



ΑΝΩΤΕΡΕΣ ΔΗΜΟΣΙΕΣ ΣΧΟΛΕΣ  
ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ

## ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ

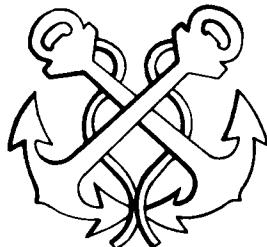
**Σταματίου Γ. Κλουδά**

ΠΛΩΤΑΡΧΗ (Μ) Π.Ν.

ΔΙΠΛ. ΝΑΥΠΗΓΟΥ-ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ Μ.Ι.Τ.



**ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ**  
ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟΝ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ



**ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΚΕΙΜΕΝΟ  
Α.Δ.Σ.Ε.Ν.  
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟΥ ΕΜΠΟΡΙΚΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ

Ο Ευγένιος Ευγενίδης ιδρυτής και χορηγός του «Ιδρύματος Ευγενίδου» προείδε ενωρίτατα και σχημάτισε τη βαθιά πεποίθηση ότι αναγκαίο παράγοντα για την πρόοδο του έθνους θα αποτελούσε η άρτια κατάρτιση των τεχνικών μας σε συνδιασμό προς την ηθική τους αγωγή.

Την πεποίθησή του αυτή τη μετέτρεψε σε γενναία πράξη ευεργεσίας, όταν κληροδότησε σεβαστό ποσό για τη σύσταση Ιδρύματος που θα είχε ως σκοπό να συμβάλει στην τεχνική εκπαίδευση των νέων της Ελλάδας.

Με το Β. Διάταγμα της 10ης Φεβρουαρίου 1956, συνεστήθη το Ίδρυμα Ευγενίδου και κατά την επιθυμία του διαθέτη του ανέλαβε τη διοίκηση η αδελφή του Κυρία Μαρ. Σίμου. Από τη σπιγμή εκείνη άρχισαν πραγματοποιούμενοι οι σκοποί που οραματίσθηκε ο Ευγένιος Ευγενίδης και συγχρόνως η εκπλήρωση μιάς από τις βασικότερες ανάγκες του εθνικού μας βίου.

Κατά την κλιμάκωση των σκοπών του, το Ίδρυμα πρόταξε την έκδοση τεχνικών βιβλίων τόσο για λόγους θεωρητικούς όσο και πρακτικούς. Διαπιστώθηκε πράγματι ότι αποτελεί πρωταρχική ανάγκη ο εφοδιασμός των μαθητών με σειρές από βιβλία, τα οποία θα έθεταν ορθά θεμέλια στην παιδεία τους και θα αποτελούσαν συγχρόνως πολύτιμη βιβλιοθήκη για κάθε τεχνικό.

Ειδικότερα, δύον αφορά στα εκπαιδευτικά βιβλία των μαθητών των Δημοσίων Σχολών Εμπορικού Ναυτικού, το Ίδρυμα ανέλαβε την έκδοσή τους σε πλήρη και στενή συνεργασία με τη Διεύθυνση Ναυτικής Εκπαίδευσεως του Υπουργείου Εμπορικής Ναυτιλίας, υπό την εποπτεία του οποίου υπάγονται οι Σχολές αυτές.

Η ανάθεση στο Ίδρυμα έγινε με την υπ' αριθ. 61288/5031, της 9ης Αυγούστου 1966, απόφαση του Υπουργείου Εμπορικής Ναυτιλίας, οπότε και συγκροτήθηκε και η Επιτροπή Εκδόσεων.

Κύριος σκοπός των έκδόσεων αυτών είναι ή παροχή πρός τούς μαθητές των ναυτικών σχολών ΑΔΣΕΝ και Ναυτικών Λυκείων των άναγκαίων έκπαιδευτικών κειμένων, τά δποια άντιστοιχούν πρός τά μαθήματα που διδάσκονται στίς Σχολές αυτές.

Έπισης έλήφθη πρόνοια, ώστε τά βιβλία αυτά νά είναι γενικότερα χρήσιμα γιά όλους τούς άξιωματικούς τού Έμπορικού Ναυτικού, πού άσκούν ήδη τό έπαγγέλμα και έξεισσονται στήν Ιεραρχία τού κλάδου τους, χωρίς αύτό νά σημαίνει ότι έπερχεται μεταβολή στή στάθμη τού περιεχομένου τους.

*Οι συγγραφείς και η Επιτροπή Εκδόσεων του Ιδρύματος κατέβαλαν κάθε προσπάθεια, ώστε τα βιβλία να είναι επιστημονικώς δρπια αλλά και προσαρμοσμένα στις ανάγκες και τις δυνατότητες των μαθητών. Γι' αυτό και τα βιβλία αυτά έχουν γραφεί σε απλή γλώσσα και ανάλογη προς τη στάθμη της εκπαίδευσεως για την οποία προορίζεται κάθε σειρά των βιβλίων.*

*Έτσι προσφέρονται στο ευρύ κοινό των καθηγητών, των μαθητών της ναυτικής μας εκπαίδευσεως και δλους τους αξιωματικούς τού Ε.Ν. οι εκδόσεις του Ιδρύματος, των οποίων η συμβολή στην πραγματοποίηση του σκοπού του Ευγενίου Ευγενίδου ελπίζεται να είναι μεγάλη.*

*Σήμερα το Ίδρυμα Ευγενίδου με μεγάλη ευχαρίστηση προχωρεί, σε συνεργασία πάντα με το ΥΕΝ, στη συγγραφή και έκδοση βιβλίων για τα Ναυτικά Λύκεια και ΑΔΣΕΝ, με βάση πάντοτε τα αναλυτικά προγράμματα του υπουργείου.*

#### **ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΚΔΟΣΕΩΝ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ**

**Αλέξανδρος Ι. Παππάς**, Ομ. Καθηγητής ΕΜΠ, Πρόεδρος.

**Χρυσόστομος Φ. Καβουνίδης**, Διπλ. Μηχ. - Ηλ. ΕΜΠ, Επίτιμος Διοικητής Ο.Τ.Ε., Αντιπρόεδρος.

**Μιχαήλ Γ. Αγγελόπουλος**, Τακτικός Καθηγητής ΕΜΠ, τ. Διοικητής ΔΕΗ.

**Κωνσταντίνος Τσαντήλας**, Πλοϊαρχος Λ.Σ., Διευθ. Ναυτ. Εκπ. Υ.Ε.Ν.

Σύμβουλος επί των εκδόσεων του Ιδρύματος **Κωνστ. Α. Μανάφης**, Καθηγητής Φιλοσοφικής Σχολής Παν/μίου Αθηνών.

Γραμματεύς της Επιτροπής, **Δημοσθένης Π. Μεγαρίτης**.

Ειδικός Επιστημονικός Σύμβουλος για το βιβλίο Αεριοστρόβιλοι ο κ. **Σταύρος Γκιδκας**, υποναύαρχος (Μ) Π.Ν.



Ι ΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΤΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ

# ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ

ΣΤΑΜΑΤΙΟΥ Γ. ΚΛΟΥΔΑ  
ΠΛΩΤΑΡΧΗ (Μ) Π.Ν.  
ΔΙΠΛ. ΝΑΥΠΗΓΟΥ – ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ Μ.Ι.Τ.

ΑΘΗΝΑ  
2003



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το βιβλίο αυτό απευθύνεται κατ' αρχήν στους σπουδαστές των Ανωτέρων Δημοσίων Σχολών Εμπορικού Ναυτικού και τη βάση για τη συγγραφή του αποτέλεσε το αναλυτικό πρόγραμμα του Υ.Ε.Ν.

Η «είσοδος» των αεριοστροβίλων στη Ναυτική Μηχανολογία και ειδικότερα στην πρώση των πλοίων είναι σχετικά πρόσφατη και αυτή είναι η βασικότερη, ίσως, αιτία που η σχετική βιβλιογραφία είναι πτωχή.

Τα τελευταία δύμα χρόνια ο ναυτικός αεριοστροβίλος σημείωσε τέτοια εξέλιξη και ανάπτυξη, που του επιτρέπουν στις περισσότερες περιπτώσεις να συναγωνίζεται επάξια τους αντίπαλούς του, τον ατμοστροβίλο και κυρίως τη Diesel, σε πολλές δε περιπτώσεις να αποτελεί τον αδιαφιλονίκητο κυρίαρχο των εγκαταστάσεων προώσεως.

Οι διαφαινόμενες σήμερα προοπτικές είναι διτή η χρησιμοποίηση των ναυτικών αεριοστροβίλων θα αυξηθεί μελλοντικά και συνεπώς η επαγγελματική «γνωριμία» των μηχανικών των πλοίων με το είδος αυτό των μηχανών θα καταστεί απαραίτητη. Η επιτυχία αυτής της γνωριμίας αποτελεί και το σκοπό συγγραφής του παρόντος βιβλίου.

Καταβλήθηκε προσπάθεια ώστε το περιεχόμενο να ανταποκρίνεται στις ανάγκες των σπουδαστών. Επειδή δύμας, όπως είπαμε, η σχετική με τους αεριοστροβίλους βιβλιογραφία είναι πτωχή, γι' αυτό συμπεριελήφθησαν, κυρίως υπό μορφή πινάκων, στοιχεία και πληροφορίες, που αν και για καθαρά εκπαιδευτικούς σκοπούς δεν είναι απαραίτητα εντούτοις ικανοποιούν το στόχο να παραμείνει το κείμενο ως βοήθημα και κατά την επαγγελματική τους σταδιοδρομία. Φυσικά τα επιπλέον αυτά στοιχεία δεν πρέπει να διδάσκονται.

Για κάθε υπόδειξη σφάλματος ή ασάφειας ή γενικότερα ανάγκης βελτιώσεως του βιβλίου ο συγγραφέας ευχαριστεί εκ τών προτέρων.

Ευχαριστίες εκφράζονται και από τη θέση αυτή στον Ειδικό Επιστημονικό Σύμβουλο για το παρόν βιβλίο Υποναύαρχο Μηχανικό Σταύρο Γκίβκα για τις υποδείξεις και παρανέσεις του καθώς και στο τμήμα Εκδόσεων του Ιδρύματος Ευγενίδου που κατέβαλε επίπονες προσπάθειες για την αρτιότερη εμφάνιση του βιβλίου.

Ο συγγραφέας



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

### Ο ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΩΣ ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ ΣΕ ΝΑΥΤΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

#### 1.1 Γενικά.

Μετά το Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο ο αεριοστρόβιλος σημείωσε τέτοια εξέλιξη ώστε να μπορεί να συναγωνισθεί τη μηχανή Diesel και τους ατμοστροβίλους ως κινητήρια μηχανή σε πολλές εφαρμογές ναυτικών εγκαταστάσεων που περιλαμβάνουν συστήματα προώσεως και βοηθητικά μηχανήματα.

Η επιστημονική έρευνα και η πρόδοση στους τομείς της αεροδυναμικής, της μεταδόσεως θερμότητας και της μεταλλουργίας επέτρεψε τη συνεχή και με ταχύ ρυθμό βελτίωση του βαθμού αποδόσεως του αεριοστροβίλου, ώστε η εγκατάστασή του σε πλοία να μπορεί οικονομικά να ανταγωνισθεί τις μηχανές Diesel και τους ατμοστροβίλους. Αν σ' αυτό προστεθούν και τα πρακτικά πλεονεκτήματα του αεριοστροβίλου, δηλαδή ο αυτοματισμός της λειτουργίας και η ταχύτατη επισκευή του με αντικατάσταση, γίνεται τότε φανερό για ποιο λόγο ο αεριοστρόβιλος κατάκτησε συνεχώς έδαφος σε ναυτικές εγκαταστάσεις.

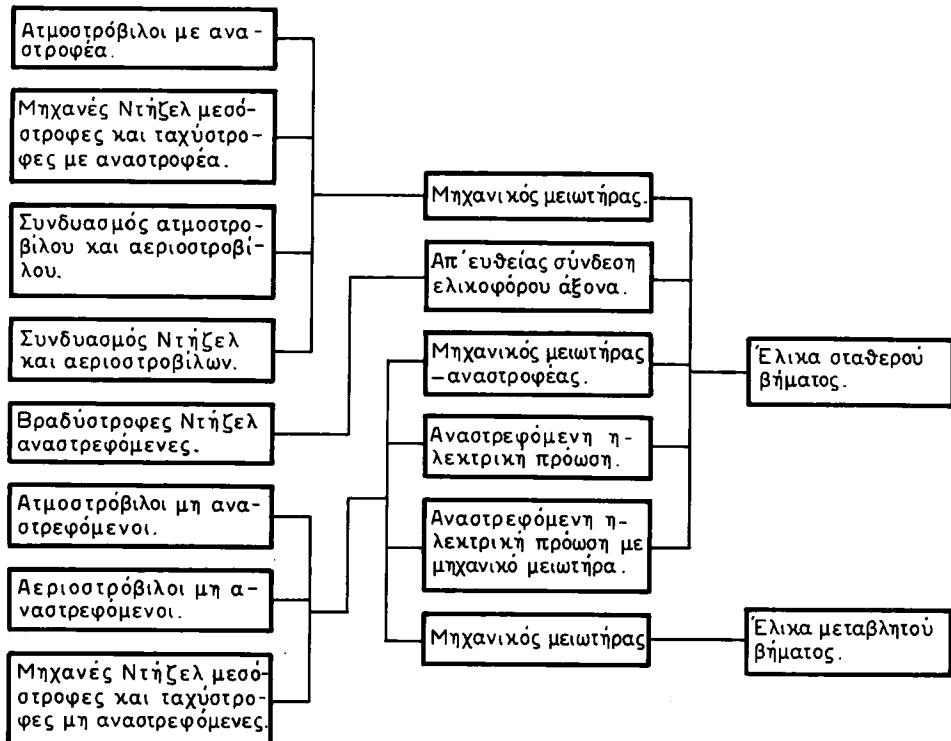
Εκτός όμως από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, τα κυριότερα πλεονεκτήματα του αεριοστροβίλου είναι η απλότητα της κατασκευής και το μικρό βάρος για κάθε αποδιδόμενο ίππο ισχύος. Διευκρινίζεται ότι απλότητα εδώ εννοούμε την έλλειψη πολλών βοηθητικών μηχανημάτων ή περιφερειακών εγκαταστάσεων και την κατασκευή σε μια κύρια μονάδα μικρού όγκου και βάρους που μπορεί εύκολα να αντικατασταθεί.

#### 1.2 Επιλογή της εγκαταστάσεως προώσεως του πλοίου.

Η επιλογή της εγκαταστάσεως προώσεως ενός πλοίου περιλαμβάνει βασικά τον καθορισμό του είδους της κινητήριας μηχανής, του συστήματος μεταδόσεως κινήσεως, των βοηθητικών μηχανημάτων και του προωθητήρα (έλικα) με τα παρελκόμενά του. Θεωρητικά και πρακτικά είναι πολλοί οι δυνατοί συνδυασμοί των διαφόρων στοιχείων της εγκαταστάσεως προώσεως μεταξύ των οποίων μπορεί να γίνει η επιλογή. Στο σχήμα 1.2α παρουσιάζονται διαγραμματικά ορισμένες δυνατές επιλογές για μια τυπική εγκατάσταση προώσεως εμπορικού πλοίου.

Μερικές γενικές παρατηρήσεις στο σχήμα 1.2α:

α) Σε σύγχρονες εγκαταστάσεις προώσεως, μόνο βραδύστροφες μηχανές Diesel συνδέονται απ' ευθείας με τον ελικοφόρο άξονα, ενώ για τα λοιπά είδη πολυστρόφων κινητήριων μηχανών είναι αναγκαίο κάποιο σύστημα μεταδόσεως και μειώσεως της κινήσεως, συνήθως με οδοντωτούς τροχούς.



Σχ. 1.2a.

Εναλλακτικές επιλογές για την εγκατάσταση προώσεως ενός πλοίου.

β) Η πλεκτρική πρόσωση (με συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα) παρ' όλο που παρουσιάζει ορισμένα σοβαρά πλεονεκτήματα, δημιουργείται συναντάται ολοένα και σπανιότερα σε νέες κατασκευές.

γ) Η απαραίτητη αναστροφή της κινήσεως του πλοίου (αναπόδιση) επιτυγχάνεται είτε με αντιστροφή της φοράς περιστροφής της κινητήριας μηχανής (περίπτωση μηχανής Diesel) ή με ιδιαίτερη μονάδα (ατμοστρόβιλος) ή με ανεξάρτητο αναστροφέα. Στις εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων χρησιμοποιείται συνήθως για το σκοπό αυτό έλικα μεταβλητού βήματος, η οποία, με κατάλληλη μετακίνηση των πτερυγίων της σε σχέση προς την πλήμνη, μεταβάλλει τη φορά της ώσεως και την κίνηση του πλοίου ενώ ο άξονας στρέφει προς την ίδια διεύθυνση.

### 1.2.1 Οι κυριότεροι παράγοντες για την επιλογή της εγκαταστάσεως προώσεως.

Η σχεδίαση μιας εγκαταστάσεως προώσεως αποτελεί τη συσχέτιση ενός μεγάλου αριθμού μηχανημάτων και συσκευών κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να δημιουργείται ένα ενιαίο λειτουργικό σύνολο. Εκτός δηλαδή από την επιλογή, περιλαμβάνει την προσαρμογή κάθε μηχανήματος με δλα τα υπόλοιπα, ώστε τελικά η εγκατάσταση να έχει επιθυμητό βαθμό αποδόσεως, ασφαλή λειτουργία και αποδεκτό κόστος.

Αρχικά επιλέγεται το είδος της κύριας μηχανής προώσεως από τους συνηθέστερους σήμερα τύπους μηχανών Diesel, ατμοστροβίλους, πυρηνική πρόωση ή συνδυασμό των ανωτέρω. Με την επιλογή του είδους της κύριας μηχανής ανακύπτουν πολλά ερωτήματα. Μερικά από αυτά είναι:

- Θα είναι η μηχανή Diesel βραδύστροφη ή μεσόστροφη; Δίχρονη ή τετράχρονη; Με ή χωρίς υπερπλήρωση;
- Οι λέβητες θα έχουν φυσική κυκλοφορία αέρα (ελκυσμό) ή βεβιασμένη; Τι ποσοστό επανακυκλοφορίας θα έχουν;
- Οι αεριοστρόβιλοι θα είναι απλού κύκλου λειτουργίας ή με ανάκτηση θερμότητας;

Είναι φανερό ότι οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπ' όψη κατά τη σχεδίαση της εγκαταστάσεως προώσεως ενός πλοίου είναι πολλοί. Οι παράγοντες αυτοί συχνά είναι αλληλοσυγκρουόμενοι και καθορίζουν τελικά το αποτέλεσμα της σχεδιάσεως που σχεδόν πάντα αποτελεί ένα συγκερασμό από εναλλακτικές και αντιτιθέμενες απόψεις. Οι σπουδαιότεροι από τους παράγοντες αυτούς είναι:

#### **α) Αξιοποστία.**

Ο παράγοντας αυτός έχει προσλάβει ιδιαίτερη σημασία πρόσφατα, και λόγω της χρησιμοποιούμενης σύγχρονης τεχνολογίας και της τάσεως που υπάρχει για ελάττωση του προσωπικού μηχανής. Έτσι με τη βοήθεια της στατιστικής και των πιθανοτήτων εξετάζεται λεπτομερώς η αξιοποστία κάθε μηχανήματος, καθώς και του συνόλου της εγκαταστάσεως.

#### **β) Ευχέρεια συντηρήσεως.**

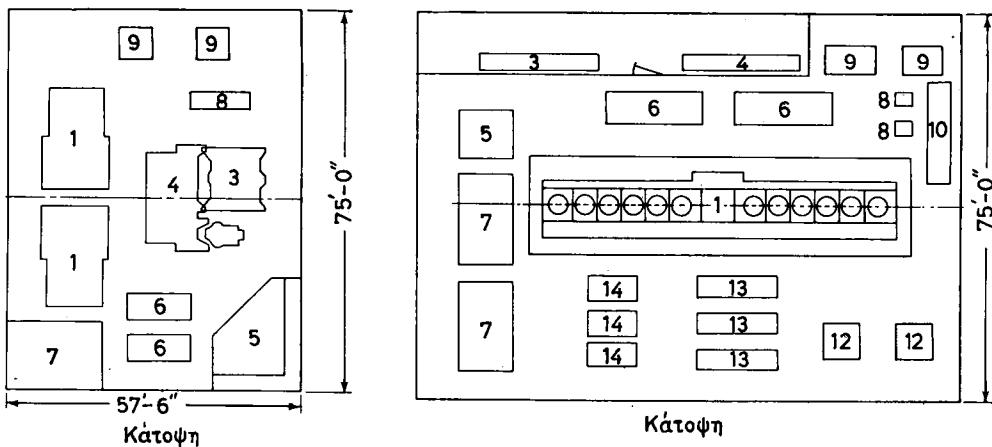
Συντήρηση εννοούμε τόσο την προληπτική όσο και τη διορθωτική. Και οι δύο μορφές συντηρήσεως συσχετίζονται με τον αριθμό και την εξειδίκευση του προσωπικού καθώς και με την απαιτούμενη διάρκεια ακινησίας του πλοίου.

#### **γ) Καταλαμβανόμενος χώρος.**

Επειδή ο χώρος που καταλαμβάνει η εγκατάσταση προώσεως είναι σε βάρος της μεταφορικής ικανότητας του πλοίου, επιθυμητό είναι να ελαχιστοποιείται. Έτσι, ανάλογα με το είδος της εγκαταστάσεως προώσεως προκύπτουν και διαφορετικές απαιτήσεις χώρου. Στα σχήματα 1.2β έως 1.2ε, παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές εγκαταστάσεις προώσεως ατμοστροβίλων, βραδυστρόφων μηχανών Diesel, πυρηνικής προώσεως και αεριοστροβίλων εμπορικών πλοίων. Και τα τέσσερα είδη είναι της αυτής ιπποδυνάμεως. Χαρακτηριστική είναι η εγκατάσταση με αεριοστροβίλους, η οποία έχει τη μικρότερη απαίτηση σε χώρο (σχ. 1.2ε).

#### **δ) Βάρος εγκαταστάσεως.**

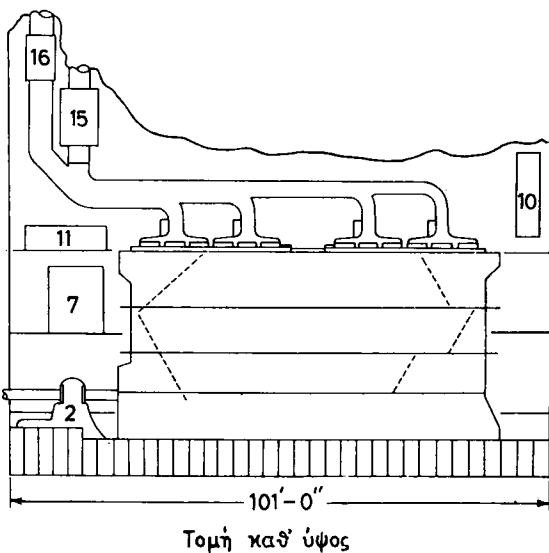
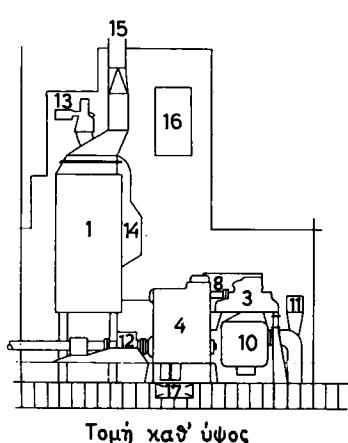
Το βάρος της εγκαταστάσεως προώσεως ελαττώνει και αυτό τη μεταφορική ικανότητα του πλοίου και γι' αυτό πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Στο σχήμα 1.2στ παρουσιάζονται συγκριτικά τα βάρη των διαφόρων ειδών μηχανών σε λίμπρες ανά ίππο ισχύος, με ή χωρίς το καύσιμο αντίστοιχα. Πρέπει νά σημειωθεί ότι η τάση στη σύγχρονη τεχνολογία είναι να ελαττωθεί το βάρος των μηχα-



Σχ. 1.28.

Εγκατάσταση ατμοστροβίλου.

