμίδες συνθέτουν τον ανεμιστήρα του κινητήρα (Fan). Κάθε βαθμίδα του συμπιεστή αποτελείται από μια σειρά σταθερών και μια σειρά κινητών πτερυγίων. Καθώς ο συμπιεστής περιστρέφεται, μια αύξηση της πίεσης επιτυγχάνεται σε κάθε βαθμίδα του συμπιεστή. Όταν ο αέρας περάσει την τρίτη

βαθμίδα χωρίζεται σε δύο μονοπάτια. Στο ένα μονοπάτι (δευτερεύουσα ροή) η ροή του αέρα περνάει εξωτερικά του συμπιεστή ενδιάμεσης και υψηλής πίεσης, του τμήματος της καύσης, των στροβίλων και αναμιγνύεται με τα καυσαέρια στο ακροφύσιο εξαγωγής. Στο άλλο μονοπάτι (κύρια ροή) η ροή συνεχίζει στον πυρήνα του κινητήρα όπου συμπιέζεται περαιτέρω από τις βαθμίδες του συμπιεστή ενδιάμεσης πίεσης.

Ο συμπιεσμένος αέρας από τον συμπιεστή ενδιάμεσης πίεσης διοχετεύεται στον έντεκα βαθμίδων συμπιεστή υψηλής πίεσης μέσω των οδηγών πτερυγίων μεταβαλλόμενης γωνίας (Inlet Guide Vanes). Η γωνία αυτών των πτερυγίων ποικίλει ανάλογα με τα στοιχεία του κινητήρα. Ο αέρας συμπιέζεται ακόμη περισσότερο από τον συμπιεστή και οδηγείται στο τμήμα του διαχύτη σε μια σειρά σταθερών οδηγών πτερυγίων για την ευθυγράμμιση της ροής.

Η ολική πίεση εξόδου του συμπιεστή εξαρτάται από την συνδυασμένη ικανότητα κάθε βαθμίδας του συμπιεστή. Η αποδοτικότητα του συμπιεστή μειώνεται από οτιδήποτε καταστρέφει την ομαλή ροή του αέρα γύρω από τα σταθερά και κινητά πτερύγια. Αυτό μπορεί να προκληθεί από βρωμιές στην επιφάνεια ή από καταστροφή κάποιου πτερυγίου. Η μάζα της ροής του αέρα του συμπιεστή μπορεί επίσης να μειωθεί από μείωση της πυκνότητας του αέρα, που προκαλείται από υψηλές θερμοκρασίες ή χαμηλή βαρομετρική πίεση. Ο συμπιεστής διανέμει μια συνεχή ποσότητα αέρα για ορισμένες στροφές. Καθώς η πυκνότητα του εισαγόμενου αέρα μειώνεται, η μάζα του αέρα προς τον κινητήρα θα μειώνεται. Έτσι ο συμπιεστής για να διανέμει την ίδια ποσότητα αέρα θα πρέπει να περιστρέφεται με μεγαλύτερη ταχύτητα.

Ο συμπιεσμένος αέρας διανέμεται στους θαλάμους καύσης και αναμιγνύεται με το καύσιμο. Ο αέρας που δεν χρησιμοποιείται για την διαδικασία της καύσης, χρησιμοποιείται για να μονώνει τους θαλάμους καύσης από την θερμότητα της καύσης και έτσι να μειώνει την θερμοκρασία στα τοιχώματα τους.

Ο κύριος ρυθμιστής καυσίμου υπολογίζει την κατάλληλη ποσότητα καυσίμου που απαιτείται για την καύση του μείγματος.

Ο αέρας διοχετεύεται στους στροβίλους μέσω μιας σειράς ψυχόμενων σταθερών οδηγών πτερυγίων (τα σταθερά πτερύγια της 1^{ης} βαθμίδας του στροβίλου υψηλής πίεσης). Αέρας από τον συμπιεστή υψηλής πίεσης χρησιμοποιείται για την ψύξη των στροβίλων. Οι στρόβιλοι αποτελούνται από τέσσερις βαθμίδες και κάθε βαθμίδα αποτελείται από μια σειρά σταθερών και κινητών πτερυγίων. Τα σταθερά πτερύγια επιταχύνουν τα καυσαέρια και τα οδηγούν σε τέτοια κατεύθυνση ώστε να περιστρέψουν τους ρότορες των στροβίλων. Οι ρότορες λαμβάνουν την υψηλή ταχύτητα των καυσαερίων και μετατρέπουν αυτήν την ενέργεια σε ισχύ στον άξονα. Η αποδοτικότητα με την οποία οι στρόβιλοι εκτελούν αυτήν την εργασία είναι ζωτικής σημασίας για την οικονομία καυσίμου του κινητήρα.

Δύο ατμοσφαιρικές μεταβλητές οι οποίες επηρεάζουν την ισχύ του κινητήρα, κατά την λειτουργία του στο έδαφος, είναι η θερμοκρασία και η πίεση του αέρα περιβάλλοντος. Σε μια ζεστή μέρα ή σε μια μέρα με χαμηλή πίεση ο συμπιεστής πρέπει να περιστραφεί γρηγορότερα για να παράγει την ίδια μάζα ροής αέρα μέσα σε αυτόν. Αυτό αυξάνει την αύξηση της θερμοκρασίας μέσα στον συμπιεστή. Η θερμοκρασία εισαγωγής των καυσαερίων στο στρόβιλο θα αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος μέχρι να φτάσει τα όρια της (εκεί όπου πρέπει να είναι ρυθμισμένη σύμφωνα με τον κατασκευαστή). Σε αυτό το σημείο ο κύριος ρυθμιστής καυσίμου θα περιορίσει την ροή του καυσίμου ώστε να διατηρήσει την θερμοκρασία στο στρόβιλο μέσα στα όρια της και να έχουμε την μέγιστη ώση του κινητήρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

ΚΙΝΗΤΗΡΑ TF-41

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σύστημα καταγραφής παραμέτρων του κινητήρα TF-41 αποτέλεσε την αρχή των συστημάτων καταγραφής παραμέτρων σε όλα τα στρατιωτικά και πολιτικά αεροσκάφη αφού συνέβαλε σημαντικά στην ασφάλεια των πτήσεων και στη μείωση των αεροπορικών ατυχημάτων.