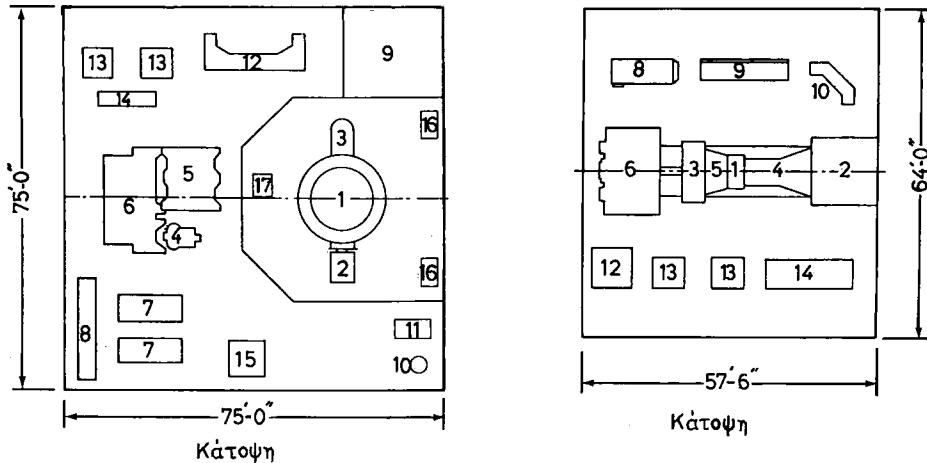
- 1) Λέβητας. 2) Στρόβιλος υψηλής πιέσεως. 3) Στρόβιλος χαμηλής πιέσεως. 4) Μειωτήρας. 5) Διαμέρισμα ελέγχου. 6) Στροβιλογεννήτρια. 7) Συνεργείο μηχανής. 8) Ατμογεννήτρια. 9) Αποστακτήρας. 10) Κύριο ψυγείο. 11) Κύρια αντλία κυκλοφορίας. 12) Ωστικός τριβέας. 13) Ανεμιστήρας βεβιασμένης κυκλοφορίας. 14) Προθερμαντήρας αέρα. 15) Καπνοδόχος. 16) Θερμοδοχείο. 17) Δεξαμενή λαδιού.



Σχ. 1.2γ.

Εγκατάσταση βραδύστροφης Ντίζελ.

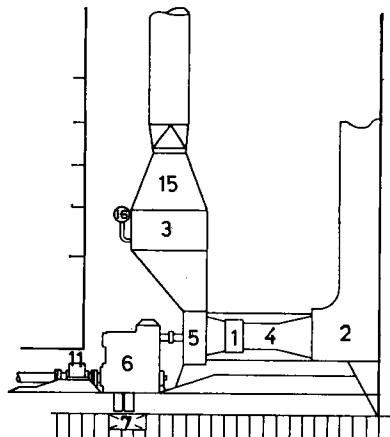
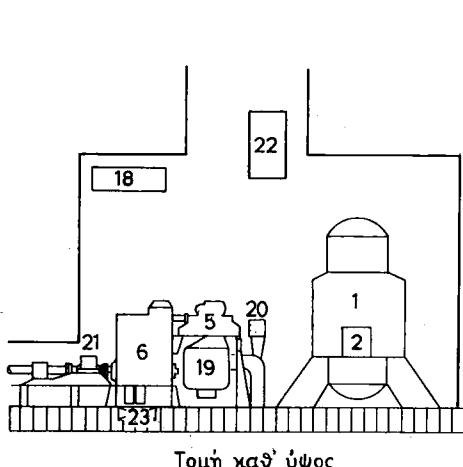
- 1) Κύρια μηχανή. 2) Ωστικός τριβέας. 3) Κονσόλα κεντρικού ελέγχου. 4) Κύριος πίνακας ελέγχου. 5) Στροβιλογεννήτρια. 6) Ντίζελογεννήτρια. 7) Βοηθητικός λέβητας. 8) Αντλία πετρελαίου. 9) Κύριος αεροσυμπιεστής. 10) Προθερμαντήρας πετρελαίου. 11) Φιάλες αέρα εκκινήσεως. 12) Αποστακτήρας. 13) Ψυγείο λαδιού. 14) Αεροσυμπιεστής. 15) Λέβητας καυσαερίων. 16) Σιγαστήρας εξαγωγής.



Σχ. 1.26.

Εγκατάσταση πυρηνικής προώσεως.

- 1) Πυρηνική ατμογεννήτρια. 2) Στρόβιλος κύριου φυσητήρα. 3) Βοηθητικός φυσητήρας. 4) Στρόβιλος υψηλής πέσεως. 5) Στρόβιλος χαμηλής πέσεως. 6) Μειωτήρας. 7) Στροβιλογεννήτρια. 8) Κύριος πίνακας ελέγχου. 9) Συνεργείο μηχανής. 10) Αεροσυμπιεστής. 11) Φίλτρες αέρα. 12) Κονσόλα ελέγχου. 13) Αποστακτήρας. 14) Ατμογεννήτρια. 15) Απορικτοποιητής. 16) Δεξαμενή οξέων. 17) Σύστημα ψύξεως. 18) Δεξαμενή κατακαθίσεως ελαίου. 19) Κύριο ψυγείο. 20) Κύρια αντλία κυκλοφορίας. 21) Ωστικός τριβέας. 22) Θερμοδοχείο. 23) Δεξαμενή ελαίου.

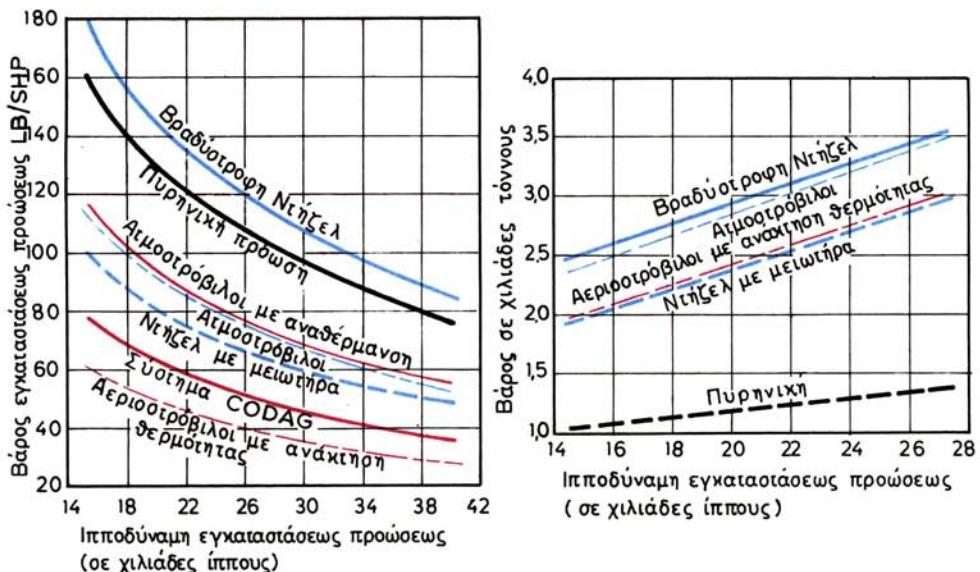


Σχ. 1.2ε.

Εγκατάσταση αεριοστροβίλου.

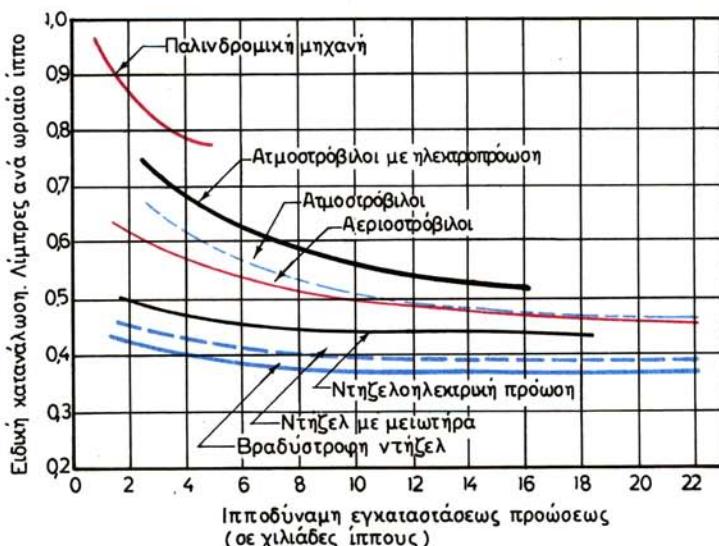
- 1) Κύρια μηχανή. 2) Σύστημα εισαγωγής αέρα. 3) Σύστημα εξαγωγής αέρα. 4) Συμπιεστής. 5) Αεριοστρόβιλος. 6) Μειωτήρας. 7) Δεξαμενή ελαίου. 8) Στροβιλογεννήτρια. 9) Κύριος πίνακας ελέγχου. 10) Κύρια κονσόλα ελέγχου. 11) Ωστικός τριβέας. 12) Βοηθητικός λέβητας. 13) Αποστακτήρας. 14) Ντηζελογεννήτρια. 15) Λέβητας καυσαερίων. 16) Τροφοδότηση ατμού.

νών. Έτσι στρόβιλοι νεώτερης κατασκευής είναι μέχρι και 40% ελαφρότεροι από παλαιότερους της ίδιας ιπποδυνάμεως.



Σχ. 1.2στ.

«Ειδικό» και απόλυτο βάρος των διαφόρων εγκαταστάσεων προώσεως.



Σχ. 1.2ζ.

Σχέση ειδικής καταναλώσεως και ιπποδυνάμεως.

### **ε) Είδος και κατανάλωση καυσίμου.**

Επειδή το απαιτούμενο για τη λειτουργία της εγκαταστάσεως προώσεως καύσιμο καταλαμβάνει δύκο και αποτελεί βάρος (και τα δύο σε βάρος της μεταφορικής ικανότητας) η χαμηλή ειδική κατανάλωση (βάρος καυσίμου ανά παραγόμενο ωριαίο ίππο) αποτελεί σημαντικό παράγοντα επιλογής της εγκαταστάσεως προώσεως. Η σημασία του παράγοντα αυτού αυξάνει λόγω της συνεχώς αυξανόμενης τιμής των καυσίμων. Στο σχήμα 1.2ζ παρουσιάζεται συγκριτική εικόνα των διαφόρων μηχανών προώσεως.

### **σ) Σχέση κύριας μηχανής και βοηθητικών μηχανημάτων.**

Τα βοηθητικά μηχανήματα των πλοίων είναι συνήθως είτε ατμοκίνητα είτε ηλεκτροκίνητα. Έτσι εάν η κύρια πρόωση απαιτεί ατμό, μέρος του ατμού αυτού εύκολα διατίθεται για την κίνηση των βοηθητικών μηχανημάτων, ενώ στην περίπτωση των πλοίων που κινούνται με μηχανή Diesel και αεριοστροβίλους ο απαιτούμενος ατμός παράγεται από ξεχωριστό λέβητα, ο οποίος λειτουργεί συνήθως με τα καυσάρια των κυρίων μηχανών.

### **ζ) Δυνατότητα χειρισμών.**

Όταν η κύρια μηχανή μπορεί να αντιστρέψει τη φορά περιστροφής της, όπως η Diesel και οι ηλεκτρικοί κινητήρες, δεν χρειάζεται ξεχωριστός αναστροφέας. Αντίθετα, στις περιπτώσεις ατμοστροβίλων και αεριοστροβίλων χρησιμοποιείται είτε ξεχωριστός στρόβιλος είτε αναστροφέας είτε έλικα μεταβλητού βήματος. Αν το πλοίο είναι ανάγκη να έχει δυνατότητα ταχέων χειρισμών (π.χ. τά ρυμουλκά), τα παραπάνω λαμβάνονται υπ' όψη προκειμένου να επιλεγεί το είδος της εγκαταστάσεως προώσεως.

### **η) Απαιτούμενο προσωπικό.**

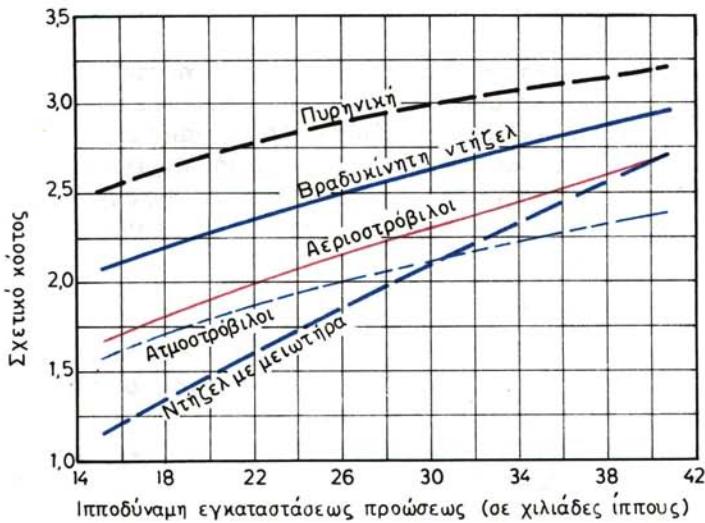
Τα διάφορα είδη μηχανών χρειάζονται για το χειρισμό και τη συντήρησή τους διαφορετικό αριθμό προσωπικού. Έτσι εγκαταστάσεις πλήρως αυτοματοποιημένες, όπως οι αεριοστρόβιλοι, απαιτούν μικρότερο αριθμό προσωπικού. Το πλεονέκτημα δύναται αυτό αντισταθμίζεται από την ανάγκη υψηλής εξειδικεύσεως, την οποία συνήθως απαιτείται να έχει το ολιγάριθμο προσωπικό.

### **θ) Κόστος.**

Όπως είναι φυσικό ανάλογα με το είδος της εγκαταστάσεως το κόστος αγοράς διαφέρει σημαντικά. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 1.2η για τα διάφορα είδη μηχανών που χρησιμοποιούνται συνήθως.

### **ι) Περιορισμοί διατιθέμενης ιπποδυνάμεως.**

Τα διάφορα είδη των διατιθεμένων μηχανών δεν καλύπτουν πλήρως όλη την περιοχή ιπποδυνάμεων που απαιτούνται για εγκατάσταση επάνω σε πλοία. Το πρόβλημα αφορά κυρίως τις μηχανές Diesel καί τους αεριοστροβίλους και πολύ λιγότερο τις εγκαταστάσεις ατμού. Για παράδειγμα, μέχρι σήμερα δεν έχει αναφερθεί μηχανή Diesel εγκαταστημένη επάνω σε πλοίο με ιπποδύναμη μεγαλύτερη από 50.000 ΗΡ. Γι' αυτό απαιτήσεις για μεγαλύτερες ιπποδυνάμεις αντιμετωπίζονται



Σχ. 1.2η.

Σχετικό κόστος των διαφόρων εγκαταστάσεων προώσεως.

συνήθως με τη χρησιμοποίηση ατμοστροβίλων. Οι διάφοροι τύποι μηχανών Diesel και κυρίως οι αεριοστρόβιλοι κυκλοφορούν στο εμπόριο σε καθορισμένες ιπποδύναμεις, π.χ. ιπποδυνάμεις 25.000 HP, 30.000 HP. Οι τυχόν απαιτούμενες ενδιάμεσες ιπποδυνάμεις καλύπτονται με την αγορά μηχανής μεγαλύτερης ιπποδυνάμεως από όσο χρειάζεται.

### 1.3 Τι είναι ο αεριοστρόβιλος. Συνοπτική περιγραφή.

Η ετυμολογική ανάλυση της λέξεως αεριοστρόβιλος μας οδηγεί κατ' αρχή στον ορισμό του στροβίλου ως «ενός τροχού που απορροφά κινητική ενέργεια από ένα ρευστό». Ο γενικός αυτός ορισμός καλύπτει μια ολόκληρη περιοχή από τους πρωτόγονους ανεμόμυλους μέχρι τους υπερσύγχρονους ατμο - αεριο - στροβίλους. Ο κυριότερος «κανταγωνιστής» του στροβίλου για την παραγωγή αφέλιμου μηχανικού έργου είναι η εμβολοφόρος μηχανή εσωτερικής καύσεως. Τα άμεσα πλεονεκτήματα των στροβίλων έναντι των MEK είναι η συμπαγής κατασκευή τους και το ότι η περιστροφική μορφή της ισχύος εξόδου τους είναι αμέσως χρησιμοποιήσιμη για την κίνηση μιας αντλίας, γεννήτριας, έλικας κλπ. Το συμπαγές της κατασκευής οφείλεται στη «συνεχή» ροή του ρευστού μέσα στη μηχανή, σε αντίθεση προς τις επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις του αντίστοιχου «μέσου» (αέρας και προϊόντα καύσεως) στις MEK κατά τις διάφορες φάσεις του κύκλου. Οι αναγκαίες αυτές επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις του μέσου παρακολουθούνται και από αντίστοιχες μεταβολές της ταχύτητας των εμβόλων, βαλβίδων διωστήρων και λοιπών στοιχείων της κατασκευής.

Λόγω ακριβώς αυτής της ομαλής συνέχειας της ροής και της περιστροφής, το βάρος ανά ίππο παραγόμενης ισχύος είναι πολύ μικρότερο στους στροβίλους από ό,τι στις μηχανές Diesel. Αυτή όμως η σχέση βαρών, αποδυναμώνεται αρκετά, αν

η εγκατάσταση προώσεως εξετασθεί ως σύνολο γιατί:

α) Για τη μετάδοση της κινήσεως από το στρόβιλο στην έλικα απαιτείται οπωδήποτε μειωτήρας.

β) Για να παραχθεί το εργαζόμενο ρευστό στον ατμοστρόβιλο, δηλαδή ο ατμός, απαιτείται ξεχωριστή εγκατάσταση λεβήτων της οποίας οπωσδήποτε ο όγκος καθώς και το βάρος είναι πολύ μεγαλύτερα από ό,τι της κινητήριας μηχανής.

Ο αεριοστρόβιλος αποτελεί την απάντηση στο πρόβλημα, και αυτό γιατί συνδέει τα πλεονεκτήματα τόσο του στροβίλου (συμπαγής κατασκευή, αποφυγή παλινδρομούντων τμημάτων) όσο και της μηχανής Diesel (καύση εντός της μηχανής).

Οι κυριότερες μονάδες μιας εγκαταστάσεως αεριοστροβίλων είναι:

#### **α) Ο συμπιεστής.**

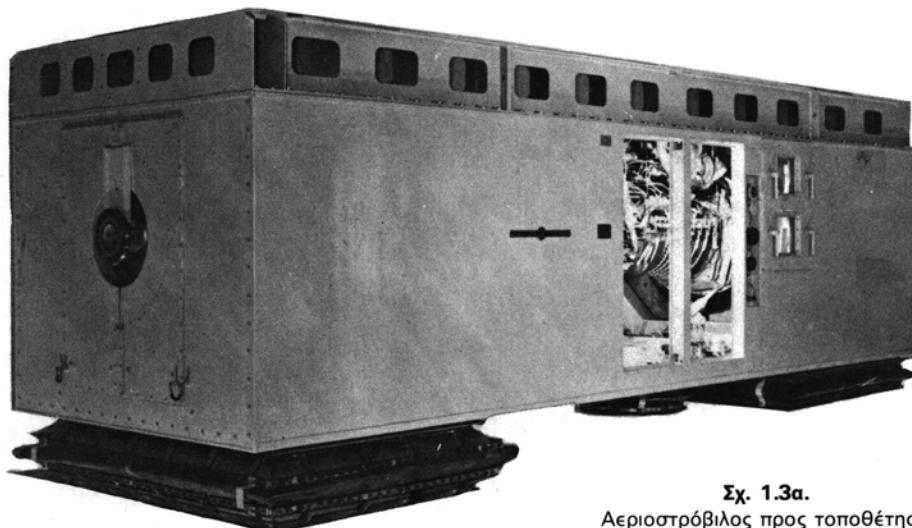
Είναι είτε φυγοκεντρικός είτε αξονικής ροής και παίρνει κίνηση από στρόβιλο ο οποίος συνδέεται με αυτόν με ένα άξονα. Συμπιέζει τον ατμοσφαιρικό αέρα σε πίεση 5 έως 20 ατμοσφαιρών.

#### **β) Ο θάλαμος καύσεως.**

Σ' αυτόν πραγματοποιείται η καύση του καυσίμου με τον αέρα που παρέχει ο συμπιεστής. Ο λόγος αέρα προς καύσιμο είναι συνήθως μεγαλύτερος του 60 (κατά βάρος) και τα προϊόντα της καύσεως είναι μίγμα θερμού αέρα υψηλής πιέσεως με υδρογονάνθρακες. Τα καυσαέρια αυτά, που είναι υψηλής πιέσεως, έχουν θερμοκρασία μεταξύ 1500 έως 2000°F και εκτονώνονται μέσα σε προφύσια, ώστε μέρος της ενέργειάς τους να μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια. Με αυτό τον τρόπο παράγεται ρεύμα καυσαερίων υψηλής ταχύτητας το οποίο προσκρούει πάνω στα πτερύγια του στροβίλου.

#### **γ) Ο στρόβιλος.**

Είναι το τμήμα της θερμικής μηχανής όπου παράγεται το ωφέλιμο μηχανικό έργο. Συνήθως σε ναυτικές εγκαταστάσεις αποτελείται από δύο τμήματα στροβίλων



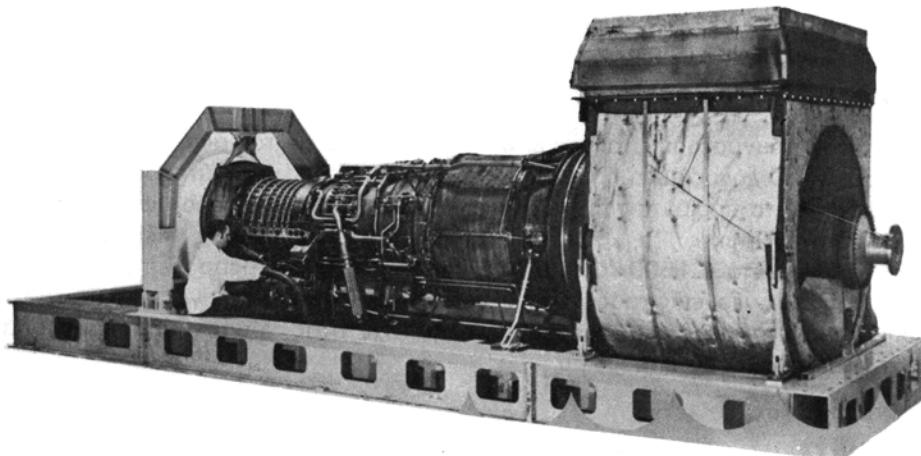
**Σχ. 1.3α.**  
Αεριοστρόβιλος προς τοποθέτηση.

σε σειρά. Ο πρώτος από αυτούς χρησιμοποιείται αποκλειστικά για να κινεί το συμπιεστή με τον οποίο συνδέεται με κοινό άξονα. Ονομάζεται **στρόβιλος υψηλής πίεσεως** ή **στρόβιλος αεριογόνου**. Ο δεύτερος στρόβιλος, ο οποίος παίρνει κίνηση από τα καυσαέρια εξαγωγής του στροβίλου ΥΠ, είναι ο στρόβιλος που περιστρέφει τον ελικοφόρο άξονα και ονομάζεται και **στρόβιλος χαμηλής πίεσεως**.

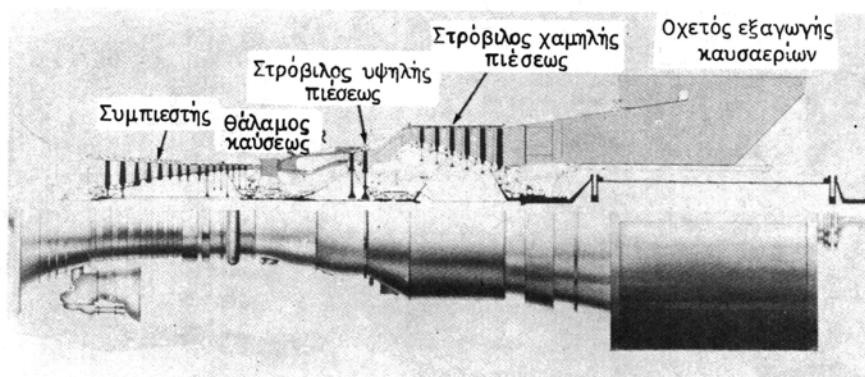
Το σύνολο συμπιεστή-θαλάμου καύσεως και στροβίλου ΥΠ ονομάζεται και **αεριογόνος** γιατί αποκλειστικός σκοπός του είναι η παραγωγή καυσαερίων (ή αερίων) και η μέσω αυτών μετάδοση κινήσεως στο στρόβιλο ισχύος.

Στα σχήματα 1.3α και 1.3β φαίνεται πραγματική εικόνα εγκατεστημένου πλήρους αεριοστροβίλου πριν και μετά την αποσυσκευασία του.

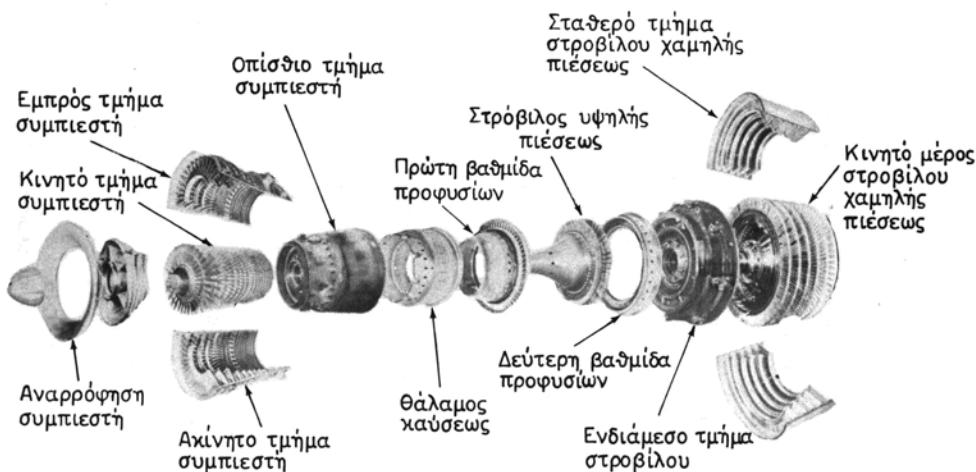
Ο ίδιος αεριοστρόβιλος στο σχήμα 1.3γ φαίνεται σε τομή, ενώ στο σχήμα 1.3δ παρουσιάζονται όλα τα τμήματά του.



**Σχ. 1.3β.**  
Αεριοστρόβιλος μετά την εγκατάσταση.



**Σχ. 1.3γ.**  
Τομή αεριοστροβίλου.

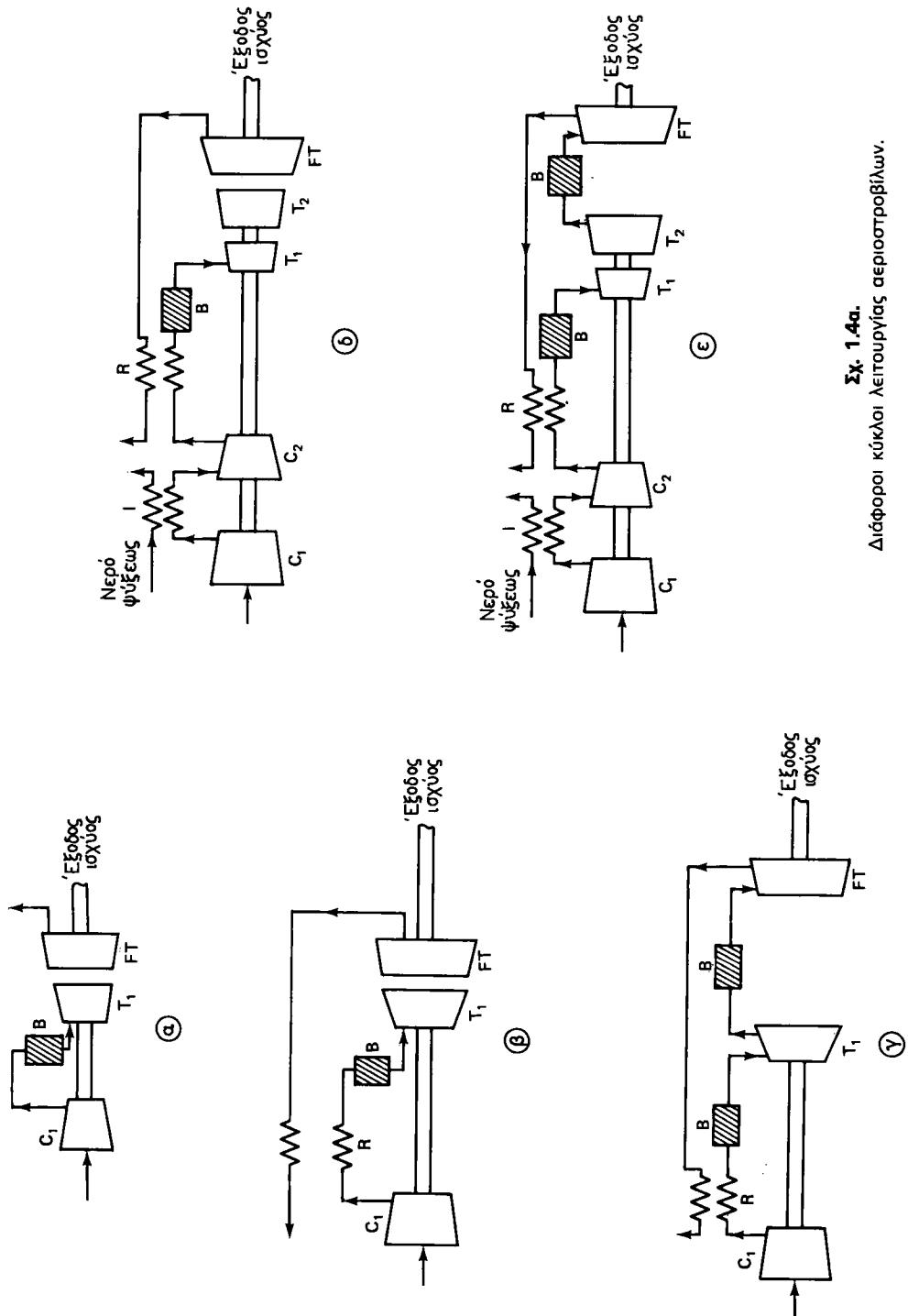


Σχ. 1.36.  
Τα κυριότερα τμήματα του αεριοστροβίλου.

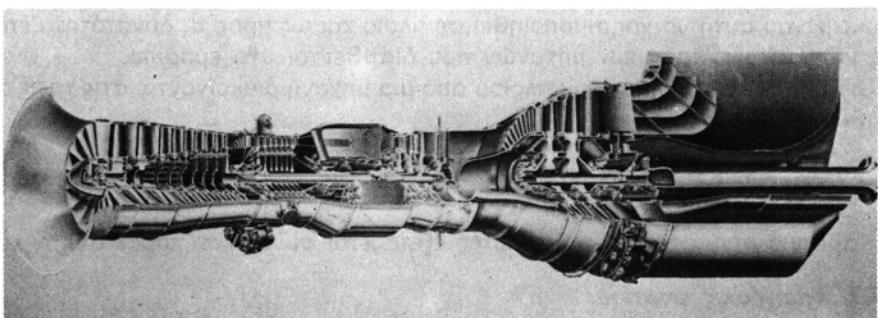
#### 1.4 Κατάταξη και είδη αεριοστροβίλων.

Η κατάταξη των αεριοστροβίλων γίνεται συνήθως με βάση τον κύκλο της λειτουργίας τους. Τα συχνότερα απαντώμενα είδη αεριοστροβίλων φαίνονται στο σχήμα 1.4α.

- α) Αεριοστρόβιλος απλού κυκλώματος.
  - β) Αεριοστρόβιλος με ανάκτηση θερμότητας.
  - γ) Αεριοστρόβιλος με ανάκτηση θερμότητας και αναθέρμανση.
  - δ) Αεριοστρόβιλος με ανάκτηση θερμότητας και ενδιάμεση ψύξη.
  - ε) Αεριοστρόβιλος με αναθέρμανση, ανάκτηση θερμότητας και ενδιάμεση ψύξη.
- Οι αεριοστροβίλοι μπορούν επίσης να καταταχθούν ανάλογα με τη σχεδίασή τους και συγκεκριμένα ανάλογα με το αν η αρχική τους σχεδίαση έγινε για αεροπορική ή βιομηχανική χρήση. Οι ναυτικοί αεριοστρόβιλοι «αεροπορικής προελεύσεως» στην πραγματικότητα αποτελούν προσαρμογή κινητήρων αεροπλάνων σε ναυτικές εγκαταστάσεις. Η προσαρμογή αυτή βασικά συνίσταται στην προσθήκη του στροβίλου ισχύος για την απορρόφηση της κινητικής ενέργειας των καυσαερίων και στην προστασία των υλικών από τις διαβρώσεις λόγω θαλάσσιου περιβάλλοντος. Το κυριότερο χαρακτηριστικό των αεριοστροβίλων της κατηγορίας αυτής είναι η ελαφριά κατασκευή τους. Έτσι ο τύπος LM 2500 της General Electric ζυγίζει συνολικά 34.000 lbs (15 περίπου τόνους), δηλαδή 1,5 lbs ανά ίππο παραγόμενης ισχύος. Στο σχήμα 1.4β φαίνεται σε τομή ένας άλλος αεριοστρόβιλος αεροπορικής προελεύσεως τύπου Turbo Power - Marine Systems (United Aircraft)



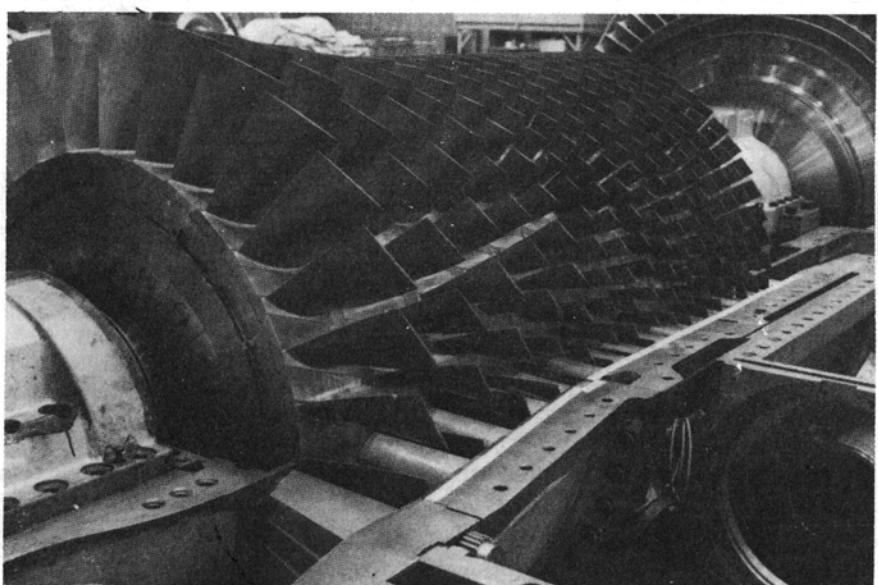
Σχ. 1.4α. Διάφοροι κύκλοι λεπτουργίας αεριοστροβίλων.



**Σχ. 1.4β.**  
Ο αεριοστρόβιλος FT4C.

FT4, του οποίου η παραγόμενη ισχύς και το βάρος είναι του ίδιου περίπου μεγέθους όπως του LM 2500.

Οι αεριοστρόβιλοι «βιομηχανικής προελεύσεως» και σχεδιάσεως έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως στη βιομηχανία χημικών προϊόντων και πετρελαίων. Διακρίνονται για την ισχυρή και βαριά κατασκευή τους. Χαρακτηριστικό δείγμα τέτοιου αεριοστροβίλου φαίνεται στο σχήμα 1.4γ. Είναι κατασκευής General Electric, τύπου MS 5000, ισχύος 20.000 HP και βάρους 300.000 lbs, δηλαδή 15 lbs ανά ίππο ισχύος, ήτοι δεκαπλάσιο από τους αεριοστροβίλους αεροπορικής χρήσεως.



**Σχ. 1.4γ.**  
Ο αεριοστρόβιλος MS 5000 2B.

Όλοι οι αεριοστρόβιλοι που χρησιμοποιήθηκαν μέχρι σήμερα σε ναυτικές εγκαταστάσεις προέρχονται από προσαρμογές που δοκιμάστηκαν με επιτυχία σε άλλες χρήσεις. Ανάλογα με τις ειδικές απαιτήσεις της ναυτικής εγκαταστάσεως από τις μηχανές της, δημιουργούνται κριτήρια ως προς την καταλληλότητα μιας μηχανής.

προκειμένου αυτή να χρησιμοποιηθεί σε πλοίο και ως προς τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ των διαφόρων μηχανών που διατίθενται στο εμπόριο.

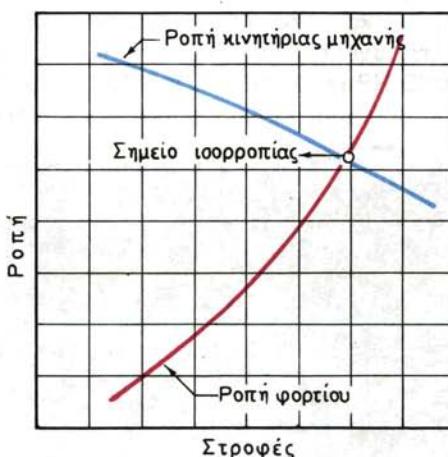
Οι «απαιτήσεις» λοιπόν του πλοίου από μια μηχανή διακρίνονται στις τρεις ακόλουθες κατηγορίες:

- Απαιτήσεις φορτίου.
- Απαιτήσεις περιβάλλοντος.
- Απαιτήσεις χρήσεως.

Κάθε μια από τις κατηγορίες αυτές εξετάζεται συνοπτικά παρακάτω.

#### 1.4.1 Απαιτήσεις φορτίου.

Το φορτίο της μηχανής προώσεως ενός πλοίου είναι συνήθως μια έλικα που συνδέεται με αυτή με τον ελικοφόρο άξονα. Η απαίτηση ισχύος του φορτίου εκδηλώνεται ως απαίτηση ροπής σε ορισμένες στροφές. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες δηλαδή στρεπτικής ροπής - αριθμού στροφών της μηχανής και της έλικας πρέπει να έχουν κοινό σημείο λειτουργίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4δ.



Σχ. 1.4δ.  
Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας.

Εκ πρώτης όψεως φαίνεται αδύνατο δύο τόσο διαφορετικά μεταξύ τους συστήματα, ο αεριοστρόβιλος και η έλικα, να παράγουν και να απορροφούν αντίστοιχα την ίδια στρεπτική ροπή στον ίδιο αριθμό στροφών, όταν δεν συμπίπτουν κάν οι περιοχές στροφών λειτουργίας τους. Αυτό δύναται επιτυγχάνεται με τη βοήθεια μειωτήρα στροφών, ο οποίος θεωρείται εξάρτημα του αεριοστροβίλου. Με αυτό τον τρόπο προκύπτουν χαρακτηριστικές λειτουργίες με κοινό σημείο ισορροπίας. Στην πράξη η ροπή της μηχανής είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να επιτυγχάνεται η επιτάχυνση του φορτίου μέχρι της περιοχής μέγιστης ισχύος.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας των αεριοστροβίλων ικανοποιούν τις πιο πάνω απαιτήσεις των ελίκων σε δόλη την περιοχή λειτουργίας τους, περιλαμβανομένων και των μεταβατικών καταστάσεων εκκίνησεως, κρατήσεως, αναστρο-

φής της φοράς κινήσεως του πλοίου, επιταχύνσεως κλπ.

Άλλη απαίτηση του φορτίου, η οποία ικανοποιείται πλήρως από τους αεριοστροβίλους, είναι η ταχεία εκκίνηση της πρωστήριας εγκαταστάσεως. Ενώ τόσο οι ατμοστρόβιλοι όσο και οι μηχανές Diesel χρειάζονται αρκετές ώρες προθερμάνσεως πριν ενεργοποιηθούν πλήρως, οι αεριοστρόβιλοι, λόγω της ελαφράς κατασκευής τους, δεν απαιτούν καμιά προθέρμανση των μεταλλικών τμημάτων τους και μπορούν να αποδώσουν την πλήρη ισχύ τους σε μερικά λεπτά. Το χαρακτηριστικό αυτό αποτελεί σοβαρότατο πλεονέκτημα για τη χρησιμοποίηση των αεριοστροβίλων σε πλοία που απαιτούν ταχεία εκκίνηση, όπως είναι π.χ. τα πολεμικά. Η ταχύτατη αλλαγή του φορτίου σε περιπτώσεις χειρισμών (πρόσω — κράτει — ανάποδα) ικανοποιείται πλήρως από τους αεριοστροβίλους. Αυτό οφείλεται στη μικρή αδράνεια των κινουμένων τμημάτων τους και στη μικρή αποθηκευμένη ενέργεια τους, σε αντίθεση προς τις μηχανές Diesel, που έχουν μεγάλη αδράνεια κινουμένων τμημάτων και προς τους ατμοστροβίλους που έχουν μεγάλη αποθηκευμένη ενέργεια του ατμού στο λέβητα και στις σωληνώσεις.

Τέλος και η απαίτηση αντιστροφής της φοράς της ώσεως της έλικας επιτυγχάνεται στους αεριοστροβίλους χωρίς ξεχωριστό αναστροφέα, με χρήση ελίκων μεταβλητού βήματος (Controllable Pitch Propellers ή CPP).

#### **1.4.2 Απαιτήσεις περιβάλλοντος.**

Με τον όρο «απαιτήσεις περιβάλλοντος» εννοούμε τόσο τις απαιτήσεις που το περιβάλλον «υποχρεώνει» τη μηχανή να ικανοποιεί όσο και τις επιπτώσεις από τη λειτουργία της μηχανής στο περιβάλλον. Έτσι έχουμε:

##### **α) Υγρασία θαλάσσιου περιβάλλοντος.**

Έχει ως συνέπεια την εναπόθεση αλάτων, τα οποία, εκτός από τη δημιουργία διαβρωτικού περιβάλλοντος σε πολλά τμήματα της μηχανής φράζουν συγχρόνως και τις διόδους του αέρα (πτερύγια, προφύσια, αγωγοί), με αποτέλεσμα τη μείωση της ιπποδυνάμεως. Το πρόβλημα είναι οξύτερο στους αεριοστροβίλους, σε σύγκριση προς τις άλλες θερμικές μηχανές, λόγω των μεγάλων ποσοτήτων αέρα που απαιτεί η λειτουργία τους. Στην πράξη, η απαίτηση της αποφυγής εναποθέσεως αλάτων ή και της μειώσεως των επιπτώσεών της επιτυγχάνεται με κατάλληλη διαμόρφωση των αγωγών προσαγωγής αέρα και με χρήση υλικών ανθεκτικών στη διάβρωση στα τμήματα εκείνα που δέχονται την άμεση επίδραση του διαβρωτικού περιβάλλοντος.

##### **β) Εισοδος θαλάσσιου νερού στο καύσιμο.**

Αν και η μόλυνση του καυσίμου είναι ανεπιθύμητη σε όλες τις μηχανές, οι αεριοστρόβιλοι είναι ιδιαίτερα ευπαθείς, λόγω της συνεχούς εκθέσεως των θερμών τμημάτων τους στα προϊόντα της καύσεως. Υπάρχουν γι' αυτό αυξημένες απαιτήσεις καθαρότητας του καυσίμου, η οποία εξασφαλίζεται με φίλτρα, διηθητήρες κλπ.

##### **γ) Μετάδοση κραδασμών και θορύβων.**

Οι αεριοστρόβιλοι που χρησιμοποιούνται σε ναυτικές εγκαταστάσεις δέχονται

τις έντονες καταπονήσεις που εξασκεί το θαλάσσιο περιβάλλον στα πλοία, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις θαλασσοταραχής. Οι καταπονήσεις αυτές είναι αποτέλεσμα των επιταχύνσεων του σκάφους που πολλές φορές φθάνουν την τιμή της επιταχύνσεως της βαρύτητας ( $1 \text{ g} = 9,81 \text{ m/sec}^2$ ). Μεταξύ των διαφόρων πηγών δημιουργίας κραδασμών και θορύβων, ιδιαίτερης σημασίας είναι οι οφειλόμενες στην έλικα, οι οποίες, είτε μέσω του ελικοφόρου άξονα είτε μέσω του σκάφους, μεταδίδονται στους αεριοστροβίλους. Για την αποφυγή δυσμενών επιπτώσεων στις μηχανές, ο τρόπος εδράσεως και η στήριξή τους στο σκάφος αποτελεί αντικείμενο ιδιαίτερης μελέτης.

#### **δ) Επιπτώσεις από τη λειτουργία των αεριοστροβίλων στο περιβάλλον.**

Μέ την όλο και σοβαρότερη σημασία που αποδίδεται στην αποφυγή ρυπάνσεως του περιβάλλοντος, ορισμένοι παράγοντες, που στο πρόσφατο παρελθόν δεν λαμβάνονταν υπ' όψη, αποκτούν ιδιαίτερη βαρύτητα. Έτσι, από πλευράς ρυπάνσεως του περιβάλλοντος, ο αεριοστρόβιλος μειονεκτεί σε σύγκριση μέ τις άλλες μηχανές, γιατί δημιουργεί αυξημένη «ρύπανση θορύβου» και «θερμική ρύπανση». Η «ρύπανση θορύβου», που ενοχλεί κυρίως τούς επιβαίνοντες στο πλοίο, οφείλεται κυρίως στις μεγάλες ποσότητες και ταχύτητες των καυσαερίων και αντιμετωπίζεται με τη βοήθεια μονώσεων. Η «θερμική ρύπανση» οφείλεται στην αποβαλλόμενη θερμότητα προς την ατμόσφαιρα από τα καυσαέρια και από το νερό ψύξεως. Ειδικότερα η αποβαλλόμενη θερμότητα από τα καυσαέρια δημιουργεί πρόσθετους κινδύνους πυρκαϊάς στο περιβάλλον, γιατί μαζί με τα καυσαέρια αποβάλλονται και σπινθήρες.

#### **1.4.3 Απαιτήσεις χρήσεως.**

Γνωρίσαμε ήδη τους κυριότερους παράγοντες που λαμβάνονται υπ' όψη στη σχεδίαση και την επιλογή του είδους των μηχανημάτων μιας εγκαταστάσεως προώσεως. Οι παράγοντες αυτοί αποτελούν επίσης και τις απαιτήσεις της εγκαταστάσεως από τις μηχανές. Ειδικότερα, προκειμένου για αεριοστροβίλους που χρησιμοποιούνται ως κύριες μηχανές σε πλοία, υπάρχουν οι ακόλουθες απαιτήσεις:

#### **α) Ελαχιστοποίηση βάρους και όγκου.**

Ισχύουν όσα αναφέρονται στην παράγραφο 1.2.1.

#### **β) Αυξημένη ακτίνα ενέργειας.**

Η ακτίνα ενέργειας για δεδομένη ποσότητα μεταφερόμενου καυσίμου εξαρτάται από την ειδική κατανάλωση της μηχανής. Επειδή ο κυριότερος παράγοντας της ειδικής καταναλώσεως είναι ο βαθμός αποδόσεως, είναι φανερό ότι αύξηση της ακτίνας ενέργειας με τις παραπάνω προϋποθέσεις συνεπάγεται αυξημένο βαθμό αποδόσεως.

#### **γ) Ανταπόκριση σε διάφορες κατανομές του φορτίου.**

Με τον όρο κατανομή του φορτίου (load profile) εννοούμε τη χρονική διάρκεια κατά την οποία η μηχανή λειτουργεί σε διάφορα ποσοστά της ονομαστικής της ισχύος. Η κατανομή του φορτίου διαφέρει σημαντικά, ανάλογα με τον τύπο και τη

χρησιμοποίηση του πλοίου. Έτσι, π.χ. ένα δεξαμενόπλοιο (tanker) της γραμμής Περσικός Κόλπου - Δυτική Ευρώπη λειτουργεί τη μηχανή του συνεχώς σε μέγιστη ισχύ επί αρκετές εβδομάδες, ενώ ένα πολεμικό πλοίο λειτουργεί τις μηχανές του συνήθως σε μικρότερα ποσοστά της ονομαστικής ισχύος και για μικρότερα χρονικά διαστήματα, ενώ συγχρόνως μεταβάλλει ταχύτητα και συνεπώς και ισχύ πάρα πολύ συχνά.

Οι αεριοστρόβιλοι είναι μηχανές κατάλληλες για όλες τις κατανομές των φορτίων, ενώ συγχρόνως παρουσιάζουν τη μεγάλης σημασίας δυνατότητα της ταχύτατης εναλλαγής του φορτίου τους.

### **δ) Αξιοποίηση.**

Η μακρά και επιτυχής προϋπηρεσία των αεριοστροβίλων, κυρίως σε αεροπορική χρήση, έχει έμπρακτα αποδείξει την αυξημένη αξιοποίησία τους ως μηχανών. Θα πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι για την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς τη συμπεριφορά τους ως ναυτικών μηχανών, απαιτείται η συγκέντρωση δεδομένων από πολλά πλοία και επί πολλά έτη, πράγμα που δεν έχει ακόμη ολοκληρωθεί.

### **ε) Συχνότητα συντηρήσεως.**

Οι απαιτήσεις χρήσεως καθορίζουν αν οι ανάγκες συντηρήσεως ενός αεριοστροβίλου μπορούν να ικανοποιηθούν εύκολα ή όχι. Αν π.χ. για λόγους συντηρήσεως απαιτείται η κράτηση της μηχανής επί δύωρο ανά 100 ώρες λειτουργίας, αυτό είναι εφικτό και αποδεκτό για ένα αεριοστρόβιλο εγκατεστημένο σε αεροπλάνο, ενώ πρακτικά είναι αδύνατο για αεριοστρόβιλο πλοίου πού ταξιδεύει συνεχώς για μερικές χιλιάδες μίλια.

Στον τομέα αυτό έχει γίνει σοβαρή προσπάθεια προσαρμογής των απαιτήσεων συντηρήσεως των αεριοστροβίλων αεροπορικής προελεύσεως, ώστε να μην απαιτούν μεγάλης συχνότητας συντήρηση, γιατί μόνον έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα πλοία.