Η ασφάλεια πτήσεων είναι ένα πολυσυζητημένο θέμα που απασχολεί συνεχώς την πολιτική και στρατιωτική αεροπορία καθώς παρατηρούνται σε διεθνές επίπεδο σοβαρά αεροπορικά ατυχήματα. Στατιστικά στοιχεία αναφέρουν ότι μόνο το 12% των ατυχημάτων οφείλονται σε απρόβλεπτα αίτια ή φυσικούς κινδύνους, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό του 88% εμφανίζεται ως αίτια ανασφαλούς κατάστασης ή αλλιώς αίτια που θα μπορούσαν να είχαν προβλεφθεί. Έτσι εμφανίζεται επιτακτική η ανάγκη για ύπαρξη μέσων ικανών να προγνώσουν τις αιτίες που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητες καταστάσεις. Σήμερα οι σχεδιαστές αεροσκαφών βασιζόμενοι στην αρχή του "καλύτερα το προλαμβάνειν παρά το θεραπεύειν" έχουν σχεδιάσει και κατασκευάσει συστήματα με δυνατότητα να καταγράφουν με ακρίβεια τις βλάβες ενός αεροσκάφους, τα αίτια μιας αποτυχημένης αποστολής ή ενός αεροπορικού ατυχήματος.

4.2. ΣΚΟΠΟΣ

Ένα τέτοιο σύστημα διάγνωσης – πρόγνωσης βλαβών χρησιμοποιεί και το αεροσκάφος A-7, το οποίο είναι βομβαρδιστικού τύπου. Το σύστημα αυτό ονομάζεται ENGINE MONITORING SYSTEM (E.M.S.) και είναι το μέσον το

οποίο έχει ως σκοπό να συμβάλλει σημαντικά στην ποιοτική βελτίωση τριών βασικών παραμέτρων της ασφάλειας πτήσεων, που είναι η επιθεώρηση, η επισκευή και η συντήρηση. Βλέποντας το παρακάτω σχήμα θα μπορούσε να πει κανείς ότι αυτό το σύστημα είναι ένα μέσον σωτηρίας.



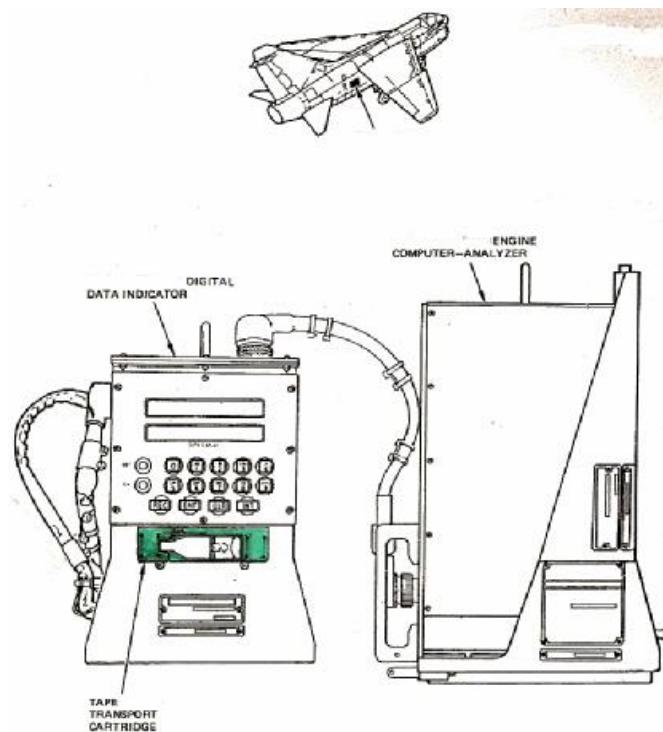
Η εγκυρότητα του συστήματος αυτού έγκειται στη καταγραφή της κατάστασης του κινητήρα TF-41 του αεροσκάφους όταν αυτό βρίσκεται σε λειτουργία στο έδαφος ή στον αέρα. Το σύστημα EMS έχει την δυνατότητα να συλλέγει πληροφορίες για σαράντα πέντε συνολικά παραμέτρους του κινητήρα και του αεροσκάφους, οι οποίες λαμβάνονται μέσω αισθητήρων και μεταβιβαστών.

4.3. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ EMS

Το σύστημα EMS αποτελείται από το σύστημα ανάλυσης του κινητήρα (ENGINE ANALYZER SET ή EAS), το σταθμό εδάφους (GROUND STATION ή GS) και τους αισθητήρες αεροσκάφους-κινητήρα από όπου λαμβάνονται τα σήματα.

Το σύστημα ανάλυσης του κινητήρα περιλαμβάνει τον αναλυτή στοιχείων του κινητήρα (ENGINE COMPUTER ANALYZER ή ECA) και τον ενδείκτη ψηφιακών δεδομένων (DIGITAL DISPLAY INDICATOR) όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα.

Ο αναλυτής στοιχείων του κινητήρα (ECA) είναι μια προγραμματισμένη λογική που αναλύει τις πληροφορίες που λαμβάνει από τον κινητήρα και το αεροσκάφος. Στόχος του είναι να εντοπίζει και να επαληθεύει τις καταστάσεις εκτός ορίων του κινητήρα (υπερβάσεις), να πληροφορεί τον πιλότο και τον μηχανικό για αυτές καθώς και να αναγνωρίζει κάθε μια από τις επτά λειτουργικές καταστάσεις του κινητήρα, δηλαδή να αντιλαμβάνεται πότε ο κινητήρας εκκινεί, πότε λειτουργεί σε πλήρη στοιχεία κ.ά..



Σύστημα ανάλυσης του κινητήρα

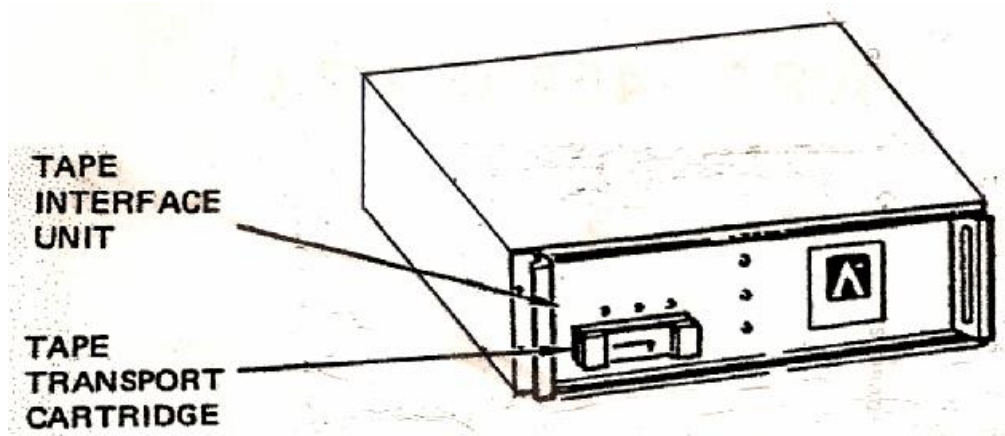
Ο πιλότος παίρνει πληροφορίες από τις ενδείξεις στην κονσόλα του πιλοτηρίου ενώ ο μηχανικός από την αποκωδικοποίηση στο σταθμό εδάφους της κασέτας (TAPE TRANSPORT CARTRIDGE ή TTC) που τοποθετείται στον ενδείκτη ψηφιακών δεδομένων πριν από την πτήση και αφαιρείται αμέσως μετά την προσγείωση. Κάθε φορά που πραγματοποιείται υπέρβαση ενεργοποιείται στην κονσόλα του πιλοτηρίου μια σημαία (EMS MASTER FLAG), για να γνωρίζει

ο χειριστής την κατάσταση του αεροσκάφους, η οποία επαναφέρεται στο έδαφος μόνο εάν η υπέρβαση έχει εξαλειφθεί.

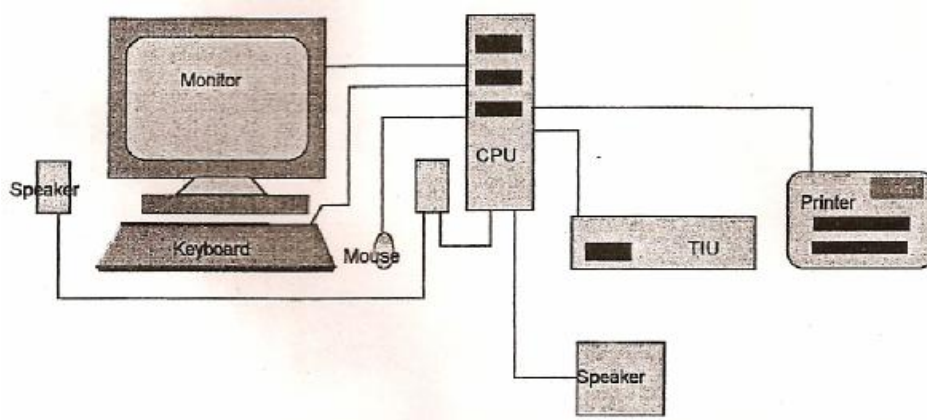
Ο ενδείκτης ψηφιακών δεδομένων (DDI) είναι σαν ένας μικρός υπολογιστής αφού εξωτερικά έχει δύο μικρές οθόνες οχτώ χαρακτήρων, πληκτρολόγιο δεκατεσσάρων πλήκτρων και υποδοχή όπου τοποθετείται η κασέτα.

Η κασέτα (TTC) είναι μεταλλική μαγνητική, με δυνατότητα καταγραφής μέχρι και δύο ώρες λειτουργίας του κινητήρα, που σβήνεται στο σταθμό εδάφους και επαναχρησιμοποιείται. Η κασέτα αυτή είναι πολύ ανθεκτική, ώστε σε περίπτωση ατυχήματος να μην καταστρέφεται από την πρόσκρουση του αεροσκάφους στο έδαφος και να μπορεί να γίνει η αποκωδικοποίηση της στο σταθμό εδάφους, που θα μας οδηγήσει στα ακριβή αίτια του ατυχήματος.

Ο σταθμός εδάφους παλαιότερα αποτελούταν από ένα τερματικό με επεξεργαστή περιορισμένων δυνατοτήτων σε ταχύτητα και μνήμη. Σήμερα έχει αντικατασταθεί από έναν σύγχρονο υπολογιστή στον οποίο έχει προσαρμοστεί μονάδα (TAPE TRANSPORT CARTRIDGE ή TIU) του προγενέστερου σταθμού εδάφους που επιτρέπει τη μεταφορά των δεδομένων της κασέτας στον ηλεκτρονικό υπολογιστή όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Αυτή η μονάδα είναι το μόνο κοινό μεταξύ των δύο hardware. Φυσικά η λογική του software παραμένει η ίδια ως προς τον σχεδιασμό, με σαφώς αναβαθμισμένο περιβάλλον ανάλυσης δεδομένων (WIN 98). Το πρόγραμμα κατασκευάστηκε από την εταιρεία Allison για τα αεροσκάφη A-7. Ακόμη υπάρχει η δυνατότητα μεταφοράς του σταθμού εδάφους με τη χρήση φορητού υπολογιστή.