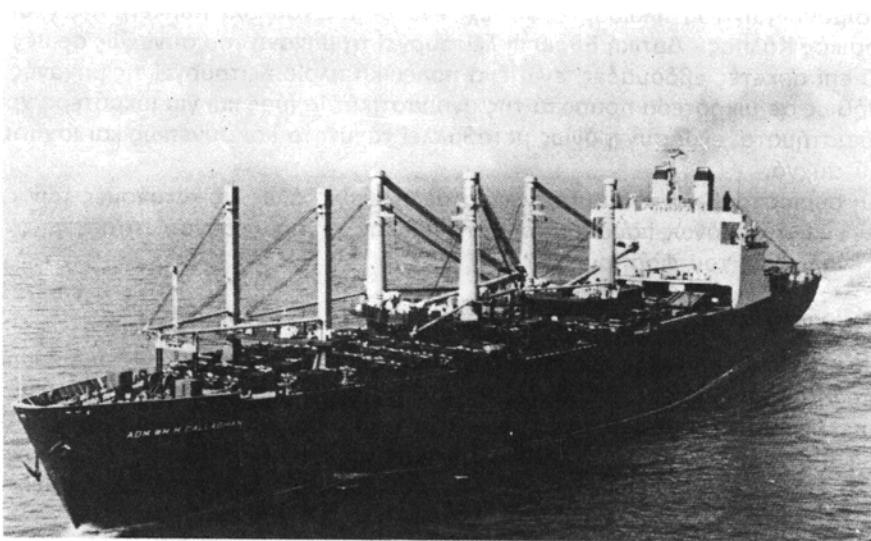
## **1.5 Πλοία κινούμενα με αεριοστροβίλους.**

Ο αεριοστρόβιλος έχει χρησιμοποιηθεί ως μηχανή προώσεως (αλλά και για βοηθητικές χρήσεις) σε πολλά είδη πλοίων. Από μικρού μεγέθους πλοία αναψυχής μερικών εκατοντάδων ίππων μέχρι μεγάλα πλοία ιπποδυνάμεως 50.000 HP ανά άξονα.

Ορισμένες από τις εγκαταστάσεις προώσεως έχουν μάλλον πειραματικό χαρακτήρα, για τη διαπίστωση των δυνατοτήτων και απαιτήσεων των αεριοστροβίλων στην πράξη, ενώ άλλες έχουν επιλεγεί μετά από επιτυχή ανταγωνισμό τους προς άλλα είδη εγκαταστάσεων. Τα πλοία που αναφέρονται στις παρακάτω παραγράφους, αν και αποτελούν μικρό μόνο ποσοστό αυτών που κινούνται σήμερα με αεριοστροβίλους, είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα χρήσεως αεριοστροβίλων σε ναυτικές εγκαταστάσεις.

### **1.5.1 Εμπορικά πλοία.**

Στο σχήμα 1.5α φαίνεται το πλοίο «Admiral Callaghan» τύπου Roll-on-Roll-off.



**Σχ. 1.5α.**  
Το πλοίο Ro-Ro «Admiral Gallahan».

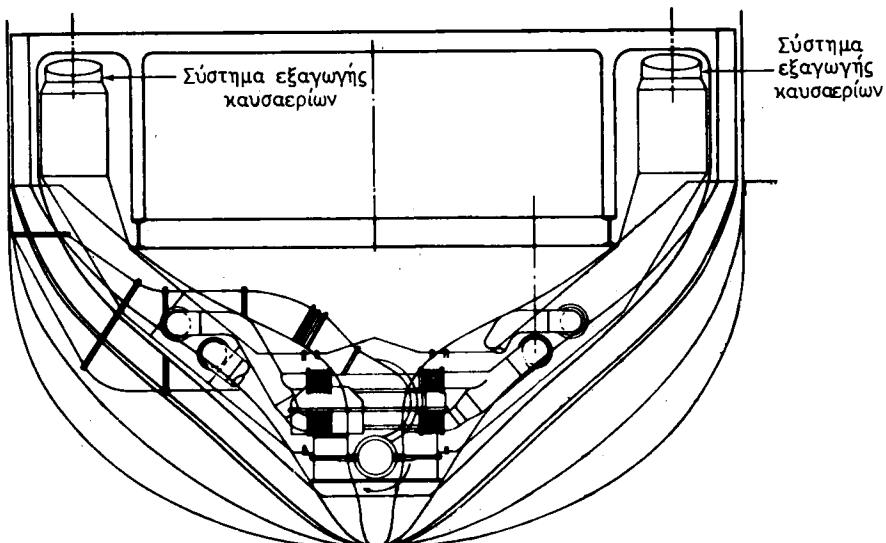


**Σχ. 1.5β.**  
Πλοίο της σειράς «Itron Monarch».

Έχει μήκος 700 πόδια, άφορτο εκτόπισμα 7000 τόνους και ταχύτητα 26 κόμβων. Φέρει δύο άξονες, ο καθένας από τους οποίους κινείται από ένα αεριοστρόβιλο LM 2500. Οι αεριοστρόβιλοι του αντικαταστάθηκαν με καινούργιους ύστερα από 30.000 ώρες λειτουργίας. Με αεριοστροβίλους επίσης κινούνται τέσσερα αδελφά πλοία της σειράς Euroliner, κατασκευής Διut. Γερμανίας. Έχουν μήκος 800 πόδια και ταχύτητα 27 κόμβων. Είναι διπλέλικα, με ένα αεριοστρόβιλο σε κάθε άξονα ισχύος 30.000 HP.

Στο σχήμα 1.5β φαίνεται ένα πλοίο της σειράς Iron Monarch κατασκευής Αυστραλίας. Έχει μήκος 180 m και ταχύτητα πάνω από 20 κόμβους. Φέρει μια έλικα κινούμενη από ένα αεριοστρόβιλο συνεχούς ιπποδυνάμεως 19.000 HP. Έχει πρωτότυπο σύστημα εξαγωγής καυσαερίων αποτελούμενο από δύο κλάδους, για εξοικονόμηση χώρου στο μέσο του σκάφους.

Το σύστημα αυτό φαίνεται αναλυτικότερα στην εγκάρσια τομή του πλοίου (σχ. 1.5γ).



**Σχ. 1.5γ.**  
Εγκάρσια τομή του πλοίου «Iron Monarch».

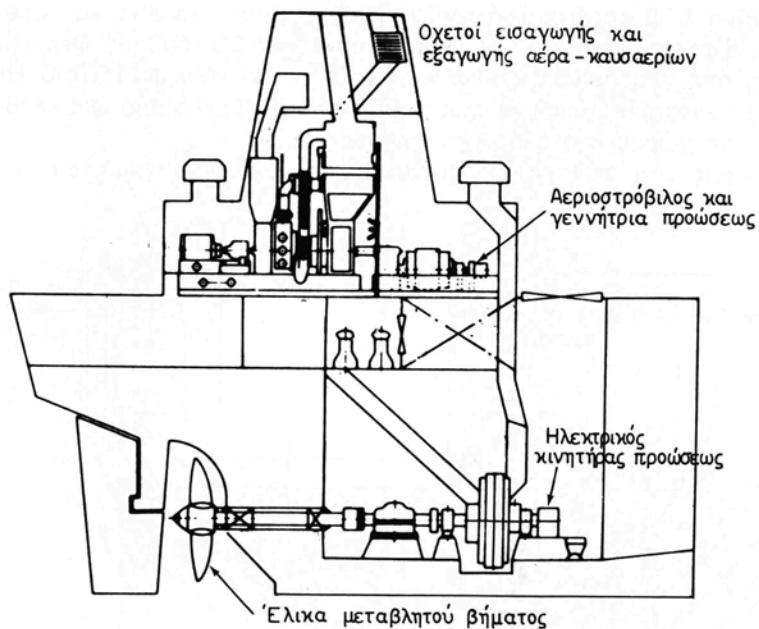
Ένας άλλος χαρακτηριστικός τύπος είναι τα tankers της Chevron Oil Company. Έχουν έναν άξονα 12.500 HP. Η κύρια μηχανή είναι αεριοστρόβιλος τύπου MS 3002 που κινεί γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος. Τόσο ο αεριοστρόβιλος όσο και η γεννήτρια βρίσκονται στο κύριο κατάστρωμα, ενώ ο κινητήρας προώσεως είναι κάτω από αυτά (σχ. 1.5δ).

### 1.5.2 Μικρά πλοία.

Οι αεριοστρόβιλοι έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς ως μηχανές προώσεως μικρών πλοίων κυρίως όπου απαιτούνται αυξημένες επιδόσεις ταχύτητας. Στο σχήμα 1.5ε φαίνεται ένας τέτοιος τύπος πλοίου ενώ στο σχήμα 1.5στ φαίνεται η εγκατάσταση προώσεως σε λεπτομέρειες. Τέλος, το σχήμα 1.5ζ παρουσιάζει διαγραμματικά την εγκατάσταση προώσεως ενός πειραματικού μικρού πλοίου.

### 1.5.3 Πολεμικά πλοία.

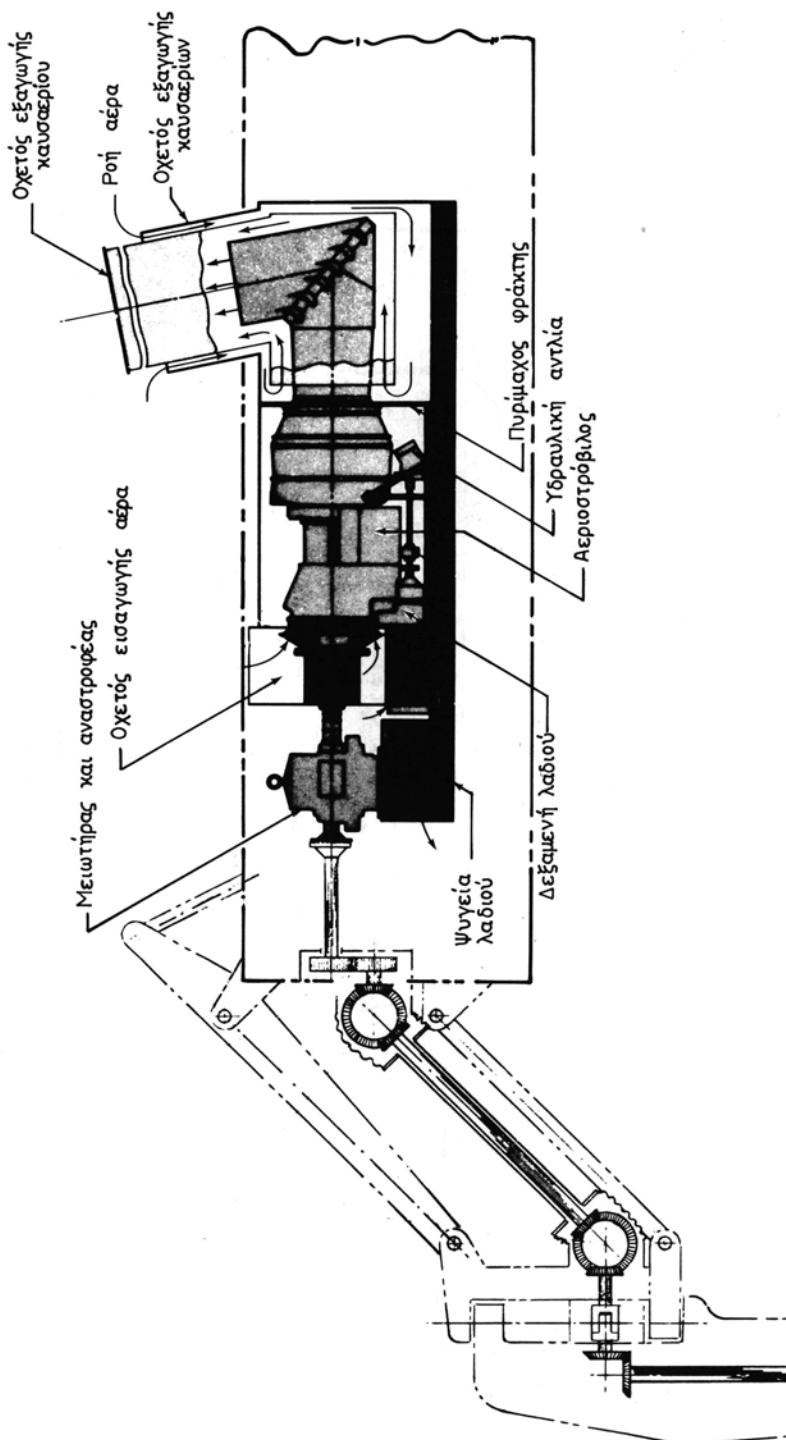
Το μικρό βάρος του αεριοστροβίλου σε συνδυασμό με τη δυνατότητα άμεσης αποδόσεως όλης της ισχύος που διατίθεται και χωρίς προθέρμανση, τον καθι-



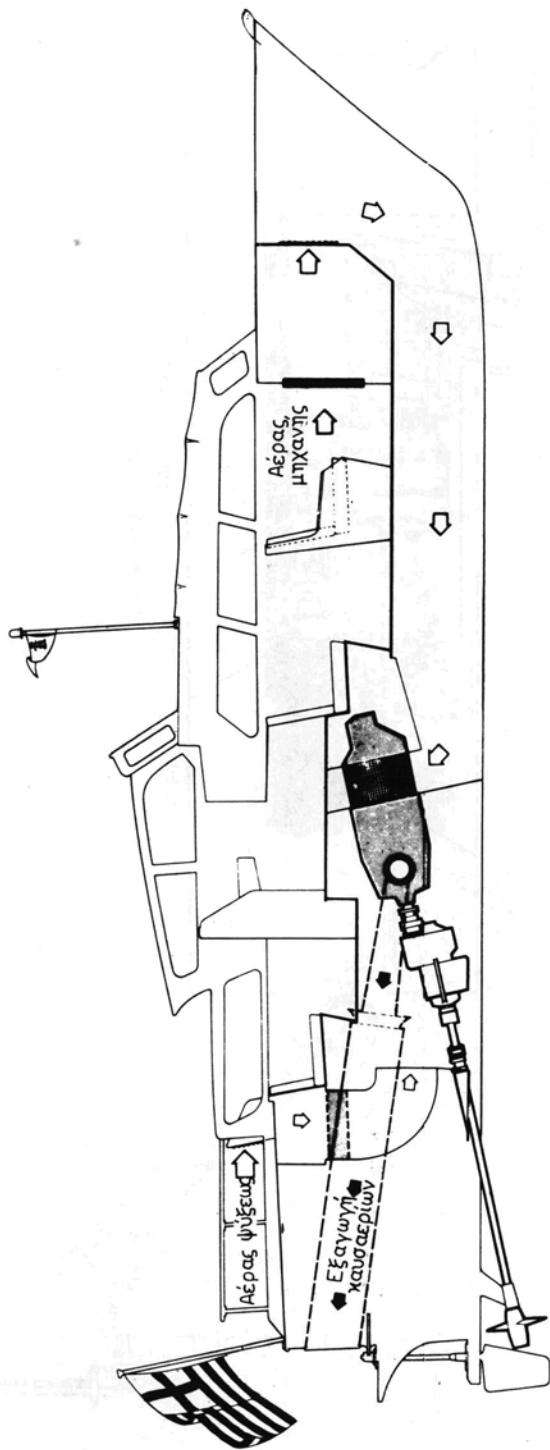
**Σχ. 1.5δ.**  
Συνδυασμός αεριοστροβίλου-ηλεκτροπροώσεως.



**Σχ. 1.5ε.**  
Μικρό σκάφος αναψυχής με αεριοστρόβιλο.



**Σχ. 1.5στ.**  
Εγκατάσταση προώσεως ταχύπλοου σκάφους.



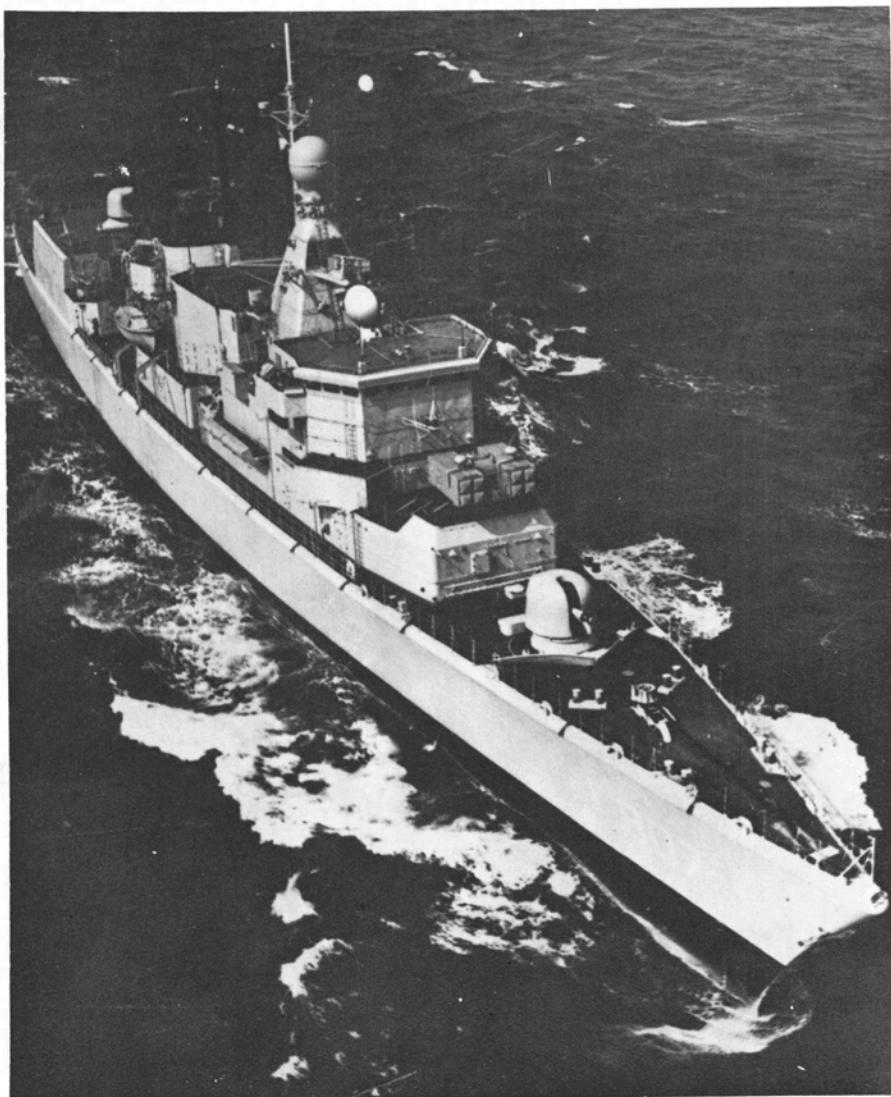
**Σχ. 1.5ζ.**  
Πειραιατικό πλοίο κινούμενο με αεριοστρόβιλο.

στούν ιδιαίτερα επίθυμητό για χρήση σε πολεμικά πλοία. Έτσι, έχουν χρησιμοποιηθεί αεριοστρόβιλοι ως μηχανές προώσεως από τα πολεμικά ναυτικά των περισσοτέρων χωρών του κόσμου. Η χρήση τους εκτείνεται από μικρά περιπολικά σκάφη, με εκτόπισμα λίγες δεκάδες τόνους, μέχρι και πολύ μεγαλύτερα, με εκτόπισμα χιλιάδες τόνους. Πρέπει ιδιαίτερα να σημειωθεί ότι πολλές φορές χρησιμοποιούνται αεριοστρόβιλοι σε συνδυασμό με μηχανές Diesel ή με μικρότερους αεριοστροβίλους, για να προσδώσουν στα πλοία μέγιστη ταχύτητα όταν απαιτείται (για τα συστήματα αυτά Codog, Cogag κλπ. βλ. κεφάλαιο έκτο). Χαρακτηριστικά παραδείγματα πολεμικών πλοίων που κινούνται με αεριοστροβίλους είναι η τορπιλλάκατος του πολεμικού Ναυτικού «Αστραπή», εκτοπίσματος 95 τόνων, μήκους 31 m και ταχύτητας 56 κόμβων που φαίνεται στο σχήμα 1.5η. Φέρει τρεις αεριοστροβίλους ισχύος 4350 HP ο καθένας και τρεις ελικοφόρους άξονες.



**Σχ. 1.5η.**  
Η τορπιλλάκατος «Αστραπή».

Τέλος, στο σχήμα 1.5θ φαίνεται η φρεγάτα του Πολεμικού Ναυτικού «Έλλη». Έχει εκτόπισμα 3500 τόνους, μήκος 128 m και ταχύτητα πάνω από 30 κόμβους. Φέρει 4 αεριοστροβίλους, από τους οποίους οι δύο, τύπου Olympus της Rolls-Royce, ισχύος 28.000 SHP ο καθένας, χρησιμοποιούνται σε υψηλές ταχύτητες πλού, ενώ οι άλλοι δύο, τύπου Tyne, έχουν ισχύ 4000 SHP ο καθένας και χρησιμοποιούνται σε χαμηλότερες ταχύτητες.



**Σχ. 1.50.**  
Η φρεγάτα «Έλλη».

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

### ΘΕΡΜΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ

Οι θερμικοί κύκλοι, ή ακριβέστερα η ανάλυσή τους, είναι η εφαρμογή του πρώτου και του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου στο θερμοδυναμικό μέσο (τέλειο αέριο, πραγματικό αέριο, νερό, άλλο ρευστό), το οποίο με σειρά διεργασιών εναλλάσσει τη θερμική με μηχανική ενέργεια. Οι θερμικοί κύκλοι, αν και αποτελούν αντικείμενο ιδιαίτερου μαθήματος της θερμοδυναμικής, εξετάζονται στο κεφάλαιο αυτό όπως εφαρμόζονται στους αεριοστροβίλους, όπου δηλαδή το θερμοδυναμικό μέσο είναι αέρας και καυσαέρια. Μετά από μία σειρά διεργασιών ο αέρας επανέρχεται στις αρχικές του συνθήκες, οπότε αφού υπολογισθούν το παραγόμενο έργο και η προσδιόδμενη θερμότητα, βρίσκομε το βαθμό θερμικής αποδόσεως του κύκλου και την απαιτούμενη ποσότητα του κυκλοφορούντος θερμοδυναμικού μέσου για την παραγωγή ορισμένης ισχύος. Η ανάλυση λοιπόν των θερμικών κύκλων μας παρέχει δύο «ενδεικτικές» τιμές:

α) Την ειδική κατανάλωση, δηλαδή την ποσότητα του καυσίμου που απαιτείται για να παραχθεί ισχύς ενός ωριαίου ίππου.

β) Την απαιτούμενη ποσότητα του μέσου, δηλαδή πόσος αέρας απαιτείται για να παραχθεί ισχύς ενός ωριαίου ίππου.

Η ειδική κατανάλωση είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό του κόστους του καυσίμου και της ποσότητας που πρέπει να μεταφέρει ένα πλοίο ενώ η ποσότητα του αέρα απαιτείται για τη σχεδίαση των οχετών προσαγωγής αέρα και εξαγωγής καυσαερίων.

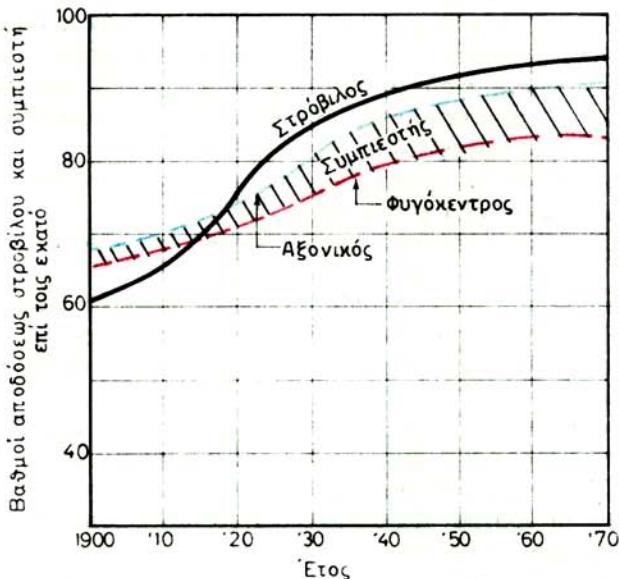
Όπως προαναφέρθηκε, οι τιμές είναι ενδεικτικές γιατί οι ακριβείς τιμές είναι κατά τι διαφορετικές από αυτές που δίνει η θερμοδυναμική ανάλυση των κύκλων. Ενώ δηλαδή η θερμοδυναμική ανάλυση θεωρεί αντιστρεπτές αλλαγές καταστάσεως του μέσου, οι πραγματικές αλλαγές καταστάσεως δέν είναι τελείως αντιστρεπτές. Αυτή είναι και η βασική διαφορά μεταξύ «ιδεατών» και «πραγματικών» θερμικών κύκλων. Στους πραγματικούς δηλαδή κύκλους λαμβάνονται υπ' όψη οι αναπόφευκτες απώλειες που συμβαίνουν στο συμπιεστή, θάλαμο καύσεως και στροβίλους. Είναι φανερό ότι οι πραγματικοί κύκλοι δίνουν πιο αληθινά αποτελέσματα από ότι οι θεωρητικοί, οι τελευταίοι όμως επιτρέπουν ταχύτερη εξαγωγή αποτελεσμάτων, διευκολύνουν τον παραμετρικό έλεγχο διαφόρων μεταβλητών και αποτελούν μία πρώτη προσέγγιση της πραγματικής καταστάσεως.

Ο σχεδιαστής μιας εγκαταστάσεως προώσεως ή ο συντηρητής - επισκευαστής της συνήθως δεν χρειάζεται να κάνει αναλύσεις των θερμικών κύκλων λειτουργίας των αεριοστροβίλων, γιατί όλες οι παράμετροι λειτουργίας τους είναι προκαθορισμένες από τον κατασκευαστή τους. Ο σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να γίνει

κατανοητό πως η μεταβολή των διαφόρων παραμέτρων λειτουργίας επηρεάζει τα αντικείμενα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος του χειριστή, όπως είναι η ειδική κατανάλωση και η κατανάλωση αέρα.