Μονάδα υποδοχής της κασέτας (TAPE INTERFACE UNIT)



Σταθμός εδάφους (GROUND STATION)

4.4. ΠΩΣ ΣΥΜΒΑΛΛΕΙ ΣΤΗΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΤΩΝ ΠΤΗΣΕΩΝ

Σε πρώτο στάδιο ειδοποιεί τον πιλότο για βλάβες που ενδεχομένως παρουσιάζονται κατά την διάρκεια της πτήσης. Έτσι αυτός εκτελεί τις ανάλογες διορθωτικές ενέργειες, προσαρμόζει την πτήση σε σχέση με τις ενδείξεις και σε περίπτωση σοβαρής βλάβης εκτελεί αναγκαστική προσγείωση στο κοντινότερο αεροδρόμιο.

Σε δεύτερο στάδιο μετά το πέρας της πτήσης ο μηχανικός αναλύει την κασέτα στο σταθμό εδάφους και λαμβάνει πληροφορίες για το εύρος και την σπουδαιότητα των βλαβών που έχουν καταγραφεί. Συγχρόνως εντοπίζει όσες εκτός ορίων καταστάσεις δεν ήταν δυνατόν να παρατηρηθούν από τον πιλότο κατά την διάρκεια της πτήσης. Έτσι αυξάνεται η αξιοπιστία του αεροσκάφους με συνέπεια τη μείωση των ατυχημάτων.

Πέραν όμως από την πρόληψη των ατυχημάτων τα οφέλη από το σύστημα διάγνωσης-πρόγνωσης βλαβών (EMS) απηχούν και σε άλλους τομείς. Επειδή οι βλάβες κυρίως του κινητήρα εντοπίζονται σε μικρό χρονικό διάστημα δεν γίνεται σπατάλη εργατοωρών και έτσι οι τεχνικοί περνούν στο στάδιο της συντήρησης σε γρήγορους ρυθμούς. Αποτέλεσμα αυτού είναι η μείωση του κόστους συντήρησης του αεροσκάφους.

Επιπλέον επειδή τα δεδομένα των πτήσεων αποθηκεύονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή του σταθμού εδάφους κρατείται αρχείο για την συμπεριφορά αλλά και της ιδιαιτερότητας κάθε κινητήρα εν ώρα πτήσης. Οι πληροφορίες αυτές είναι χρήσιμες στον τεχνικό που αποκωδικοποιεί τις κασέτες γιατί έχει την δυνατότητα ανά πάσα στιγμή να ανατρέξει στο ιστορικό κάθε κινητήρα και αεροσκάφους και να το αξιολογήσει με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του.

4.5. ΒΑΣΙΚΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΚΑΤΑΓΡΑΦΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ EMS

Από τους αισθητήρες και τους μεταβιβαστές του αεροσκάφους και του κινητήρα καταγράφονται σαράντα πέντε παράμετροι. Συνήθως καταγράφονται οι παράμετροι που απεικονίζονται από τα γνωστά συστήματα ένδειξης του κινητήρα αλλά είναι δυνατόν να καταγράφονται και άλλα στοιχεία, που δεν απεικονίζονται αλλά μπορούν να γίνουν μόνο αντιληπτά από τον πιλότο και είναι εξίσου σημαντικά για την λειτουργία του κινητήρα όπως οι κραδασμοί.

Μερικές από τις σημαντικές παραμέτρους, που απεικονίζονται και στα συστήματα ένδειξης του κινητήρα είναι η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων, οι στροφές του κινητήρα και η ροή καυσίμου.

4.5.1. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΞΟΔΟΥ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ (Τ.Ο.Τ.)

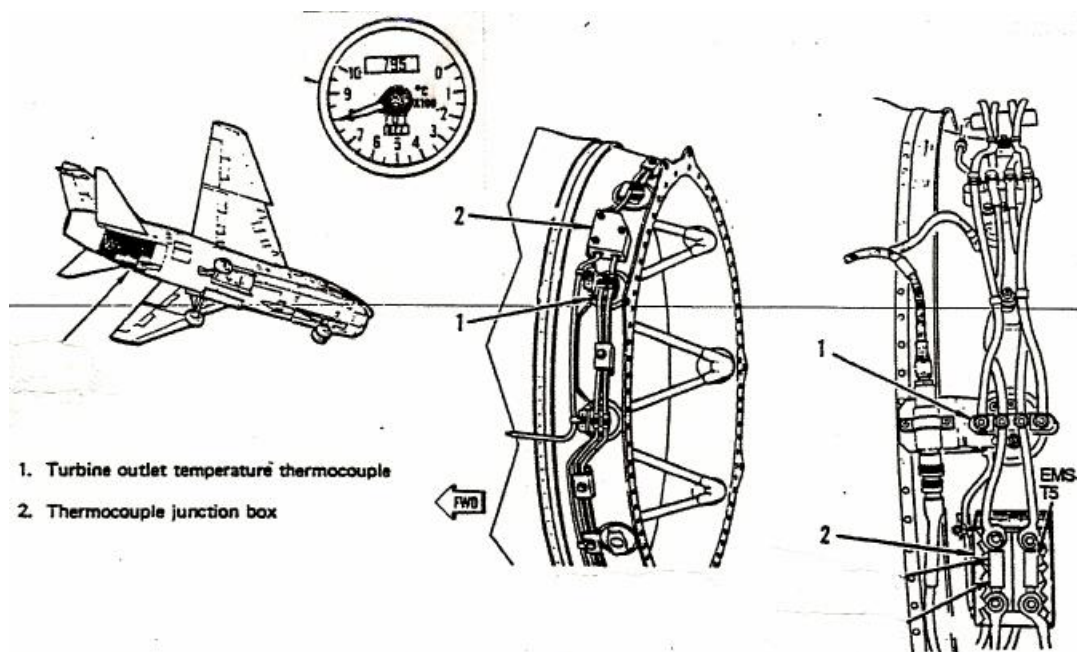
Η ένδειξη της θερμοκρασίας αναφέρεται σε θερμοκρασίες της περιοχής του στροβίλου και είναι από τις πιο κρίσιμες παραμέτρους παρακολούθησης στην λειτουργία του κινητήρα. Αυτό γιατί αυξάνοντας την θερμοκρασία, αυξάνεται η ώση του κινητήρα και η απόδοση του. Η ιδανικότερη ένδειξη θερμοκρασίας θα ήταν η θερμοκρασία των καυσαερίων στην εισαγωγή του στροβίλου, της οποίας η λήψη είναι δύσκολη λόγω του μεγάλου ύψους της. Επειδή όμως έχουμε πτώση της θερμοκρασίας κατά μήκος του στροβίλου μετράμε την θερμοκρασία λίγο μετά το τέλος του στροβίλου. Η θερμοκρασία αυτή ονομάζεται θερμοκρασία εξόδου στροβίλου (Turbine Outlet Temperature).