## 2.1 Παράμετρος λειτουργίας αεριοστροβίλων.

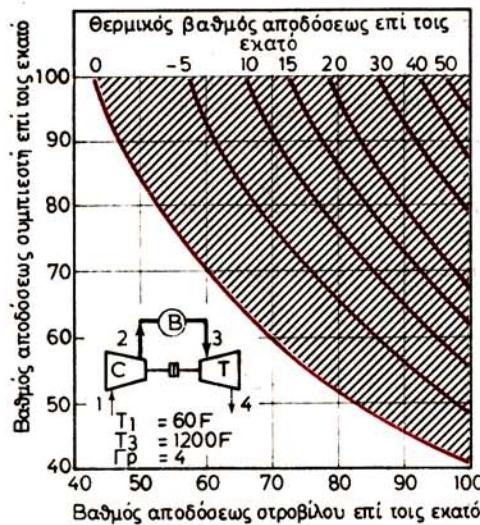
Ο πιο γνωστός τρόπος παραγωγής μηχανικού έργου από ένα θερμαινόμενο ρευστό είναι με την εκτόνωσή του από ένα επίπεδο υψηλοτέρων πιέσεων και θερμοκρασιών σε ένα άλλο χαμηλοτέρων. Για να επιτευχθεί όμως αυτό σε ένα αεριοστρόβιλο, απαιτείται η πρόσδοση καυσίμου, το οποίο όχι μόνο αυξάνει την ενέργεια του εργαζόμενου μέσου, αλλά αντισταθμίζει και τις αναπόφευκτες απώλειες ακτινοβολίας, διαφυγών, πτώσεως πιέσεων κλπ. Συγχρόνως είναι επιθυμητό η κατανάλωση του καυσίμου να παραμένει η ελάχιστη απαραίτητη. Για το σκοπό αυτό οι χρησιμοποιούμενοι συμπιεστές και στρόβιλοι πρέπει να έχουν μεγάλο βαθμό αποδόσεως. Οι βαθμοί αποδόσεως των χρησιμοποιουμένων σήμερα μηχανημάτων βρίσκονται γύρω στο 90%, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1α που παρουσιάζει τη βελτίωση του βαθμού αποδόσεως με την πάροδο του χρόνου.



Σχ. 2.1α.

Βελτίωση του βαθμού αποδόσεως στροβίλου και συμπιεστή.

Στο σχήμα 2.1β φαίνεται ο βαθμός αποδόσεως του θερμικού κύκλου ανοικτού κυκλώματος αεριοστροβίλου σε συνάρτηση με τους βαθμούς αποδόσεως του στροβίλου και του συμπιεστή. Έτσι, για βαθμό αποδόσεως στροβίλου  $\eta_T = 0,9$  και συμπιεστή  $\eta_c = 0,8$  ο θερμικός βαθμός αποδόσεως του κύκλου είναι  $\eta_{TH} = 0,2$ , ενώ, όταν οι αντίστοιχοι βαθμοί αποδόσεως στροβίλου και συμπιεστή γίνονται  $\eta_T = \eta_c = 0,95$ , ο βαθμός αποδόσεως του κύκλου γίνεται  $\eta_{TH} = 0,4$  δηλαδή, διπλασιάζεται. Από το παράδειγμα αυτό φαίνεται πώς για μικρές βελτιώσεις των

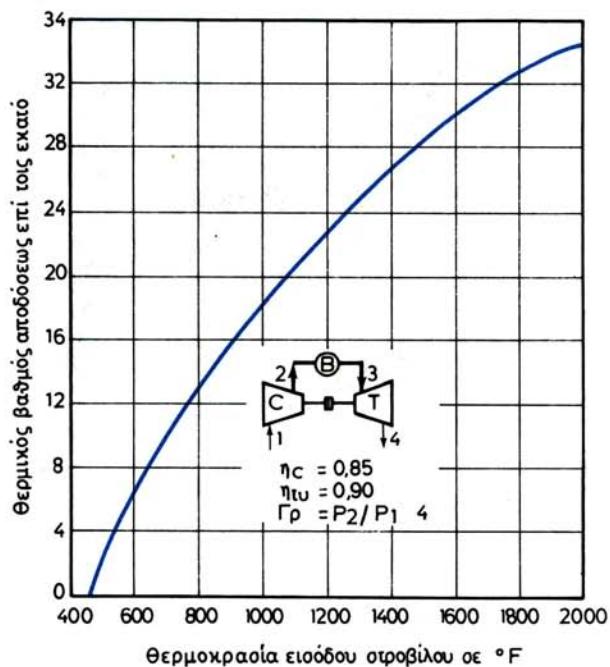


Σχ. 2.1β.

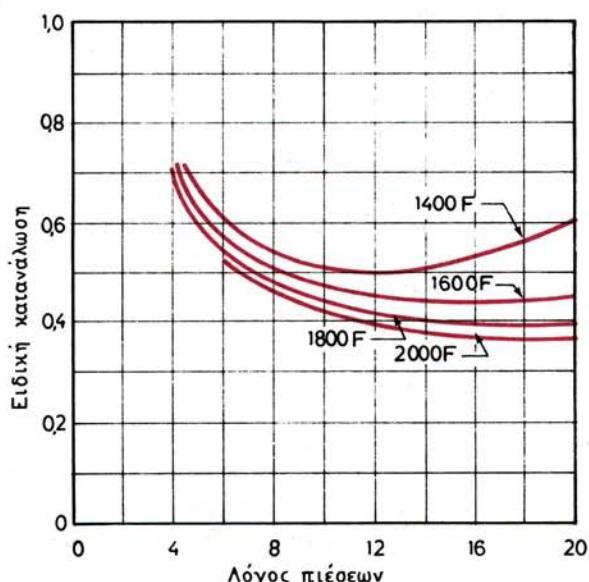
Επίδραση του βαθμού αποδόσεως στροβίλου και συμπιεστή στο θερμικό βαθμό αποδόσεως του κύκλου.

Βαθμών αποδόσεως των επί μέρους μηχανημάτων επιτυγχάνομε μεγάλη βελτίωση του βαθμού αποδόσεως του θερμικού κύκλου. Επειδή όμως τα περιθώρια βελτιώσεως των μηχανημάτων έχουν πρακτικά εξαντληθεί, ο κυριότερος τρόπος βελτιώσεως του θερμικού βαθμού αποδόσεως είναι με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του στροφίλου. Αυτή όμως περιορίζεται από την αδυναμία των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των στροβίλων να αντέξουν στα υψηλά φορτία που δημιουργούνται από τις θερμικές καταπονήσεις σε συνδυασμό με τον υψηλό αριθμό στροφών. Οι πρόσφατες εξελίξεις της μεταλλουργίας έχουν επιτρέψει σημαντικές αυξήσεις της θερμοκρασίας εισόδου  $T_3$  των καυσαερίων στο στρόβιλο και η τάση της σύγχρονης έρευνας είναι προσανατολισμένη προς την κατεύθυνση αυτή. Στο σχήμα 2.1 γ φαίνεται η σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας  $T_3$  και του ολικού θερμικού βαθμού αποδόσεως, ενώ στο σχήμα 2.1δ φαίνεται η ειδική κατανάλωση σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία  $T_3$  και με το λόγο πιέσεως  $R = P_2/P_1$  ή  $P_3/P_4$ . Είναι φανερό ότι η ειδική κατανάλωση ελαττώνεται για μεγαλύτερες τιμές της  $T_3$  για κάθε τιμή του  $R$ , και ότι για δεδομένη τιμή της  $T_3$  υπάρχει μια «βέλτιστη» (optimum) τιμή του  $R$  που αντιστοιχεί στη μικρότερη ειδική κατανάλωση.

Εκτός όμως από τη μεταβολή των δύο αυτών παραμέτρων, δηλαδή της  $T_3$  και του  $R$ , οι σχεδιαστές των μηχανών έχουν προσπαθήσει να αυξήσουν το βαθμό αποδόσεως του κύκλου με τη βοήθεια συσκευών ανακτήσεως θερμότητας ή άλλων διατάξεων που καθιστούν όμως την εγκατάσταση περισσότερο πολύπλοκη. Ένας από τους τρόπους αυξήσεως του θερμικού βαθμού αποδόσεως είναι με ελάττωση του καυσίμου που απαιτείται για να φθάσει το θερμοδυναμικό μέσο στη θερμοκρασία  $T_3$ . Αυτό επιτυγχάνεται με προθέρμανση του μέσου μετά την έξοδό του από το συμπιεστή και πριν εισέλθει στο θάλαμο καύσεως. Η προθέρμανση γίνεται στον «αναγεννητήρα» (regenerator) που είναι ένας εναλλάκτης ανακτήσεως



Επίδραση της θερμοκρασίας εισόδου καυσαερών στο στρόβιλο  $T_3$  επάνω στο θερμικό βαθμό αποδόσεως του κύκλου.



Η ειδική κατανάλωση σάν συνάρτηση του λόγου πιέσεων.

Θερμότητας, ο οποίος εκμεταλλεύεται τη θερμότητα των καυσαερίων όπως εξέρχονται από το στρόβιλο.

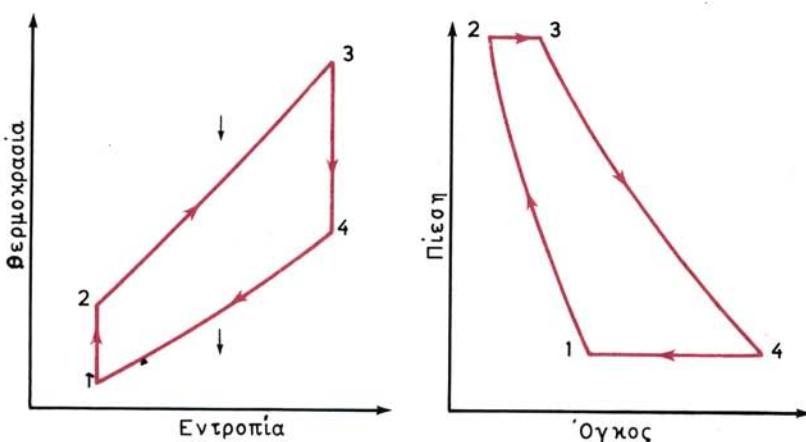
Άλλος τρόπος αυξήσεως του θερμικού βαθμού αποδόσεως είναι με τη μέθοδο της «ενδιάμεσης ψύξεως» (intercooling) που στην πράξη συνίσταται στην ελάττωση του καταναλισκόμενου από το συμπιεστή έργου για να αυξηθεί η πίεση του θερμοδυναμικού μέσου (αέρα). Η ελάττωση αυτή του έργου του συμπιεστή επιτυγχάνεται με ψύξη του αέρα και έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση του ολικού βαθμού αποδόσεως.

Κατά αντίστροφο προς τον προηγούμενο τρόπο αυξάνει το παραγόμενο από το στρόβιλο έργο με την υποδιαίρεση της εκτονώσεως σ' αυτόν του θερμοδυναμικού μέσου και ενδιάμεσης αναθερμάνσεώς του. Με την αναθέρμανση του μέσου μέχρι τη μέγιστη επιτρεπόμενη οριακή θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο, επιτυγχάνεται η εκτόνωση από υψηλότερη στάθμη ενέργειας και συνεπώς η αύξηση του παραγόμενου από το στρόβιλο έργου. Η πρακτική σημασία της ενδιάμεσης ψύξεως αυξάνει, όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τη μέθοδο ανακτήσεως θερμότητας (regenerator).

## 2.2 Απλός κύκλος λειτουργίας αεριοστροβίλων.

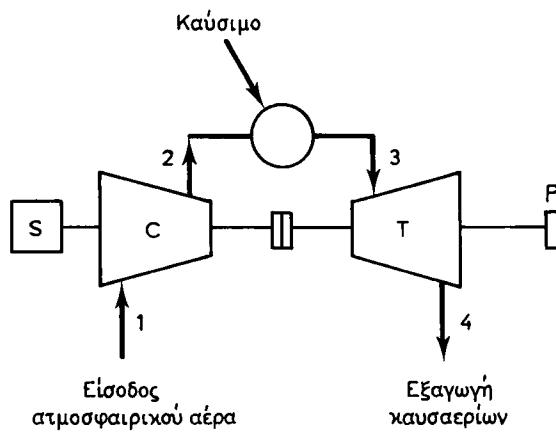
Ο απλός κύκλος λειτουργίας των αεριοστροβίλων αποτελείται από τέσσερις φάσεις: συμπίεση, πρόσδοση θερμότητας, παραγωγή έργου και ψύξη. Η ιδεατή μορφή του κύκλου είναι γνωστή ως κύκλος του Brayton ή του Joules και φαίνεται στο σχήμα 2.2α σε συντεταγμένες πιέσεως - όγκου (P - V) και θερμοκρασίας - εντροπίας (T-S). Οι τέσσερις φάσεις του κύκλου είναι:

- Φάση (1-2): Αντιστρεπτή αδιαβατική (ισεντροπική) συμπίεση.
  - Φάση (2-3): Πρόσδοση θερμότητας υπό σταθερή πίεση.
  - Φάση (3-4): Αντιστρεπτή αδιαβατική εκτόνωση.
  - Φάση (4-1): Ψύξη υπό σταθερή πίεση μέχρι της αρχικής καταστάσεως.
- Στην πράξη η ψύξη υπό σταθερή πίεση (4-1) επιτυγχάνεται είτε με ένα εναλλά-



Σχ. 2.2α.

Απλός κύκλος λειτουργίας αεριοστροβίλων.



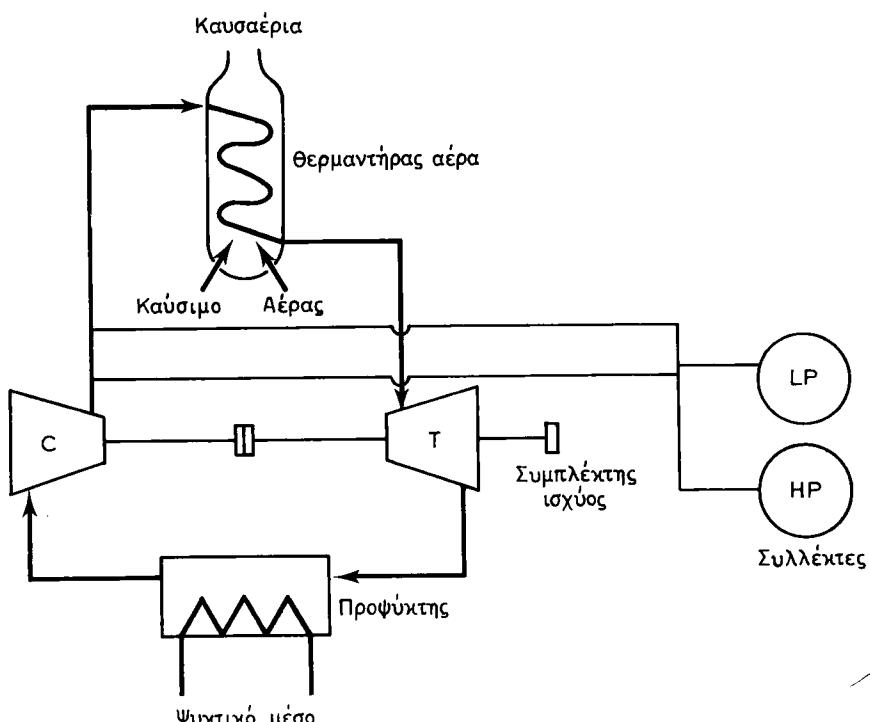
$C = \Sigma \text{υμπιεστής}$

$B = \text{θάλαμος καύσεως$

$T = \Sigma \text{τρόβιλος}$

$P = \Sigma \text{υμπλέκτης ισχύος}$

$S = \Sigma \text{κινητής}$



**Σχ. 2.2β.**  
Ανοικτός και κλειστός απλός κύκλος.

κτη θερμότητας ως το κύριο ψυγείο των εγκαταστάσεων ατμού είτε με εξαγωγή των καυσαερίων στην ατμόσφαιρα και συνεχή αντικατάστασή τους με νέο αέρα συνθηκών περιβάλλοντος. Στην πρώτη περίπτωση (εναλλάκτης) έχουμε το λεγόμενο «κλειστό κύκλο» λειτουργίας, ενώ στη δεύτερη τον «ανοικτό κύκλο», ο οποίος και χρησιμοποιείται αποκλειστικά σ' όλες τις σύγχρονες εγκαταστάσεις. Διαγραμματικά, οι δύο κύκλοι φαίνονται στο σχήμα 2.2β. Ο κλειστός κύκλος είναι απαραίτητο να χρησιμοποιείται μόνο όταν η πηγή θερμάνσεως είναι πυρηνικός αντιδραστήρας, οπότε για λόγους αποφυγής μολύνσεως του περιβάλλοντος με ραδιενέργο υλικό, επανακυκλοφορεί συνεχώς το ίδιο μέσον σε κλειστό κύκλωμα. Βέβαια, ο τρόπος προσδόσεως θερμότητας ή ψύξεως στον κύκλο δεν έχει καμιά επίπτωση στην ανάλυσή του.

Είναι γνωστό ότι εξ ορισμού βαθμός αποδόσεως ενός θερμικού κύκλου ονομάζεται ο λόγος του αφέλιμου έργου προς την προσδιόδμενη θερμότητα.

Λέγοντας αφέλιμο ή καθαρό έργο εννοούμε τη διαφορά των παραγομένων έργων κατά τις φάσεις της εκτονώσεως (3-4) και συμπιέσεως (1-2), επειδή στη μεν φάση (3-4) παράγεται έργο απολαμβανόμενο (αφέλιμο) από το θερμοδυναμικό μέσον, ενώ στη φάση (1-2) προσδίνεται έργο στο θερμοδυναμικό μέσο το οποίο αποτελεί βέβαια απώλεια.

Τόσο το έργο όσο και η θερμότητα υπολογίζονται ως διαφορές ενθαλπίας που έχει η μονάδα βάρους του θερμοδυναμικού μέσου μεταξύ των ακραίων σημείων της κάθε φάσεως, δηλαδή σε BTU (British Thermal Unit) ανά λίμπρα (lb) αέρα ή θερμίδα (Calorie) ανά χιλιόγραμμο (kg) αέρα. Έτσι έχουμε τις σχέσεις:

$$\omega_n = (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)$$

$$Q_A = h_3 - h_2$$

και 
$$\eta = \frac{\omega_n}{Q_A} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2} \quad (2.1)$$

όπου:  $h$  = ενθαλπία σε BTU/lb (ή cal/kg),

$\omega_n$  = καθαρό ή αφέλιμο έργο σε BTU/lb (cal/kg),

$Q_A$  = προσδιόδμενη θερμότητα σε BTU/lb (cal/kg) και

$\eta$  = βαθμός αποδόσεως.

Η ποσότητα του απαιτούμενου αέρα σε λίμπρες μάζας για την παραγωγή ενός ωριαίου ίππου δίνεται από τη σχέση:

$$\omega_A = \frac{2544}{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)} = \frac{2544}{\omega_n} \quad \text{lb/HP.hr} \quad (2.2)$$

Ο αριθμός 2544 είναι ο συντελεστής μετατροπής BTU σε ωριαίους ίππους. Άν είναι γνωστή η θερμαντική ικανότητα του χρησιμοποιούμενου καυσίμου  $Q_F$ , τότε με συνδυασμό των ανωτέρω σχέσεων προκύπτει η απαιτούμενη ποσότητα καυσίμου για την παραγωγή ενός ωριαίου ίππου ή αλλιώς «ειδική κατανάλωση» από τη σχέση:

$$\omega_F = \frac{2544}{Q_F} \quad (2.3)$$

Δεχόμαστε στη συνέχεια ότι το θερμοδυναμικό μέσον του αεριοστροβίλου, δηλαδή ο ατμοσφαιρικός αέρας, συμπεριφέρεται ως τέλειο αέριο\* από τη σχέση:

$$h = C_p T$$

όπου:  $h$  = ενθαλπία,

$C_p$  = ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση και  
 $T$  = απόλυτη θερμοκρασία.

Αντικαθιστώντας τις τιμές της ενθαλπίας στη σχέση (2.1) καταλήγομε στην έκφραση τού βαθμού αποδόσεως σε συνάρτηση με τις θερμοκρασίες, δηλαδή:

$$n = \frac{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)}{(T_3 - T_2)} \quad (2.4)$$

Ο βαθμός αποδόσεως μπορεί να εκφρασθεί επίσης σε συνάρτηση με το λόγο πιέσεων  $R$  όπου:

$$R = \frac{P_2}{P_1} \quad \text{ή} \quad R = \frac{P_3}{P_4}$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση θερμοκρασίας - πιέσεως σε μια ισεντροπική αλλαγή, δηλαδή:

$$T \text{ ανάλογο } R^{(k-1)/k}$$

και τη σχέση θερμοκρασίας - πιέσεως σε αλλαγή καταστάσεως υπό σταθερή πίεση, δηλαδή:

$$T \text{ ανάλογο } V$$

όπου:  $R$  = λόγος πιέσεων,

$k$  = λόγος ειδικών θερμοτήτων  $C_p/C_v$ ,

$C_p$  = ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση,

$C_v$  = ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο,

$U$  = ειδικός όγκος σέ κυβικά πόδια ανά λίμπρα ( $ft^3/lb$ ) και

$T$  = απόλυτη θερμοκρασία.

Αντικαθιστώντας στη σχέση (2.4) όλες τις θερμοκρασίες σε συνάρτηση της  $T_2$  έχουμε:

$$T_1 = T_2 R^{(1-k)/k}$$

$$T_3 = T_2 \frac{U_3}{U_2}$$

$$T_4 = T_3 R^{(1-k)/k} = T_2 \left( \frac{U_3}{U_2} \right) R^{(1-k)/k}$$

\* Πέρα από την παραδοχή του θερμοδυναμικού μέσου ως τέλειου αερίου, γίνονται και μερικές άλλες παραδοχές, όπως π.χ. ότι δεν υφίσταται πιώση πιέσεως στις φάσεις (2-3) και (4-1), ότι η κινητική ενέργεια είναι μικρή συγκρινόμενη πρός την ενθαλπία, ότι οι αλλαγές καταστάσεως είναι αντιστρεπτές κλπ.

και

$$n = 1 - R^{(1-k)/k} \quad (2.5)$$

Όλα τα παραπάνω ισχύουν όταν πρόκειται για ιδεατό κύκλο λειτουργίας, όπου οι μεταβολές καταστάσεως (εκτός των άλλων παραδοχών που προαναφέρθηκαν) θεωρούνται αντιστρεπτές και ισεντροπικές, οπότε οι μηχανικοί βαθμοί αποδόσεως τόσο του συμπιεστή όσο και του στροβίλου είναι 100%. Στην πραγματικότητα όμως, λόγω των αναποφεύκτων τριβών του ρευστού, οι μεταβολές καταστάσεως δεν είναι αντιστρεπτές και οι μηχανικοί βαθμοί αποδόσεως του συμπιεστή και του στροβίλου είναι μικρότεροι. Οι πραγματικοί απλοί κύκλοι λειτουργίας των αεροστροβίλων φαίνονται στο σχήμα 2.2γ σε διάγραμμα (T - S) και (P - V) όπου ιδιαίτερα σημειώνονται η απόκλιση των φάσεων συμπιέσεως και εκτονώσεως από την κατακόρυφη, ένδειξη ότι οι φάσεις αυτές δεν είναι πια ισεντροπικές και αντιστρεπτές.

Ως πραγματικός βαθμός αποδόσεως του συμπιεστή ορίζεται ο λόγος του απαιτούμενου για ιδεατή αδιαβατική (ισεντροπική) συμπίεση του αέρα έργου προς το πραγματικά απαιτούμενο έργο από το συμπιεστή (για τον ίδιο λόγο συμπιέσεως R), δηλαδή:

$$\eta_c = \frac{\text{ισεντροπικό έργο συμπιεστή}}{\text{πραγματικό έργο συμπιεστή}} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2'} - h_1}$$

Κατά ανάλογο τρόπο ορίζομε ως πραγματικό βαθμό αποδόσεως του στροβίλου το λόγο του πραγματικά απολαμβανόμενου έργου προς το παραγόμενο κατά την ιδεατή αδιαβατική εκτόνωση (για τον ίδιο λόγο εκτονώσεως R), δηλαδή:

$$\eta_T = \frac{\text{πραγματικό έργο στροβίλου}}{\text{ισεντροπικό έργο στροβίλου}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_4'}$$

Στον πραγματικό κύκλο η παρεχόμενη θερμότητα είναι:

$$Q_A = h_3 - h_2'$$

και επομένως ο θερμικός βαθμός αποδόσεως του πραγματικου κύκλου δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_{TH} = \frac{(h_3 - h_4') - (h_2' - h_1)}{h_3 - h_2'} \quad (2.6)$$

### 2.2.1 Διαφορές μεταξύ ιδεατού και πραγματικού απλού κύκλου λειτουργίας αεροστροβίλων.

Από τη σχέση (2.5) βλέπομε ότι ο βαθμός αποδόσεως ενός ιδεατού απλού κύκλου λειτουργίας εξαρτάται μόνο από το βαθμό συμπιέσεως R, δεδομένου ότι η τιμή του k = 1,4 παραμένει σταθερή για τα τέλεια αέρια.

Προκειμένου για πραγματικούς κύκλους, ο βαθμός αποδόσεώς τους εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

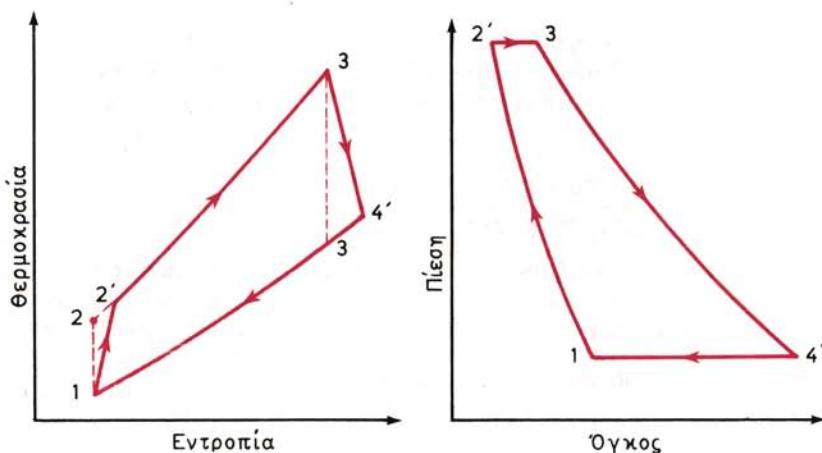
- Λόγο συμπιέσεως R.
- Βαθμό αποδόσεως του στροβίλου η<sub>T</sub>.
- Θερμοκρασία εισόδου καυσαερίων T<sub>3</sub>.
- Βαθμό αποδόσεως του συμπιεστή η<sub>C</sub>

- Θερμοκρασία εισόδου του αέρα στο συμπιεστή (Θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_1$ ).

Τα σχήματα 2.1γ και 2.1δ παρουσιάζουν τη σχέση μεταξύ βαθμών αποδόσεως του κύκλου και θερμοκρασίας  $T_3$  και τη σχέση ειδικής καταναλώσεως και του λόγου συμπιέσεως  $R$ . Ανάλογο είναι και το σχήμα 2.2δ που παρουσιάζει το θερμικό βαθμό αποδόσεως του απλού κύκλου αεριοστροβίλων σε συνάρτηση με το βαθμό συμπιέσεως  $R = P_2/P_1$ , ενώ συγχρόνως μεταβάλλεται παραμετρικά η θερμοκρασία  $T_3$ . Τα γενικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τα σχήματα είναι:

α) Ο βαθμός αποδόσεως του κύκλου αυξάνει με υψηλότερες θερμοκρασίες εισόδου στο στρόβιλο  $T_3$ .

β) Ο βαθμός αποδόσεως του κύκλου για δεδομένη θερμοκρασία  $T_3$  παίρνει τη μέγιστη τιμή του για ορισμένη τιμή (optimum) του λόγου συμπιέσεως  $R$ .

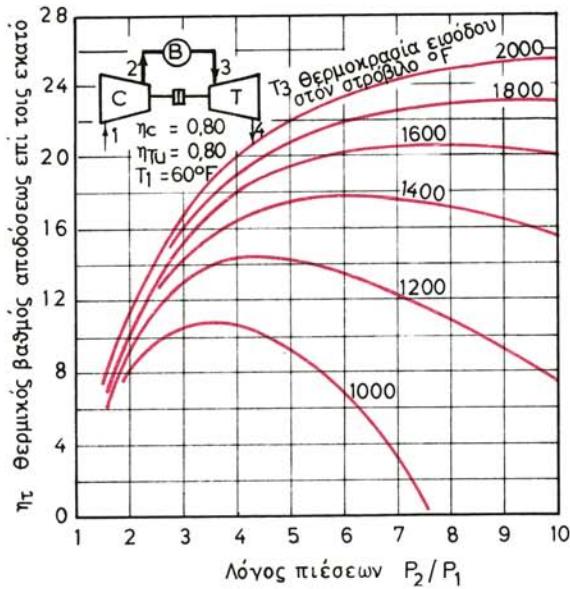


**Σχ. 2.2γ.**  
Πραγματικός απλός κύκλος λειτουργίας αεριοστροβίλων.

Στα σχήματα 2.1β και 2.2ε παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ του θερμικού βαθμού αποδόσεως του απλού κύκλου εγκαταστάσεως αεριοστροβίλου και του μηχανικού βαθμού αποδόσεως του στροβίλου και του συμπιεστή. Η διακεκομένη γραμμή του σχήματος 2.2ε αφορά ιδεατή λειτουργία στροβίλου και συμπιεστή. Όπως φαίνεται από τις λοιπές καμπύλες του σχήματος, για τιμή μηχανικού βαθμού αποδόσεως υπάρχει μια βέλτιστη τιμή του λόγου συμπιέσεως  $R$  που μεγιστοποιεί το θερμικό βαθμό αποδόσεως του κύκλου.

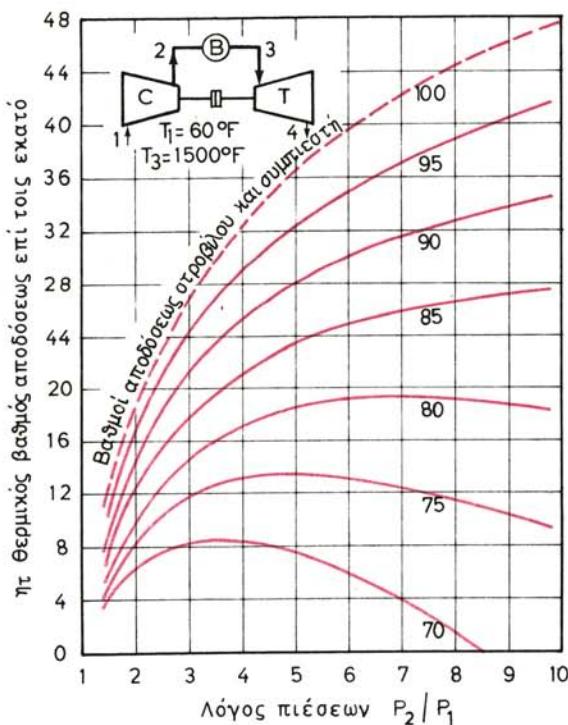
Τέλος, στο σχήμα 2.2στ φαίνεται η μεταβολή του θερμικού βαθμού αποδόσεως του κύκλου με παράμετρο τη θερμοκρασία εισόδου αέρα στο συμπιεστή ( $T_1$ ) ή θερμοκρασία περιβάλλοντος. Παρατηρούμε ότι όταν έλαττώνεται η θερμοκρασία  $T_1$ :

- Αυξάνει ο θερμικός βαθμός αποδόσεως.
- Το μέγιστο του θερμικού βαθμού αποδόσεως παρουσιάζεται σε υψηλότερη τιμή του λόγου συμπιέσεως.
- Ο θερμικός βαθμός αποδόσεως διατηρεί μέγιστη τιμή σε ευρύτερη περιοχή μεταβολής του βαθμού συμπιέσεως.



Σχ. 2.26.

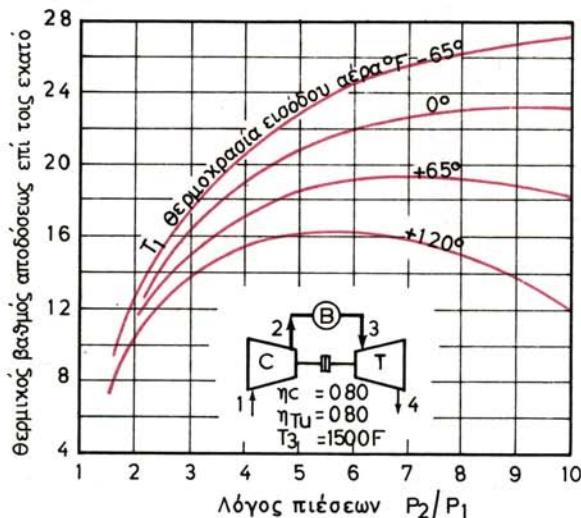
Επίδραση της θερμοκρασίας εισόδου καυσαερίων στο στρόβιλο  $T_3$  επάνω στο θερμικό βαθμό αποδόσεως του κύκλου.



Σχ. 2.2ε.

Σχέση βαθμών αποδόσεως συμπιεστή, στροβίλου και θερμικού βαθμού αποδόσεως του κύκλου.

Όπως φαίνεται από τις καμπύλες, η μεταβολή του θερμικού βαθμού αποδόσεως είναι πολύ μεγάλη, ανάλογα με τις θερμοκρασιακές συνθήκες περιβάλλοντος και ευνοείται ιδιαίτερα κατά τη λειτουργία σε ψυχρά κλίματα ή κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου.

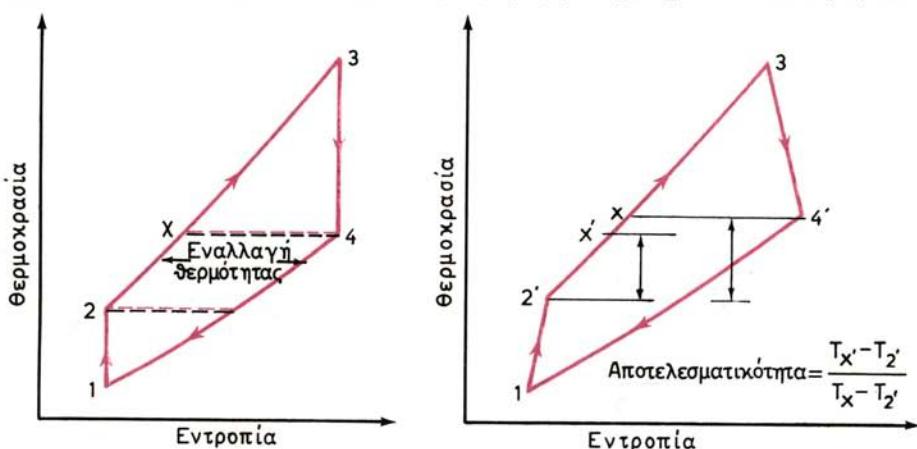


Σχ. 2.2στ.

Επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στο θερμικό βαθμό αποδόσεως του κύκλου.

### 2.2.2 Συσκευές ανακτήσεως θερμότητας (αναγεννητήρες).

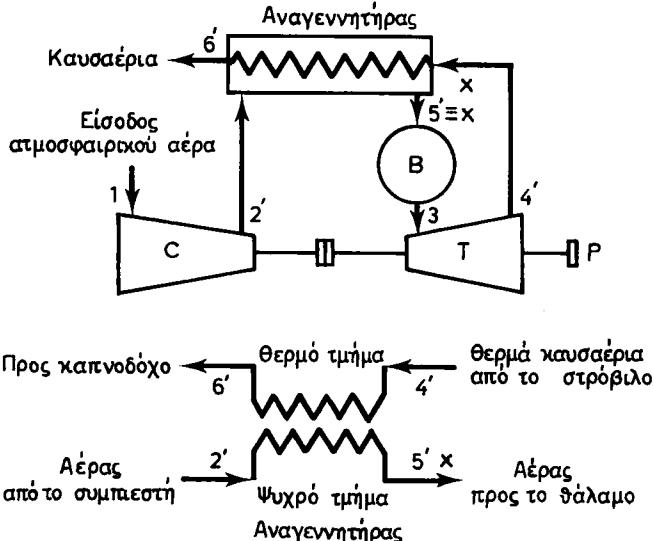
Ο θερμικός βαθμός αποδόσεως του απλού κύκλου αεριοστροβίλων βελτιώνεται όταν αξιοποιηθεί η εμπεριεχόμενη στα εξερχόμενα καυσαέρια ενέργεια με τη βοήθεια συσκευής ανακτήσεως θερμότητας. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2ζ η θερμοκρασία των καυσαερίων κατά την εξαγωγή τους (σημείο 4') είναι μεγαλύτε-



Σχ. 2.2ζ.

Κύκλος με ανάκτηση θερμότητας.

ρη από τη θερμοκρασία του αέρα μετά το συμπιεστή (σημείο 2') και επομένως είναι δυνατή η μετάδοση θερμότητας από το ρευστό της υψηλότερης θερμοκρασίας προς το ρευστό της χαμηλότερης. Η μετάδοση γίνεται με την προσθήκη ενός εναλλάκτη θερμότητας ή αναγεννητήρα στο κύκλωμα του αεριοστροβίλου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2η. Έτσι τα υψηλής θερμοκρασίας καυσαέρια αυξάνουν τη θερμοκρασία του καυσιγόνου αέρα πριν εισέλθει στο θάλαμο καύσεως και συνεπώς απαιτείται λιγότερη ποσότητα καυσίμου για να φθάσει ο αέρας τη θερμοκρασία  $T_3$ .



Σχ. 2.2η.  
Κύκλωμα αεριοστροβίλου με αναγεννητήρα.

Είναι φανερό ότι από την παρουσία του αναγεννητήρα δεν επηρεάζεται ο συμπιεστής ή ο στρόβιλος και συνεπώς ούτε το παραγόμενο έργο, αλλά ελαττώνεται η προσδινόμενη θερμότητα  $Q_d$  και, όπως αμέσως συνάγεται από τη σχέση (2.1), αυξάνει ο θερμικός βαθμός αποδόσεως του κύκλου. Πρέπει δημοσίευση σημειώσουν και τα ακόλουθα:

α) Ο αναγεννητήρας απαιτεί προσεκτική σχεδίαση και κατασκευή, ώστε η πτώση πιέσεως του αέρα καθώς διέρχεται μέσα από αυτόν να είναι μικρή. Διαφορετικά, κανένα πρακτικό όφελος δε προκύπτει.

β) Η εγκατάσταση του αεριοστροβίλου με αναγεννητήρα γίνεται πιο σύνθετη, αυξάνει το βάρος και ο όγκος της και απαιτεί μεγαλύτερη συντήρηση.

γ) Ουσιαστική αύξηση του θερμικού βαθμού αποδόσεως προκύπτει όταν η θερμοκρασία  $T_4'$  είναι αρκετά υψηλότερη της  $T_2'$  του θερμικού κύκλου.

Ας εξετάσουμε πώς διαμορφώνονται οι σχέσεις που δίνουν το θερμικό βαθμό αποδόσεως του κύκλου με την προσθήκη αναγεννητήρα. Στην περίπτωση του ιδεατού θερμικού κύκλου, η προσδινόμενη θερμότητα είναι  $h_3 - h_x$  ή  $C_p(T_3 - T_x)$  και επειδή υποτίθενται ιδεατές συνθήκες  $h_x = h_4$  ή  $T_x = T_4$  η σχέση (2.1) γίνεται:

$$\eta_{TH} = 1 - \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_4} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4} \quad (2.7)$$

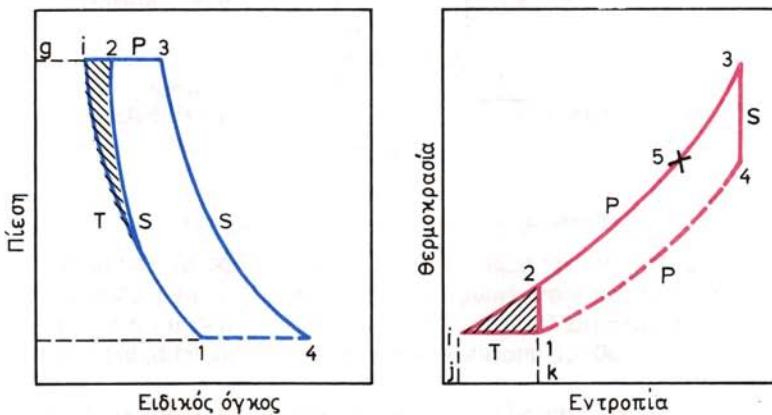
Στην περίπτωση του πραγματικού θερμικού κύκλου λαμβάνεται υπ' όψη, εκτός από το θερμικό βαθμό αποδόσεως στροβίλου και συμπιεστή και ο βαθμός αποτελεσματικότητας του αναγεννητήρα (effectiveness), δηλαδή ο λόγος της πραγματικά μεταδιδόμενης θερμότητας προς τη διατιθέμενη για μετάδοση. Ο βαθμός αποδόσεως είναι:

$$\eta_{TH} = \frac{(T_3 - T_4') - (T_2 - T_1)}{(T_3 - T_{x'})}$$

### 2.2.3 Ενδιάμεση ψύξη (Intercooling).

Όπως ήδη προαναφέρθηκε, το έργο που δαπανάται από το συμπιεστή για την αύξηση της πιέσεως του αέρα είναι αρνητικό, δηλαδή απώλεια και συνεπώς επιδιώκεται η ελάττωσή του. Τούτο θεωρητικά μπορεί να επιτευχθεί, αν η ισεντροπική συμπίεση (Φάση 1-2) αντικατασταθεί με ισόθερμη συμπίεση (Φάση 1-i).

Στο σχήμα 2.2θ φαίνεται η επίδραση αυτής της αντικαταστάσεως στο θερμικό κύκλο του αεριοστροβίλου. Στο διάγραμμα πιέσεως-όγκου (P-V) η ελάττωση του έργου του συμπιεστή αντιπροσωπεύεται από τη σκιαγραμμισμένη επιφάνεια, ενώ το «καθαρό» (ωφέλιμο) έργο περικλείεται από τα ακραία σημεία των διαφόρων φάσεων, δηλαδή (1i2341) για την ισόθερμη και (1234) για την ισεντροπική αλλαγή.



Σχ. 2.2θ.  
Θερμικός κύκλος με ενδιάμεσο ψύξη.

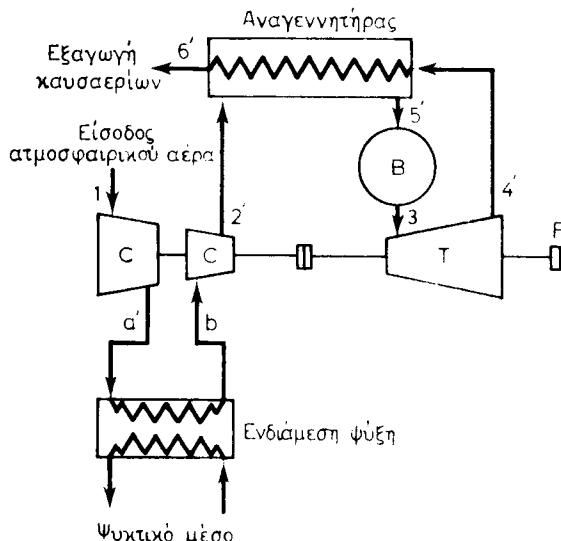
Από το διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-S) όμως διαπιστώνομε ότι το ποσό της απαιτούμενης θερμότητας για να φθάσει το εργαζόμενο θερμοδυναμικό μέσο στο σημείο 3 είναι μεγαλύτερο για την περίπτωση της ισόθερμης αλλαγής (3-i) απ' ότι της ισεντροπικής (3-2).

Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι η αύξηση του θερμικού βαθμού αποδόσεως που προκύπτει από την αύξηση του παρεχόμενου ωφέλιμου έργου αντισταθμίζεται από την ελάττωση του τελευταίου λόγω της ανάγκης μεγαλύτερης προσδόσεως θερμότητας.

Ο συνδυασμός ισόθερμης συμπιέσεως και τοποθετήσεως συγχρόνως και αναγεννητήρα, εξασφαλίζει ότι η μεγαλύτερη πρόσδοση θερμότητας θα προέλθει από τα διαφεύγοντα στην ατμόσφαιρα καυσαέρια και όχι με πρόσθετη καυσιγόνο ύλη,

οπότε τελικά προκύπτει αυξημένος θερμικός βαθμός αποδόσεως, λόγω μεγαλύτερου αφέλιμου έργου.

Επειδή η πρακτική εφαρμογή της ισόθερμης συμπίεσεως είναι δύσκολη, αντί αυτής εφαρμόζεται συμπίεση του αέρα σε περισσότερες βαθμίδες με ενδιάμεση ψύξη, διαδικασία η οποία μοιάζει τόσο πιο πολύ με την ισόθερμη συμπίεση, όσο αυξάνει ο αριθμός των βαθμίδων. Στο σχήμα 2.2ι φαίνεται σχηματική διάταξη εγκαταστάσεως αεριοστροβίλου ανοικτού κυκλώματος με ενδιάμεση ψύξη και αναγεννητήρα.



**Σχ. 2.2ι.**

Κύκλωμα αεριοστροβίλου με αναγεννητήρα και ενδιάμεση ψύξη.

Εξετάζοντας σε διάγραμμα ενθαλπίας-θερμοκρασίας (T-S) την προηγούμενη εγκατάσταση, έχομε το σχήμα 2.2ια. Χρησιμοποιώντας τους συμβολισμούς του σχήματος 2.2ια παίρνομε:

Έργο καταναλισκόμενο από το συμπιεστή  $W_C = (h_a' - h_1) + (h_2' - h_b)$

Το έργο του συμπιεστή εξαρτάται και από την αποτελεσματικότητα (effectiveness) του εναλλάκτη ενδιάμεσης ψύξεως.

Έργο παραγόμενο από το στρόβιλο:

$$W_T = h_3 - h_4'$$

Προσδιδόμενη θερμότητα:

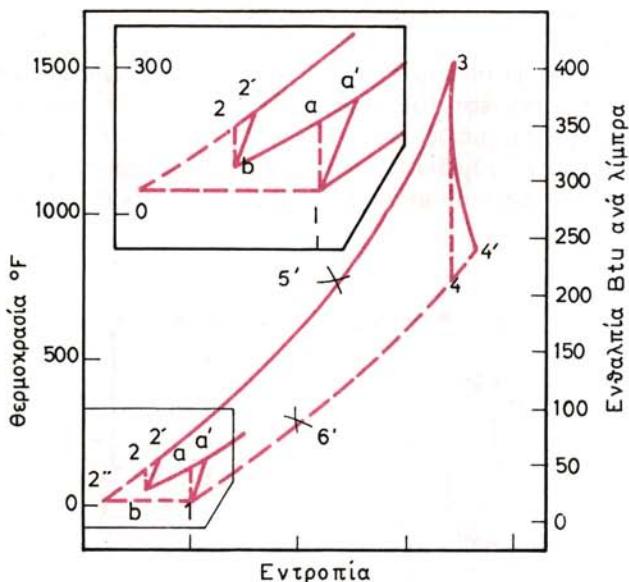
$$Q_A = h_3 - h_5$$

και συνεπώς ο θερμικός βαθμός αποδόσεως της εγκαταστάσεως είναι:

$$\eta_{TH} = \frac{(h_3 - h_4') - [(h_a' - h_1) + (h_2' - h_b)]}{h_3 - h_5}$$

Από τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνομε ότι:

- a) Με την ενδιάμεση ψύξη (intercooling) ελαττώνομε το καταναλισκόμενο από



Σχ. 2.2ια.

Θερμικός κύκλος αναγεννητήρα με ανάκτηση θερμότητας και ενδιάμεση ψύξη.

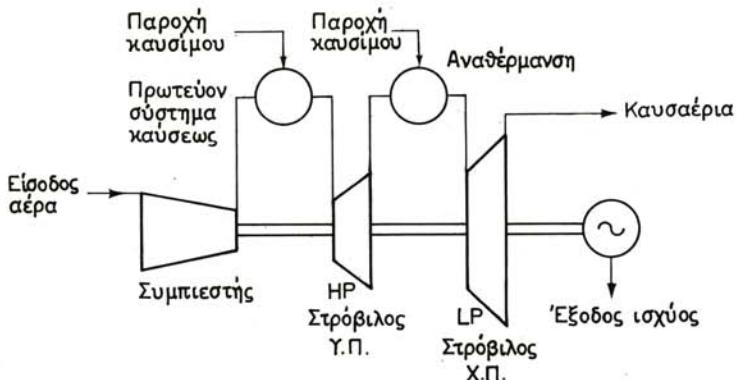
το συμπιεστή έργο και αυξάνομε το καθαρό (ωφέλιμο) έργο και την παραγόμενη από τον κύκλο ψύξη.

β) Ο θερμικός βαθμός αποδόσεως του κύκλου πολύ λίγο αυξάνει με τη χρησιμοποίηση μόνο ενδιάμεσης ψύξεως, ενώ αντίθετα αυξάνει σημαντικά, όταν η ενδιάμεση ψύξη χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τον αναγεννητήρα.

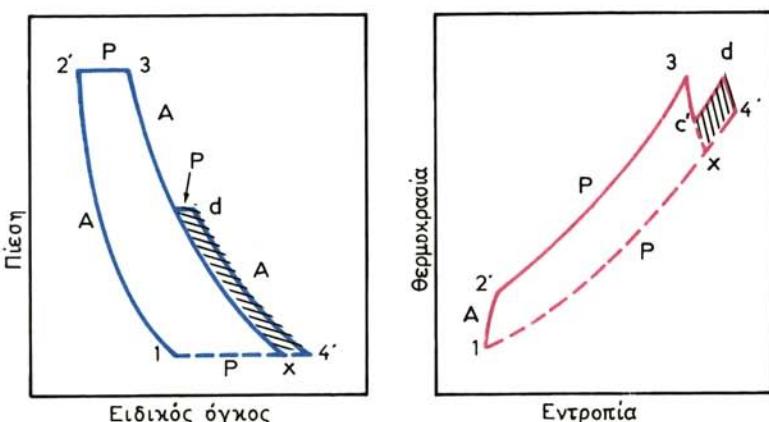
#### 2.2.4 Αναθέρμανση (Reheating).