Ακόμη καταγράφοντας την θερμοκρασία του κινητήρα και θέτοντας θερμοκρασιακούς περιορισμούς προστατεύουμε τον κινητήρα από μείωση του ορίου ζωής του. Για αποφυγή υπερβάσεων ο κατασκευαστής θέτει αυτούς τους περιορισμούς και προστατεύει τον κινητήρα από σοβαρή βλάβη των πτερυγίων του, που μπορεί να προκαλέσει άμεση ή μελλοντική καταστροφή του και από μηχανική καταπόνηση των διαφόρων μερών του αεροστρόβιλου.

Το σύστημα ένδειξης αποτελείται από εννέα (9) θερμοηλεκτρικές λήψεις (Thermocouples), που είναι κατάλληλα τοποθετημένες περιφερειακά του μείκτη κύριας ροής και της ροής παράκαμψης (By-pass mixer), τις κατάλληλες καλωδιώσεις, το κουτί συνδέσεων (Junction box), το όργανο και το σύστημα καταγραφής παραμέτρων του αεροκινητήρα TF 41. Επειδή ακριβώς είναι τοποθετημένες σε αυτό το σημείο, το οποίο είναι ο σταθμός 5 του κινητήρα, η θερμοκρασία αυτή ονομάζεται και T5.

Οι λήψεις εξέχουν στη ροή των καυσαερίων και είναι συνδεδεμένες παράλληλα, οπότε το παραγόμενο ρεύμα είναι η ένδειξη του μέσου όρου των θερμοκρασιών κάθε λήψης. Ανάλογα με την δημιουργούμενη τάση βλέπουμε και την ένδειξη της θερμοκρασίας. Από τις λήψεις λαμβάνουμε δύο ξεχωριστές γραμμές μέτρησης της θερμοκρασίας, που οδηγούνται μέσω των κατάλληλων καλωδιώσεων στο κουτί συνδέσεων και από εκεί η μία οδηγείται στο όργανο και η άλλη στο σύστημα καταγραφής παραμέτρων του κινητήρα.

Κάθε θερμοηλεκτρική λήψη αποτελείται από δύο αγωγούς διαφορετικού μετάλλου, ένα από κράμα νικελίου-αργιλίου και ένα από κράμα νικελίου-καδμίου. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο αγωγών δημιουργεί την διαφορά τάσης, επομένως ηλεκτρικό ρεύμα και βλέπουμε την ένδειξη της θερμοκρασίας στο όργανο και στο σύστημα καταγραφής των παραμέτρων.



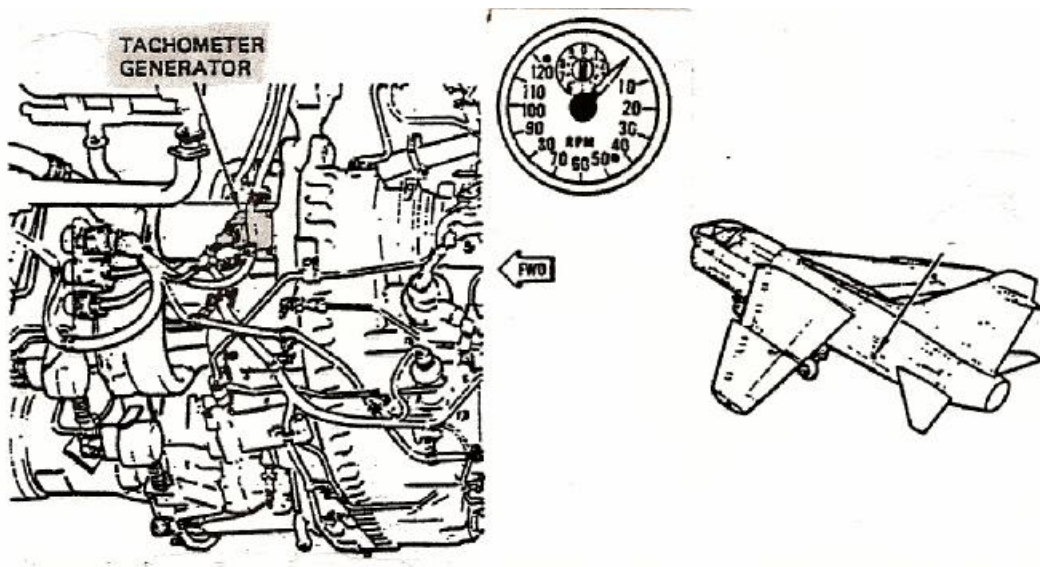
Σύστημα ένδειξης θερμοκρασίας εξόδου καυσαερίων

4.5.2. ΣΤΡΟΦΕΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Η ένδειξη των στροφών του κινητήρα είναι μια εξίσου σημαντική παράμετρος. Ειδικότερα στις περιοχές λειτουργίας μέγιστης ώσης και στην διάρκεια επιταχύνσεων του κινητήρα χρησιμεύει, ώστε να μπορεί ο χειριστής του αεροσκάφους να ελέγχει ότι οι στροφές περιορίζονται στα όρια που έχει θέσει ο κατασκευαστής. Έτσι αποφεύγονται μηχανικές καταπονήσεις του αεροστρόβιλου κινητήρα σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες των καυσαερίων από υπερβάσεις των στροφών του κινητήρα.

Το σύστημα ένδειξης στροφών του κινητήρα παρέχει την ένδειξη της ταχύτητας του άξονα του συμπιεστή υψηλής πίεσης σε στροφές ανά λεπτό (rpm). Το σύστημα αποτελείται από μια μικρή γεννήτρια (NH tachometer generator), τις κατάλληλες καλωδιώσεις, το όργανο στο οποίο απεικονίζονται οι στροφές σε επί της εκατό (%) των μέγιστων στροφών και το σύστημα καταγραφής των παραμέτρων.

Η γεννήτρια παίρνει κίνηση από το κιβώτιο παρελκομένων υψηλής ταχύτητας, το οποίο κινείται από τον άξονα υψηλής ταχύτητας του κινητήρα. Παράγει τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα με συχνότητα που μεταβάλλεται ανάλογα προς την ταχύτητα του κινητήρα. Μέσω των κατάλληλων καλωδιώσεων οδηγείται στο όργανο και στο σύστημα καταγραφής και ανάλογα με την δημιουργούμενη τάση βλέπουμε την αντίστοιχη ένδειξη των στροφών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι στροφές δεν είναι μέτρο της ώσης που παράγεται, γιατί αυτή εξαρτάται από την θερμοκρασία και την πίεση εισαγωγής.

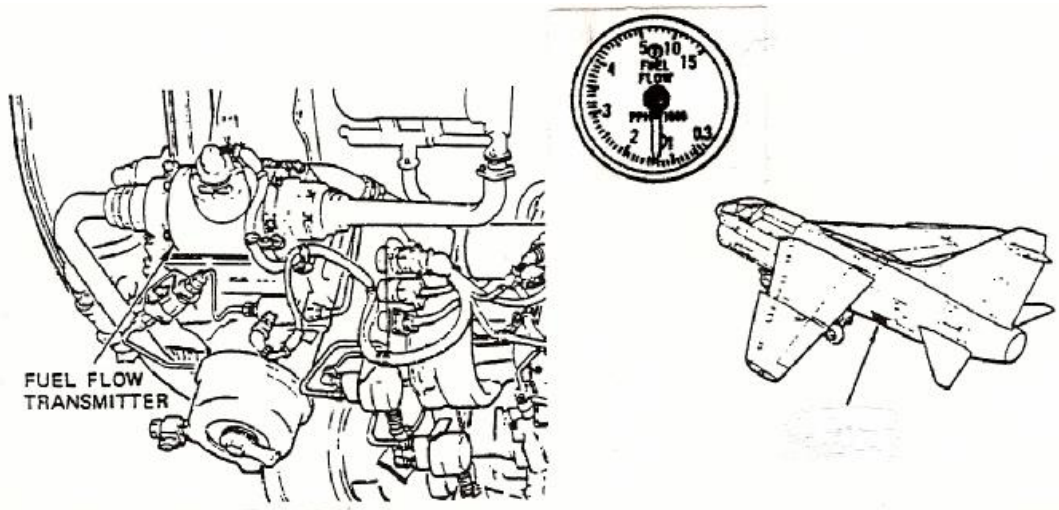


Σύστημα ένδειξης στροφών του κινητήρα

4.5.3. ΡΟΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Η ροή καυσίμου του κινητήρα είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό της καλής λειτουργίας του κινητήρα. Το σύστημα ένδειξης ροής καυσίμου παρέχει την ένδειξη, στο όργανο και στο σύστημα καταγραφής, σε λίβρες ανά ώρα του καυσίμου που διοχετεύετε στους ψεκασθήρες του κινητήρα.

Το σύστημα αποτελείται από το στοιχείο λήψης της ροής και ηλεκτρικής μέτρησης της (Fuel flow transmitter), τις κατάλληλες καλωδιώσεις, το όργανο και το σύστημα καταγραφής. Ανάλογα με το καύσιμο που διέρχεται από το μεταβιβαστή, παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Μέσω των κατάλληλων καλωδιώσεων οδηγείται στο όργανο και στο σύστημα καταγραφής και ανάλογα με την δημιουργούμενη τάση βλέπουμε την αντίστοιχη ένδειξη της ροής καυσίμου.



Σύστημα ένδειξης ροής καυσίμου του κινητήρα

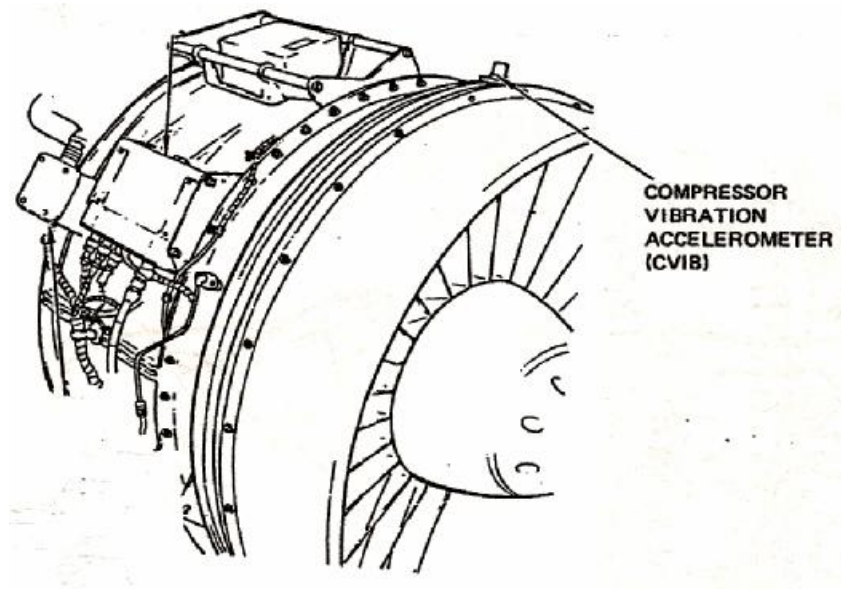
4.5.4. ΚΡΑΔΑΣΜΟΙ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Ένα θέμα που απασχολεί τους τεχνικούς όλων των αεροσκαφών είναι οι κραδασμοί. Αυτό συμβαίνει γιατί είναι μια κατάσταση που υποθάλπει πάντα ένα κίνδυνο. Οι κραδασμοί σε ένα αεροσκάφος δεν είναι πάντοτε αντιληπτοί από τον πιλότο, όμως καταγράφονται πάντα από το σύστημα καταγραφής παραμέτρων του αεροκινητήρα TF-41.