Κατά ανάλογο τρόπο προς όσα αφορούν την ελάττωση του έργου του συμπιεστή όταν η συμπίεση είναι ισόθερμη, και το παραγόμενο από το στρόβιλο έργο αυξάνει επίσης, όταν η εκτόνωση του θερμοδυναμικού μέσου από ισεντροπική γίνεται ισόθερμη. Η πρακτική προσέγγιση ισόθερμης εκτονώσεως επιτυγχάνεται με την εκτόνωση σε περισσότερες βαθμίδες και αναθέρμανσεως των αερίων υπό σταθερή πίεση ύστερα από κάθε βαθμίδα μέχρι της μέγιστης επιτρεπόμενης θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο. Η αναθέρμανση επιτυγχάνεται σε θάλαμο καύσεως που παρεμβάλλεται μεταξύ των βαθμίδων, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2ιβ στην περίπτωση διβάθμιας εκτονώσεως.

Στο σχήμα 2.2ιγ παριστάνεται ο θερμικός κύκλος αεριοστροβίλου με αναθέρμανση σε διάγραμμα πίεσεως-όγκου (P-V) και ενθαλπίας-εντροπίας (T-S). Το θερμοδυναμικό μέσον εκτονώνεται στην πρώτη βαθμίδα τού στροβίλου (Φάση 3'-c'), ξαναθέρμανεται μέχρι της μέγιστης επιτρεπόμενης θερμοκρασίας στον αναθέρμαντήρα υπό σταθερή πίεση (Φάση c'-d') και εκτονώνεται εκ νέου στη δεύτερη βαθμίδα (Φάση d'-4'). Τόσο το παραγόμενο υπό του στροβίλου έργο όσο και το ωφέλιμο έργο, αυξάνουν όπως φαίνεται από τη σκιασμένη επιφάνεια (c'-d'-4'-c'). Παρά την αύξηση του ωφέλιμου έργου, ο θερμικός βαθμός αποδόσεως τού κύ-



Σχ. 2.2ιβ.  
Κύκλωμα αεριοστροβίλου με αναθέρμανση.



Σχ. 2.2ιγ.  
Θερμικός κύκλος αεριοστροβίλου με αναθέρμανση.

κλου αυξάνει ελάχιστα ή και καθόλου, γιατί, εκτός από το έργο αυξάνει και η παρεχόμενη θερμότητα λόγω της αναθερμάνσεως (Φάση c'-d').

Προσεκτική θεώρηση όμως του κύκλου φανερώνει ότι τα καυσαέρια, μετά τη δεύτερη βαθμίδα του στροβίλου (σημείο 4') έχουν μεγαλύτερη θερμοκρασία από εκείνη την οποία θα είχαν (σημείο x) αν δεν υπήρχε αναθερμαντήρας. Συνεπώς σε κύκλο αεριοστροβίλων με **αναγεννητήρα** και **αναθερμαντήρα** η θερμική απόδοση αυξάνει σε σύγκριση με ίδιο κύκλο αλλά με αναγεννητήρα μόνο.

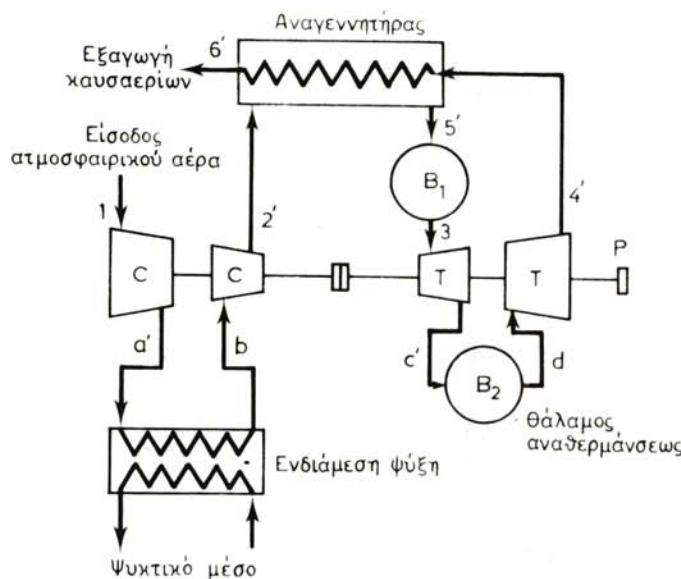
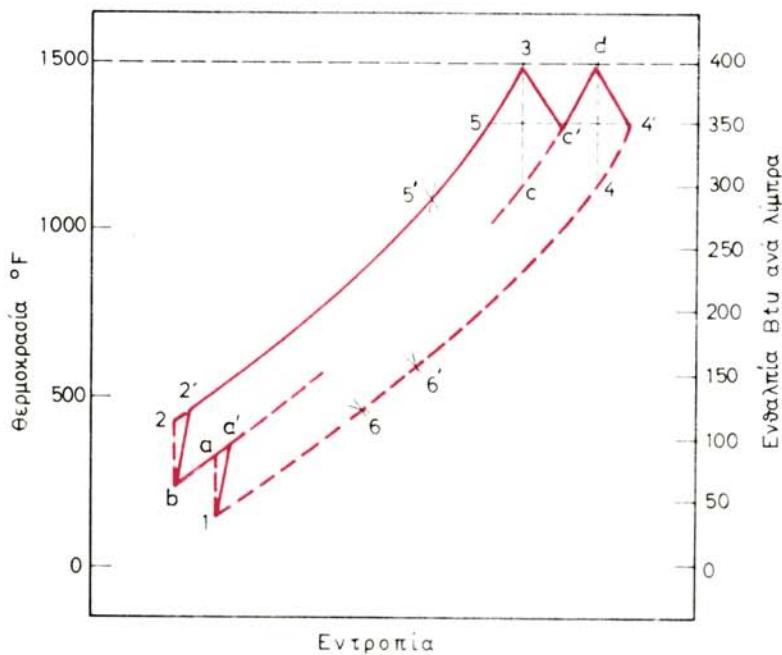
Ο θερμικός βαθμός αποδόσεως του κύκλου με αναθερμαντήρα προκύπτει αν χρησιμοποιήσουμε τους συμβολισμούς του σχήματος 2.2ιγ ως εξής:

Έργο παραγόμενο στις δύο βαθμίδες του στροβίλου:

$$W_T = (h_3 - h_{c'}) + (h_d - h_{4'})$$

Έργο απορροφόμενο από το συμπιεστή:

$$W_C = (h_{2'} - h_1)$$



**Σχ. 2.2ιδ.**

Κύκλωμα και θερμικός κύκλος αεριοστροβίλου με ανάκτηση θερμότητας, ενδιάμεση ψύξη και αναθέρμανση.

Προσδινόμενη θερμότητα και στους δύο θαλάμους καύσεως (πριν και ενδιάμεσα στο στρόβιλο):

$$Q_A = (h_3 - h_2') + (h_d - h_c')$$

Θερμικός βαθμός αποδόσεως του κύκλου:

$$\eta_{TH} = \frac{[(h_3 - h_{c'}) + (h_d - h_{4'})] - (h_{2'} - h_1)}{(h_3 - h_{2'}) + (h_d - h_{c'})}$$

Στο σχήμα 2.2ιδ παρουσιάζεται η γενικότερη περίπτωση ενός κυκλώματος αεριοστροβίλου με αναθερμαντήρα, αναγεννητήρα και ενδιάμεση ψύξη. Ο θερμικός βαθμός αποδόσεως του κύκλου αυτού είναι:

$$\eta_{TH} = \frac{[(h_3 - h_{c'}) + (h_d - h_{4'})] - (h_{2'} - h_1)}{(h_3 - h_5) + (h_d - h_{c'})}$$

## 2.3 Οι πρακτικές εφαρμογές των θερμικών κύκλων.

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου, ο αντικειμενικός σκοπός της μελέτης των θερμικών κύκλων είναι:

- Ο υπολογισμός του βαθμού αποδόσεως.
- Η εύρεση της ειδικής καταναλώσεως.
- Ο υπολογισμός της απαιτούμενης ποσότητας αέρα.

Εδώ θα εξετασθούν συνοπτικά όσα αφορούν την ποσότητα αέρα που απαιτείται για παροχή σε εγκατάσταση ναυτικών αεριοστροβίλων και οι τρόποι βελτιώσεως του λόγου των έργων. Τέλος, υπό μορφή συμπερασματικών παρατηρήσεων θα εξετασθεί η πρακτική επίπτωση των διαφόρων τρόπων και μεθόδων βελτιώσεως (αναθέρμανση, ενδιάμεση ψύξη κλπ.) σε όλα τα αέρια.

### 2.3.1 Απαιτούμενη ποσότητα αέρα σε εγκατάσταση αεριοστροβίλων.

Πέρα από το θερμικό βαθμό αποδόσεως, ο οποίος αποτελεί μέτρο της καταναλώσεως καυσίμου, άλλη παράμετρος που λαμβάνεται σοβαρά υπ' όψη είναι ο όγκος και το βάρος της εγκαταστάσεως προώσεως, τα οποία εξαρτώνται σε μεγάλο ποσοστό από την απαιτούμενη προς παροχή ποσότητα αέρα.

Η ποσότητα αέρα (Π.Α.) καθορίζεται σε μονάδες βάρους (λίμπρες ή χιλιόγραμμα) ανά ωριαίο ίππο και, προκειμένου για το αγγλοσαξωνικό σύστημα μονάδων, είναι:

$$\Pi.A. = \frac{2545}{W_T - W_c} = \frac{2545}{W_N} \frac{\text{λίμπρες αέρα}}{\text{ωριαίο ίππο}}$$

όπου:  $W_T$  = έργο στροβίλου,

$W_c$  = έργο συμπιεστή,

$W_N$  = καθαρό αφέλιμο έργο και

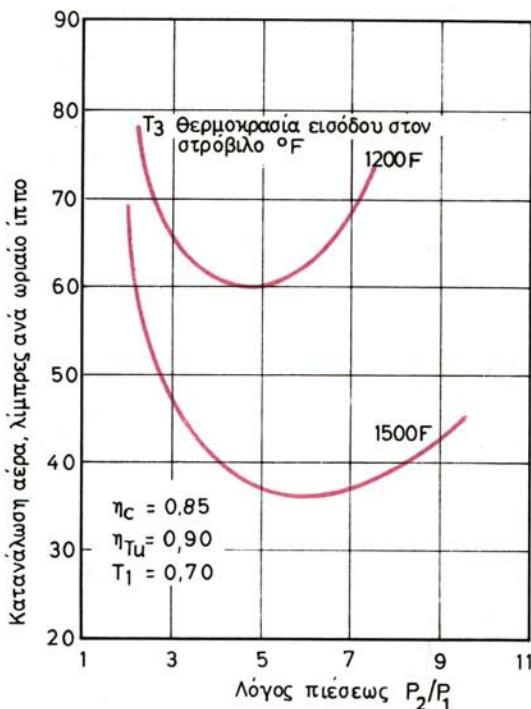
2545 = αριθμητικός συντελεστής μετατροπής BTU σε ωριαίους ίππους.

Η απαιτούμενη ποσότητα αέρα, εκτός του ότι αποτελεί κριτήριο μεγέθους της εγκαταστάσεως προώσεως έχει επίσης και άλλες επιπτώσεις. Έτσι, η ελάττωσή της έχει αποτέλεσμα την κατασκευή στροβίλων μικροτέρων διαστάσεων, με πιο ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασιών, οι οποίες με τη σειρά τους έχουν ως αποτέλεσμα διαδοχικά μικρότερες παραμορφώσεις λόγω ανομοιόμορφης θερμάνσεως,

μικρότερες απαιτήσεις αντοχής των υλικών και μεγαλύτερη αξιοπιστία της εγκατάστασεως. Η ποσότητα αέρα επηρεάζεται κυρίως από:

- Τη Θερμοκρασία εισόδου καυσαερίων στο στρόβιλο ( $T_3$ ) και το λόγο πιέσεων  $R$ .
- Τη Θερμοκρασία εισόδου αέρα στο συμπιεστή ( $T_1$ ).
- Την ύπαρξη ή όχι αναθερμάνσεως, ενδιάμεσης ψύξεως.
- Τους βαθμούς αποδόσεως συμπιεστή και στροβίλου.

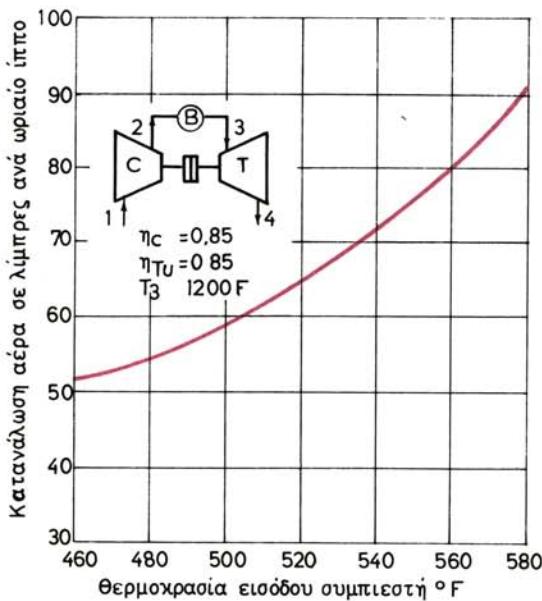
Στο σχήμα 2.3α φαίνεται η σχέση ποσότητας αέρα και θερμοκρασίας εισόδου  $T_3$  καθώς και του λόγου συμπιέσεως  $R$ . Κατ' αρχήν με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου ελαττώνεται η ποσότητα αέρα (για την ίδια τιμή του  $R$ ). Για κάθε τιμή θερμοκρασίας  $T_3$  υπάρχει ένας αντίστοιχος λόγος συμπιέσεως  $R$ , ο οποίος αντιστοιχεί σε ελάχιστη τιμή της ποσότητας αέρα (minimum) της καμπύλης, ενώ οποιαδήποτε μεταβολή του  $R$  (αύξηση ή ελάττωση) αυξάνει την ποσότητα του αέρα. Σημειώνεται εδώ ότι οι καμπύλες του σχήματος αφορούν εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων με συγκεκριμένο βαθμό αποδόσεως συμπιεστή και στροβίλου καθώς και θερμοκρασία αέρα  $T_1$ , και συνεπώς για διαφορετικές τιμές των παραπάνω παραμέτρων μεταβάλλονται και οι τιμές του  $R$  που αντιστοιχούν σε ελάχιστη τιμή της ποσότητας αέρα.



Σχ. 2.3α.

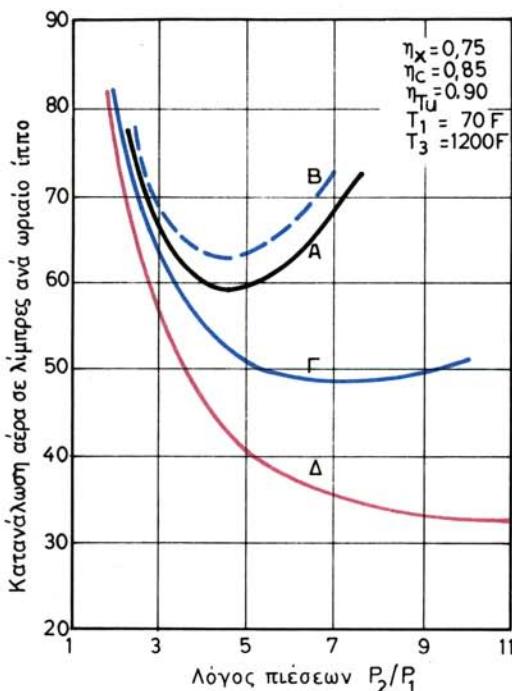
Σχέση μεταξύ καταναλώσεως αέρα και λόγου πιέσεων.

Η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα εισαγωγής στο συμπιεστή ( $T_1$ ) αυξάνει το δαπανόμενο από αυτόν έργο και συνεπώς ελαττώνει το ωφέλιμο έργο του θερμικού κύκλου. Από τον ορισμό όμως της ποσότητας αέρα, αυτό συνεπάγεται αύξηση της. Τα ανωτέρω φαίνονται στο σχήμα 2.3β.



Σχ. 2.3β.

Σχέση μεταξύ καταναλώσεως αέρα και θερμοκρασίας αέρα εισαγωγής.

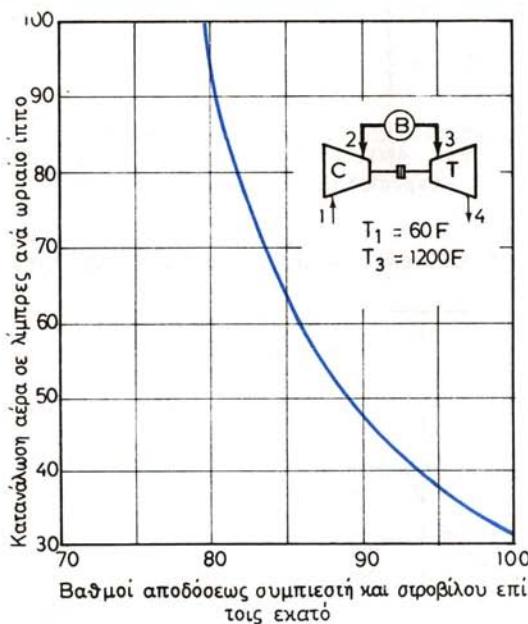


Σχ. 2.3γ.

Σχέση καταναλώσεως αέρα και συσκευών ανακτήσεως θερμότητας.

Η προσθήκη στο απλό κύκλωμα αεριοστροβίλου συσκευών ανακτήσεως θερμότητας (αναγεννητήρες) ενδιάμεσης ψύξεως και αναθερμαντήρων επιδρά στην απαιτούμενη ποσότητα αέρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3γ. Ενώ δηλαδή η ανάκτηση θερμότητας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της (Π.Α.), αντίθετα η ενδιάμεση ψύξη και η αναθέρμανση ελαττώνουν την (Π.Α.), ιδιαίτερα σε μεγάλους λόγους πιέσεως, οπότε και η επιτυγχανόμενη ελάττωση των φυσικών διαστάσεων της εγκαταστάσεως είναι και σημαντικότερη.

Τέλος, η βελτίωση του εσωτερικού βαθμού αποδόσεως τόσο του στροβίλου όσο και του συμπιεστή επιδρούν σημαντικά στην απαιτούμενη ποσότητα αέρα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.3δ, όπου γίνεται φανερό το γιατί στις πρόσφατης κατασκευής εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων έχει μειωθεί σημαντικά το μέγεθός τους παράλληλα με την αύξηση του βαθμού αποδόσεώς τους.



**Σχ. 2.3δ.**

Σχέση καταναλώσεως αέρα και βαθμού αποδόσεως στροβίλου συμπιεστή.

### 2.3.2 Λόγος των έργων.

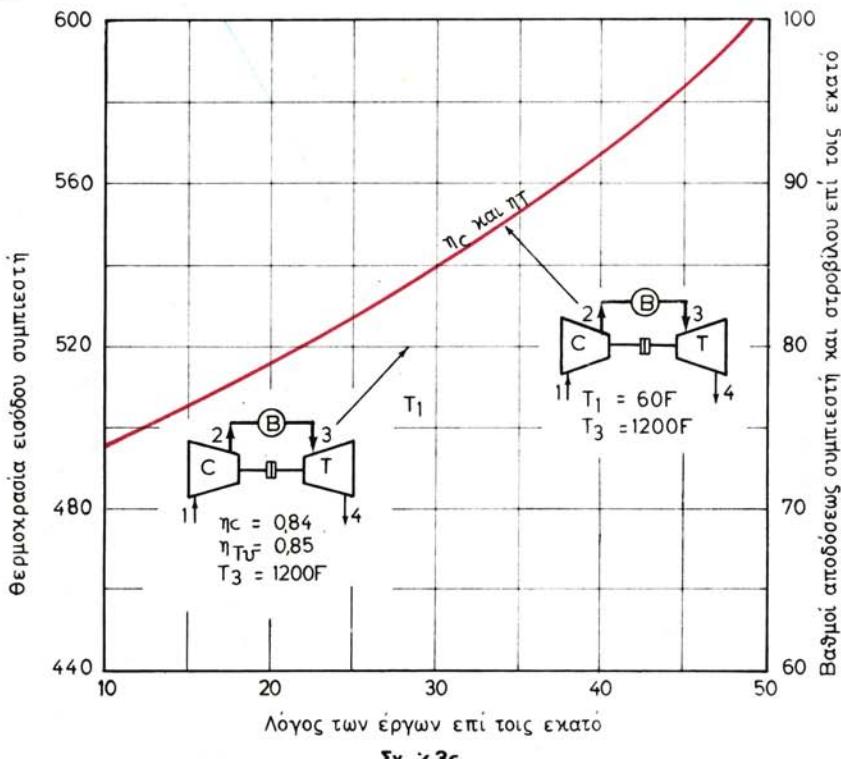
Μια καλά σχεδιασμένη εγκατάσταση αεριοστροβίλων, εκτός του υψηλού θερμικού βαθμού αποδόσεως και της χαμηλής καταναλώσεως αέρα, είναι επιθυμητό να έχει υψηλή τιμή του λεγόμενου «λόγου των έργων», ο οποίος εξ ορισμού είναι ο λόγος του καθαρού (ωφέλιμου) έργου προς το έργο που παράγεται από τα καυσαέρια που εκτονώνονται στο στρόβιλο, δηλαδή:

$$\text{Λόγος του έργου (Λ.Ε.)} = \frac{W_n}{W_T}$$

Εκτός του ότι παρέχει ένα μέτρο για την αποτελεσματική χρησιμοποίηση της εγ-

καταστάσεως προώσεως, η τιμή του (Λ.Ε.) είναι ένδειξη της «ευαισθησίας» της στις μεταβολές του βαθμού αποδόσεως του συμπιεστή και του στροβίλου. Οι μεταβολές αυτές (μειώσεις) του βαθμού αποδόσεως συμβαίνουν κατά τη λειτουργία των μηχανών με χαμηλό φορτίο ή και μετά από παρατεταμένη χρήση χωρίς συντήρηση. Αν η τιμή του (Λ.Ε.) είναι υψηλή, τότε οι μεταβολές του βαθμού αποδόσεως στροβίλου και συμπιεστή έχουν πολύ μικρή επίπτωση στο θερμικό βαθμό αποδόσεως του κύκλου και συνεπώς και κατά τη λειτουργία της εγκαταστάσεως με μερικό φορτίο.

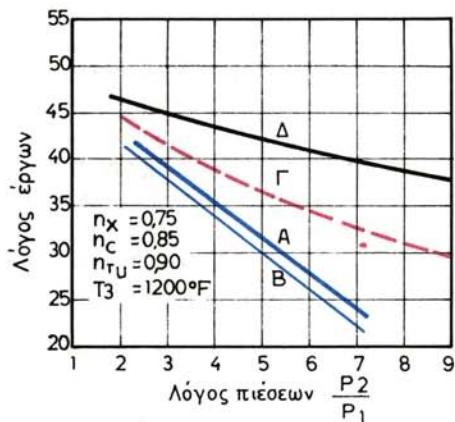
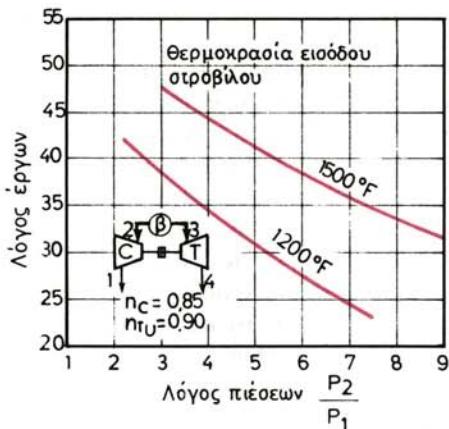
Η τιμή του (Λ.Ε.) εξαρτάται από τις ίδιες παραμέτρους όπως και η ποσότητα αέρα. Έτσι, στο σχήμα 2.3ε φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας αέρα εισόδου στο συμπιεστή ( $T_1$ ) και του βαθμού αποδόσεως συμπιεστή και στροβίλου στο (Λ.Ε.). Είναι χαρακτηριστικό ότι πολύ μικρή αύξηση του βαθμού αποδόσεως  $\eta_C$  και  $\eta_T$  έχει σημαντική επίπτωση στην αύξηση της τιμής του (Λ.Ε.), ενώ η αύξηση της  $T_1$  (στο σχήμα είναι θερμοκρασίες Rankine =  $F^\circ + 460$ ) ελαττώνει την τιμή του (Λ.Ε.).



Σχ. 2.3ε.  
Μεταβολή του λόγου των έργων.

Τέλος, από το σχήμα 2.3στ εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Όταν αυξάνει ο λόγος συμπιέσεως  $R$ , η τιμή του (Λ.Ε.) ελαττώνεται.
- Όταν αυξάνει η θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο ( $T_3$ ), αυξάνεται και η τιμή του (Λ.Ε.).
- Ενώ η ανάκτηση θερμότητας μόνη της επιδρά δυσμενώς στην τιμή του (Λ.Ε.)