Έτσι ο κινητήρας είναι εφοδιασμένος με σύστημα καταγραφής των κραδασμών. Αποτελείται από τους μεταβιβαστές (Accelerometer), που τοποθετούνται πάνω στον κινητήρα (ένα στο τμήμα των συμπιεστών και ένα στο τμήμα των στρόβιλων) και τις κατάλληλες καλωδιώσεις που μεταδίδουν το σήμα στο σύστημα καταγραφής. Δεν υπάρχει ένδειξη των κραδασμών με όργανο στον πιλότο και εντοπίζονται μόνο από την αποκωδικοποίηση της κασέτας στο σταθμό εδάφους από τον τεχνικό, εάν δεν έχουν γίνει ήδη αντιληπτοί από τον πιλότο.

Κραδασμός είναι μια περιοδική ταλάντωση ενός εξαρτήματος που έχει βάρος. Στους αεροστρόβιλους κινητήρες η ταλάντωση προκαλείται από την περιστροφή εξαρτημάτων του κινητήρα (όπως οι στρόβιλοι και οι συμπιεστές) τα

οποία δεν είναι σωστά ζυγασταμισμένα και από σταθερά εξαρτήματα του κινητήρα τα οποία δεν περιστρέφονται. Γενικά η συχνότητα αυτών των ταλαντώσεων θα αυξάνει όταν αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα. Οι κραδασμοί μετρούνται από τους μεταβιβαστές, όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Ο μεταβιβαστής του κινητήρα TF-41 αποτελείται από έναν μαγνήτη ο οποίος είναι ελεύθερος να κινείται ανάμεσα σε ένα σταθερό τύλιγμα. Όταν ο κινητήρας έχει κραδασμούς, ο μαγνήτης θα τείνει να παραμείνει σε ισορροπία με το τύλιγμα το οποίο κινείται. Αυτό θα παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα το οποίο θα είναι ανάλογο με τη συχνότητα των κραδασμών. Αυτή η τάση απεικονίζεται σε μια κλίμακα μετρημένη σε mils ανά δευτερόλεπτο. Η ένδειξη των κραδασμών αντιστοιχεί στο άθροισμα των ταλαντώσεων που αντιλαμβάνεται ο μεταβιβαστής. Ακόμη με την αποκωδικοποίηση της κασέτας υπάρχει η δυνατότητα να παρατηρήσουμε τους κραδασμούς σε διάφορες περιοχές συχνοτήτων και να εντοπίσουμε ποιο εξάρτημα παρουσιάζει πρόβλημα, σύμφωνα με τα όρια που έχει θέσει ο κατασκευαστής για την ασφαλή λειτουργία του κινητήρα.



Σύστημα καταγραφής κραδασμών

4.6. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ

Από τα αποτελέσματα της αποκωδικοποίησης της κασέτας του συστήματος καταγραφής μπορούμε να οδηγηθούμε στη διερεύνηση βλαβών. Η θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων, η ροή καυσίμου και οι στροφές μεταβάλλονται ταυτόχρονα, γιατί οι τρεις παράμετροι λειτουργίας του κινητήρα έχουν άμεση σχέση και συνάρτηση. Έτσι δεν μπορεί να παρατηρηθεί αύξηση στην ένδειξη μιας παραμέτρου, χωρίς να έχουμε αύξηση και στις άλλες δύο παραμέτρους.

Αν παρατηρήσουμε στο σύστημα καταγραφής, ταλάντωση μιας παραμέτρου, ενώ ο κινητήρας λειτουργεί σταθερά, τότε εάν έχουμε ταλάντωση και στις άλλες δύο παραμέτρους, έχουμε βλάβη του συστήματος καυσίμου (ρυθμιστής καυσίμου). Εάν οι άλλες δύο παράμετροι παραμένουν σταθερές έχουμε ενδεικτικό σφάλμα το οποίο μπορεί να οφείλεται στο όργανο ή στο σημείο λήψης της παραμέτρου ή στην ηλεκτρική συνδεσμολογία (καλωδιώσεις).

Παρατηρώντας, στο σύστημα καταγραφής, κραδασμούς εκτός ορίων από αυτούς που προβλέπει ο κατασκευαστής για σωστή λειτουργία του κινητήρα, μας παραπέμπει σε βλάβη. Βλέποντας την περιοχή των συχνοτήτων που εμφανίζονται οι κραδασμοί και το τεχνικό εγχειρίδιο, αντιλαμβανόμαστε ποιο εξάρτημα του κινητήρα δημιουργεί το πρόβλημα και προβαίνουμε στην κατάλληλη διορθωτική ενέργεια (ζυγοστάθμιση στροβίλων, συμπιεστών ή αντικατάσταση μη κινούμενων εξαρτημάτων) ώστε να εξαλείψουμε τους κραδασμούς.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε πόσο σημαντικό είναι το σύστημα καταγραφής παραμέτρων για την καλή και αξιόπιστη λειτουργία του κινητήρα, γι' αυτό και έχει καθιερωθεί η χρησιμοποίηση του σε όλα τα σύγχρονα στρατιωτικά και πολιτικά αεροσκάφη.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παραπάνω πτυχιακή εργασία αναφερθήκαμε στα χαρακτηριστικά λειτουργίας και σχεδιάσεως των στροβιλοκινητήρων γενικά, και παρουσιάσαμε τον κινητήρα TF-41 αναλυτικότερα. Έγινε προσπάθεια να συγκεντρωθούν όλες οι απαραίτητες γνώσεις για την λειτουργία και σχεδίαση των στροβιλοκινητήρων σε θεωρητική κυρίως και φυσική ανάλυση, έτσι ώστε ο αναγνώστης, που έρχεται πρώτη φορά σε επαφή με τους συγκεκριμένους κινητήρες, να εμπεδώσει τις θεωρητικές γνώσεις του σε φυσικές έννοιες και να αντιληφθεί την πρακτική σημασία των διαφόρων τμημάτων και μηχανισμών του κινητήρα.

Αναφερθήκαμε σε ένα σύστημα του αεροστρόβιλου κινητήρα TF-41, το οποίο χρησιμοποιείται σήμερα σε όλα τα στρατιωτικά και πολιτικά αεροσκάφη στην πιο σύγχρονη μορφή του, το σύστημα καταγραφής παραμέτρων λειτουργίας του κινητήρα. Μπορούμε να αντιληφθούμε την σπουδαιότητα αυτού του συστήματος από το γεγονός ότι σήμερα, η τεχνολογία από το χώρο της αεροναυπηγικής, πέρασε στις μηχανές εσωτερικής καύσης των αυτοκινήτων με την καθιέρωση πλέον ηλεκτρονικού εγκεφάλου για την διάγνωση βλαβών σε όλα τα σύγχρονα αυτοκίνητα, το οποίο αποτελεί μια μορφή του συστήματος καταγραφής παραμέτρων των αεροσκαφών. Στο μέλλον θα δούμε πολλές ακόμη από τις εφαρμογές τέτοιων συστημάτων στα αυτοκίνητα μας.

Σκοπός της παραπάνω εργασίας μου ήταν να φέρω τον αναγνώστη σε επαφή με τον άγνωστο κόσμο των ταχέως αναπτυσσόμενων αεριωθητών (κυρίως των αεροστροβίλων), εξαιτίας και της κατάκτησης του διαστήματος από τον άνθρωπο (με τη χρήση του πυραύλου). Μέσα από αυτήν την εργασία να οδηγηθεί μόνος του, στην αναζήτηση και μελέτη πληροφοριών για τους στροβιλοκινητήρες από τα διάφορα συγγράμματα και μελέτες Ελλήνων και ξένων επιστημόνων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ

1.1. Συνοπτική ιστορία των στροβιλοκίνητων μηχανών	3
1.2. Ιστορική εξέλιξη	4
1.3. Ταξινόμηση των στροβιλομηχανών	16
1.4. Είδη αεριωθητών	16
1.4.1. Αθόδουλος	17
1.4.2. Παλμικός αθόδουλος	18
1.4.3. Πύραυλος	19
1.4.4. Αεροστρόβιλος	20
1.4.5. Στροβιλο-αθόδουλος	22
1.4.6. Πυραυλο-στρόβιλος	23
1.5. Ώση	24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΑΣΙΚΑ ΤΜΗΜΑΤΑ ΕΝΟΣ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

ΑΕΡΟΚΙΝΗΤΗΡΑ

2.1. Σταθμοί ενός κινητήρα διεθνώς	27
2.2. Θερμοδυναμικός κύκλος του BRAYTON	28
2.3. Εισαγωγή αέρα	30
2.4. Συμπιεστές	33
2.5. Θάλαμοι καύσης	37
2.6. Στρόβιλοι	40
2.7. Ακροφύσιο	42
2.8. Μετάκαυση	46

2.9. Σχεδίαση-κατασκευή	50
2.10. Σύγκριση αεροστρόβιλων – κινητήρων ΟΤΤΟ – DIESEL	52

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

TF-41

3.1. Εισαγωγή	54
3.2. Χαρακτηριστικά κινητήρα	56
3.3. Σταθμοί κινητήρα TF-41	57
3.4. Θερμοδυναμικός κύκλος του BRAYTON	58
3.5. Κύρια τμήματα του κινητήρα TF-41	59
3.5.1. Εισαγωγή αέρα	59
3.5.2. Συμπιεστές	60
3.5.3. Θάλαμοι καύσης	63
3.5.4. Στρόβιλοι	65
3.5.5. Τμήμα εξαγωγής	66
3.5.6. Τμήμα παρελκομένων	67
3.6. Τριβείς	69
3.7. Ροή παράκαμψης	70
3.8. Περιγραφή της λειτουργίας του κινητήρα	70

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

TF-41

4.1. Εισαγωγή	73
4.2. Σκοπός	73
4.3. Λειτουργία του συστήματος EMS	74
4.4. Πώς συμβάλλει στην ασφάλεια των πτήσεων	77

4.5. Βασικοί παράμετροι που καταγράφονται από το EMS	78
4.5.1. Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων	79
4.5.2. Στροφές του κινητήρα	80
4.5.3. Ροή καυσίμου του κινητήρα	82
4.5.4. Κραδασμοί του κινητήρα	83
4.6. Διερεύνηση βλαβών μέσω του συστήματος καταγραφής	84
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	86

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- <<The jet engine>> της Rolls – Royce
- <<A & P Mechanics Powerplant Handbook, FAA>> το οποίο είναι το εγχειρίδιο κινητήρων της Αμερικανικής Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας.
- <<Στροβιλοκινητήρες>> Γεώργιος Γούλιος Αθήνα
- www.grc.nasa.gov
- <<The Design of High – Efficiency Turbomachinery and Gas Turbines>> David Gordon Wilson, Theodosios Korakianitis, New Jersey:Prentice-Hall,1998 2nd edition
- <<Αεροστρόβιλοι κινητήρες>> Κ. Καρκανιάς Αθήνα
- <<Βασικές αρχές στροβιλομηχανών >> Νανούσης Δ. Νανούσης, Χρήστος Β. Σταμούτσος
- www.rolls-royce.com/education
- Technical orders