- A: Απλός ανοικτός κύκλος  
 B: Απλός ανοικτός κύκλος με αναγεννητήρα  
 Γ: Απλός ανοικτός κύκλος με αναγεννητήρα και ενδιάμεση ψύξη  
 Δ: Απλός ανοικτός κύκλος με αναγεννητήρα ενδιάμεση ψύξη και αναθέρμανση.

### Σχ. 2.3στ.

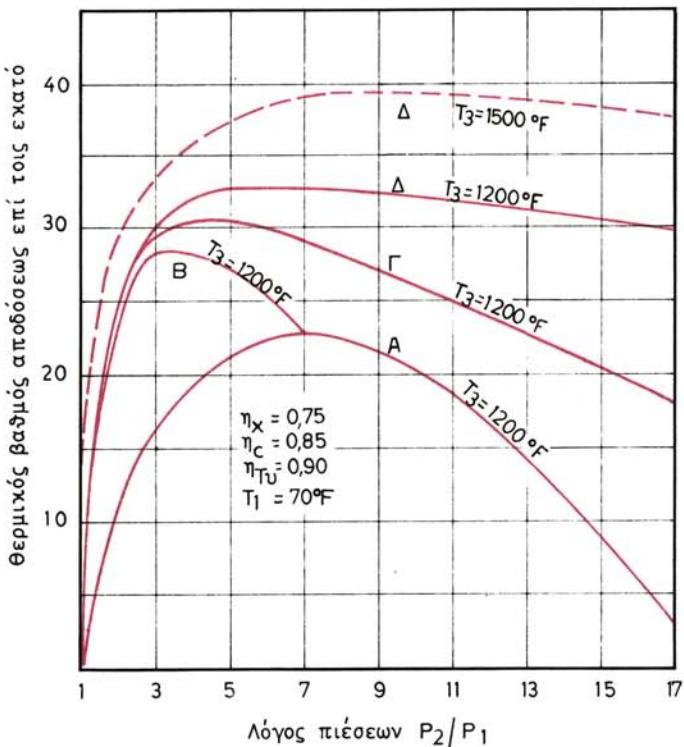
Πώς μεταβάλλεται ο λόγος των έργων.

σε σχέση με τον απλό κύκλο, αντίθετα, όταν συνυπάρχει με ενδιάμεση ψύξη και αναθέρμανση, η τιμή του (Λ.Ε.) βελτιώνεται.

### 2.3.3 Συμπερασματικές παρατηρήσεις.

Η πρόσθεση συσκευών ανακτήσεως θερμότητας, ενδιάμεσης ψύξεως και αναθερμάνσεως στο απλό κύκλωμα αεριοστροβίλων αυξάνουν μεν το κόστος, τον όγκο, το βάρος και την πολυπλοκότητα της εγκαταστάσεως προώσεως, αλλά συγχρόνως βελτιώνουν την ολική απόδοσή τους. Όπως ήδη προαναφέρθηκε, η επίδραση των ανωτέρω συσκευών στο θερμικό βαθμό αποδόσεως του κύκλου, στην αφέλιμη ισχύ, στην ποσότητα του αέρα και στο λόγο των έργων είναι αλληλοεξαρτημένη.

Η ανάκτηση θερμότητας από τα διαφεύγοντα καυσαέρια με τους αναγεννητήρες, βελτιώνει το θερμικό βαθμό αποδόσεως του ανοικτού κύκλου. Ο αναγεννητήρας είναι μια φθηνή συσκευή που δεν απαιτεί ιδιαίτερη συντήρηση, έχει όμως το μειονέκτημα της αυξήσεως του όγκου και του βάρους της εγκαταστάσεως. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3ζ (καμπύλη Β), η επιφερόμενη με τον αναγεννητήρα αύξηση του θερμικού βαθμού αποδόσεως του κύκλου συμβαίνει για χαμηλές μόνο τιμές του λόγου συμπιέσεως  $R$ . Η μέγιστη δηλαδή τιμή του  $\pi_T$  του κύκλου με αναγεννητήρα αντιστοιχεί σε πολύ χαμηλότερη τιμή του  $R$  από ότι η μέγιστη τιμή του ίδιου κύκλου χωρίς αναγεννητήρα (καμπύλη Α). Όταν μάλιστα η τιμή του  $R$  γίνεται μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στο σημείο τομής των καμπυλών Α και Β, τότε η θερμοκρασία των καυσαερίων εξαγωγής από τον αεριοστρόβιλο είναι χαμηλότερη της θερμοκρασίας του συμπιεσθέντα αέρα και η ανάκτηση θερμότητας γίνεται αρνητική, δηλαδή ο αέρας θερμαίνει τα καυσαέρια. Το μειονέκτημα αυτό της



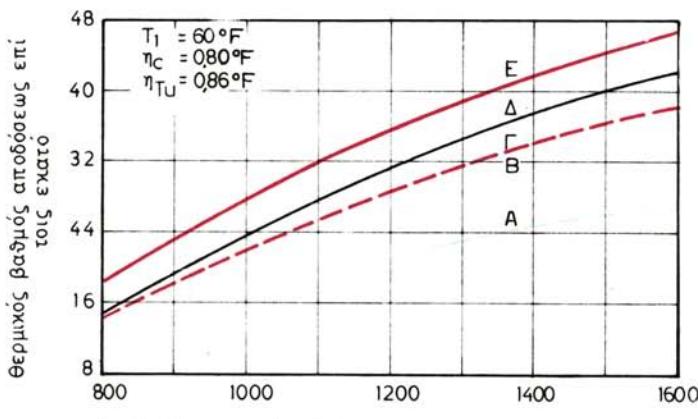
- Α: Απλός ανοικτός κύκλος  
 Β: Απλός ανοικτός κύκλος με αναγεννητήρα  
 Γ: Απλός ανοικτός κύκλος με αναγεννητήρα και ενδιάμεση ψύξη  
 Δ: Απλός ανοικτός κύκλος με αναγεννητήρα, ενδιάμεση ψύξη και αναθερμανση

Σχ. 2.3ζ.

Θερμικός βαθμός αποδόσεως του κύκλου με και χωρίς συσκευή ανακτήσεως θερμότητας.

ανακτήσεως θερμότητας, το ότι περιορίζονται δηλαδή σε χαμηλές τιμές του λόγου συμπιέσεως  $R$ , διορθώνεται με την προσθήκη συσκευής ενδιάμεσης ψύξεως ή αναθερμάνσεως ή με το συνδυασμό και των δύο. Αξίζει να επισημανθεί ότι η τοποθέτηση μόνο συσκευής ενδιάμεσης ψύξεως ή μόνο συσκευής αναθερμάνσεως, πολύ μικρή βελτίωση επιφέρει στο θερμικό βαθμό αποδόσεως του κύκλου, ενώ και οι δύο σε συνδυασμό τον βελτιώνουν και μάλιστα για ευρύ φάσμα τιμών του  $R$  (καμπύλες  $\Gamma$  και  $\Delta$ ).

Το σχήμα 2.3ζ δείχνει τη μεταβολή του θερμικού βαθμού αποδόσεως σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία  $T_3$  των καυσαερίων κατά την είσοδό τους στο στρόβιλο για τα διάφορα είδη των πραγματικών κύκλων με ή χωρίς παρελκόμενες συσκευές. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.3ζ, είναι φανερό ότι η πολυπλοκότερη εγκατάσταση ανοικτού κυκλώματος με αναθερμαντήρα, ενδιάμεση ψύξη και ανάκτηση θερμότητας έχει τον καλύτερο θερμικό βαθμό αποδόσεως. Όσα αφορούν την επίδραση των παρελκομένων συσκευών στο λόγο των έργων και της απαιτούμενης ποσότητας αέρα, αναπτύχθηκαν διεξοδικά στα προηγούμενα. Συνοψίζοντας,



- A Απλός ανοικτός κύκλος
- B Απλός ανοικτός κύκλος με αναγεννητήρα
- C Απλός ανοικτός κύκλος με αναγεννητήρα και ενδιάμεση ψύξη
- D Απλός ανοικτός κύκλος με αναγεννητήρα και αναθέρμανση
- E Απλός ανοικτός κύκλος με αναγεννητήρα, αναθέρμανση και ενδιάμεση ψύξη

### Σχ. 2.3η.

Θερμικός βαθμός αποδόσεως των κύκλων σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία  $T_3$ .

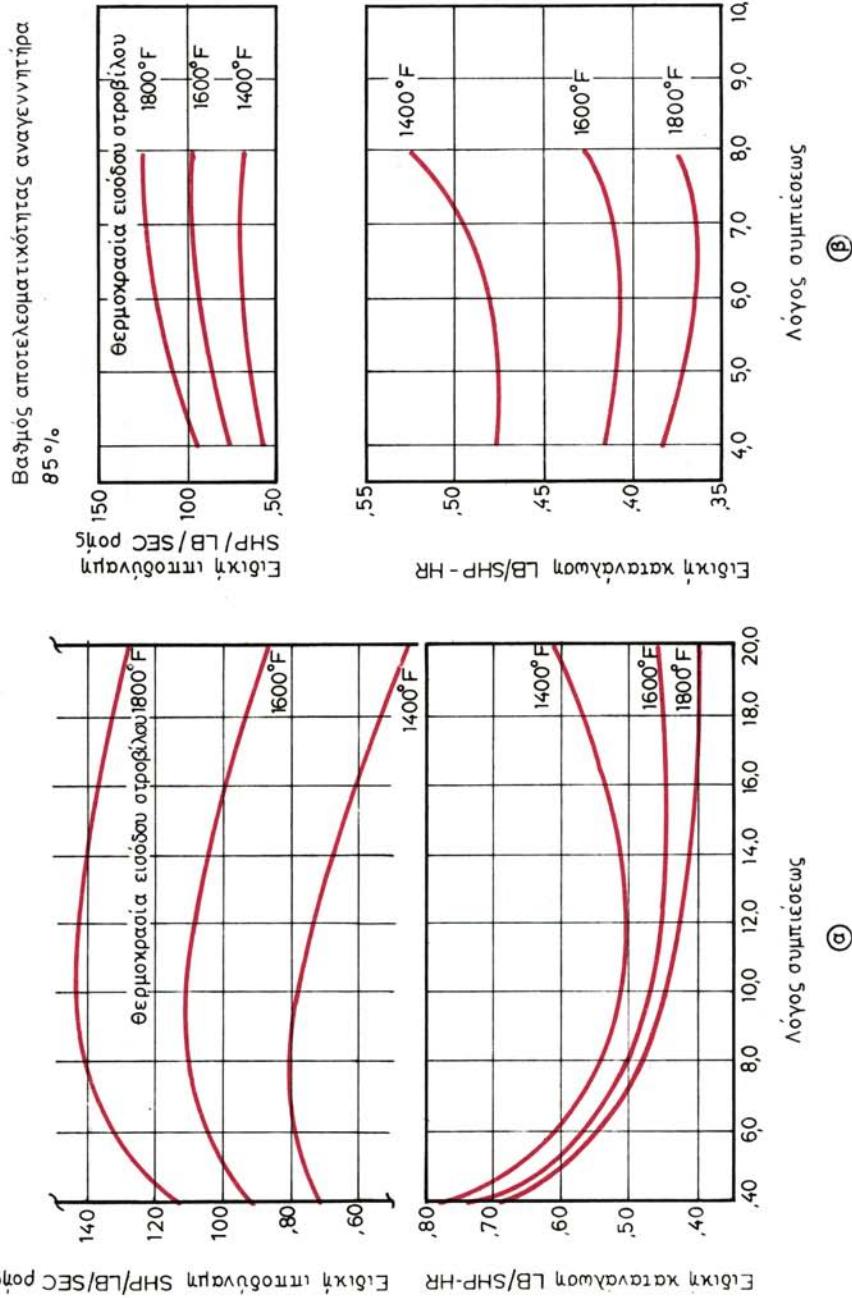
μπορούμε να πούμε ότι η αναθέρμανση και η ενδιάμεση ψύξη ελαττώνουν την ποσότητα του αέρα και αυξάνουν την τιμή του λόγου των έργων.

Στον πίνακα 2.3.1 παρατίθενται χαρακτηριστικές τιμές των προαναφερθεισών παραμέτρων για την ίδια βασική εγκατάσταση προώσεως, στην οποία ο μηχανικός βαθμός αποδόσεως του στροβίλου και του συμπιεστή είναι 0,8, ο βαθμός αποτελεσματικότητας του αναγεννητήρα επίσης 0,8, η μέγιστη θερμοκρασία εισόδου καυσαερίων στο στρόβιλο  $T_3 = 1200^{\circ}\text{F}$  και η θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_1 = 60^{\circ}\text{F}$ .

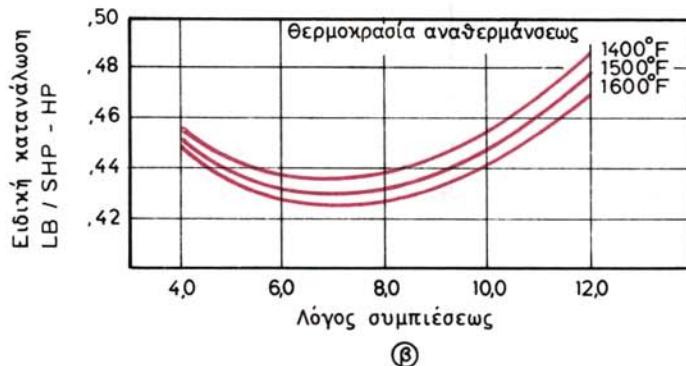
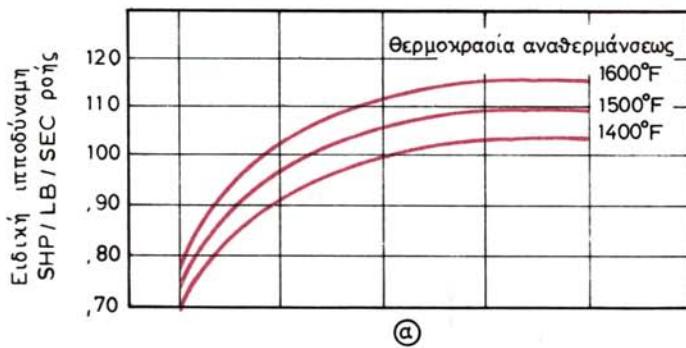
### ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3.1.

| Είδος κύκλου   | Θερμικός βαθμός αποδόσεως | Ποσότητα αέρα λίμπρες ανά ωριαίο ίππο | Τιμή λόγου έργων | Βέλτιστη τιμή λόγου συμπιεσεως R |
|--|---------------------------|---------------------------------------|------------------|----------------------------------|
| Απλός ανοικτός   | 0,146                     | 89                                    | 0,244            | 5                                |
| Απλός ανοικτός με αναγεννητήρα                                 | 0,258                     | 91                                    | 0,301            | 2,6                              |
| Απλός ανοικτός με αναγεννητήρα και ενδιάμεση ψύξη              | 0,26                      | 71                                    | 0,338            | 3,5                              |
| Απλός ανοικτός με αναγεννητήρα, ενδιάμεση ψύξη και αναθέρμανση | 0,289                     | 51                                    | 0,358            | 6                                |

Στα σχήματα 2.3θ, 2.3ι και 2.3ια παρουσιάζονται τα πιο πρόσφατα αποτελέσματα επιδόσεων μηχανών που έχουν εγκατασταθεί σε πλοία και λειτουργούν για χρόνια. Τούτο επισημαίνεται ιδιάίτερα, γιατί πολλές φορές οι σχεδιαστές των μη-

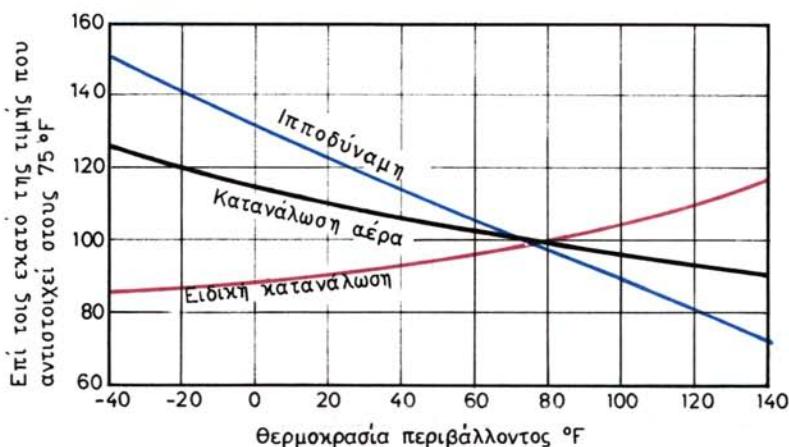


g) Επιδόσεις απλού κύκλου. β) Επιδόσεις κύκλου με ανάκτηση θερμότητας.



Σχ. 2.3ι.

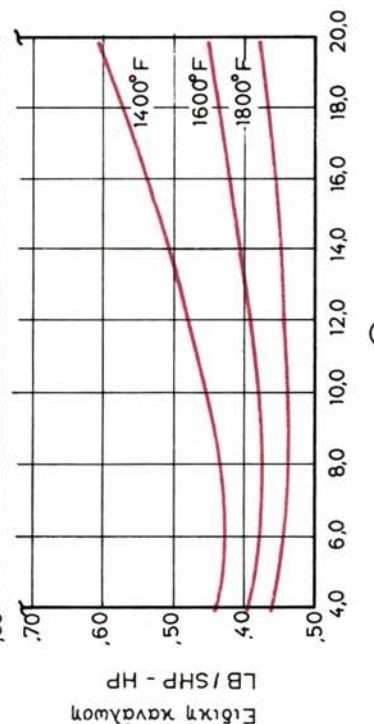
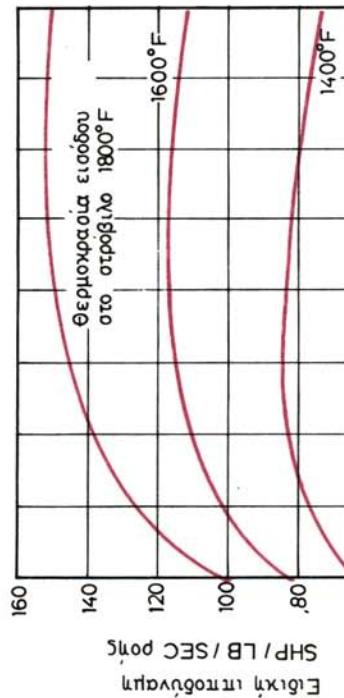
α) Επιδόσεις κύκλου με ανάκτηση θερμότητας. β) Αναθέρμανση.



Σχ. 2.3ια.

Η επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στην ειδική κατανάλωση. α) Στην ιπποδύναμη. β) Στην κατανάλωση αέρα.

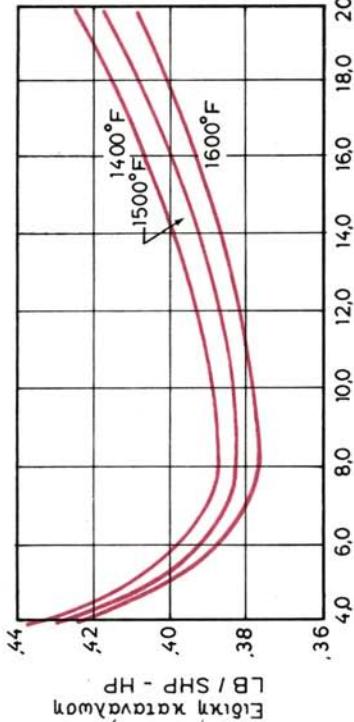
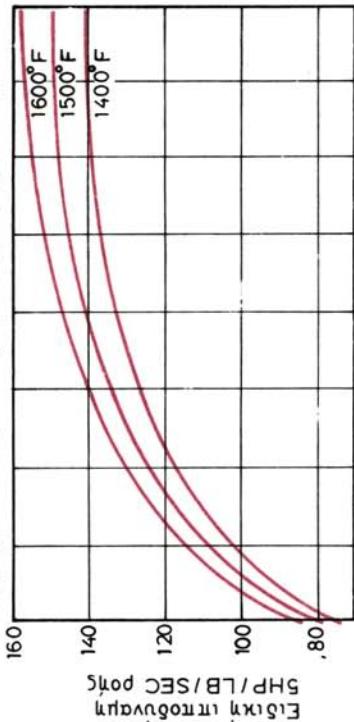
Βαθμός αποτελεσματικότητας ενδιάμεσης ψυξέως: 70 %  
Βαθμός αποτελεσματικότητας αναγεννητήρα: 85 %



(a)

α) Επιδόσεις κύκλου με ανάκτηση θερμότητας και ενδιάμεση ψύξη. β) Επιδόσεις κύκλου με ανάκτηση θερμότητας, ενδιάμεση ψύξη και αναθέριση.

Βαθμός αποτελεσματικότητας ενδιάμεσης ψυξέως: 70 %  
Βαθμός αποτελεσματικότητας αναγεννητήρα: 85 %



(b)

Σχ. 2.3β.

α) Επιδόσεις κύκλου με ανάκτηση θερμότητας και ενδιάμεση ψύξη. β) Επιδόσεις κύκλου με ανάκτηση θερμότητας, ενδιάμεση ψύξη και αναθέριση.

χανών διαπιστώνουν ότι οι παράμετροι λειτουργίας των μηχανών τους διαφέρουν στην πράξη από ό,τι θεωρητικά υπολογίσθηκαν. Οι παράμετροι που εξετάζονται αφορούν την ειδική κατανάλωση (λίμπρες ανά ωριαίο ίππο) και την ειδική ιπποδύναμη (ίπποι ανά μονάδα ροής αέρα) για όλους τους κύκλους θερμικών κυκλωμάτων, με και χωρίς παρελκόμενες συσκευές. Τέλος, παρέχεται ένα νομογράφημα (σχ. 2.3ιβ) που επιτρέπει τον υπολογισμό της ιπποδυνάμεως, της καταναλώσεως αέρα και της ειδικής καταναλώσεως καυσίμων, όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος από  $-40^{\circ}\text{F}$  μέχρι  $140^{\circ}\text{F}$ , θεωρούμενης της θερμοκρασίας των  $75^{\circ}\text{F}$  ως σημείου αναφοράς.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

### ΟΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΤΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ. ΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΚΑΙ ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ

#### 3.1 Γενικά.

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται τα βασικά στοιχεία αρχών λειτουργίας, κατασκευής και πρακτικών εφαρμογών των συμπιεστών και των στροβίλων μιας εγκαταστάσεως. Αυτό σημαίνει ότι δίνεται έμφαση στα είδη των στροβιλομηχανών (ο όρος περιλαμβάνει τόσο τους συμπιεστές όσο και τους στροβίλους), τα οποία συνήθως απαντώνται στα πλοία.

Το κεφάλαιο περιορίζεται στις απαραίτητες γνώσεις ώστε να μπορεί καλύτερα να αντιληφθεί ο ασχολούμενος για πρώτη φορά με τους αεριοστροβίλους σπουδαστής το αντικείμενο του μαθήματος, δηλαδή τις εφαρμογές των αεριοστροβίλων.

Αντικείμενα λοιπόν, όπως η λεπτομερειακή σχεδίαση ή η ανάλυση των στροβιλομηχανών ξεφεύγουν από το σκοπό του βιβλίου. Αντίθετα εξετάζονται κυρίως τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των στροβιλομηχανών, δηλαδή οι σχέσεις που συνδέουν δύο ή και περισσότερες παραμέτρους λειτουργίας τους (π.χ τη ροπή και τις στροφές).

#### 3.2 Αρχές λειτουργίας των στροβιλομηχανών.

Η από κοινού δράση ενός περιστρεφόμενου τροχού και μιας «δέσμης» κινούμενου ρευστού μπορούν να επεξιγγήσουν την αρχή λειτουργίας τόσο ενός συμπιεστή όσο και ενός στροβίλου. Στο σχήμα 3.2α φαίνεται η κοινή δράση του τροχού και του ρευστού στην απλούστερη ιδεατή μορφή της. Σε πραγματικές καταστάσεις βέβαια η «κοινή δράση» του τροχού και του ρευστού δημιουργείται κατά περισσότερο σύνθετο τρόπο, η ανάλυση όμως της αρχής λειτουργίας που ακολουθεί δεν διαφοροποιείται καθόλου.

Η ανάλυση βασίζεται στις ακόλουθες υποθέσεις:

- Ο τροχός περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα.
- Η δέσμη του ρευστού υφίσταται μεταβολή της ορμής της (ποσότητα κινήσεως) σαν αποτέλεσμα της κοινής «δράσεώς» της με τον τροχό.

Από το δεύτερο θεμελιώδη νόμο του Νεύτονα (η συνολική ροπή των εξωτερικών δυνάμεων ισούται με τη μεταβολή ανά μονάδα χρόνου της ροπής της ποσότητας κινήσεως) και θεωρώντας μόνο τις ροπές που προκαλούν περιστροφή των τροχών, έχομε τη σχέση:

$$Q = \dot{m} (r_1 \cdot Cu_1 - r_2 \cdot Cu_2)$$

όπου:  $Q = \text{ροπή}$ ,

$\dot{m} = \text{ποσότητα ρευστού η ροή}$ ,

$r = \text{ακτίνα και}$

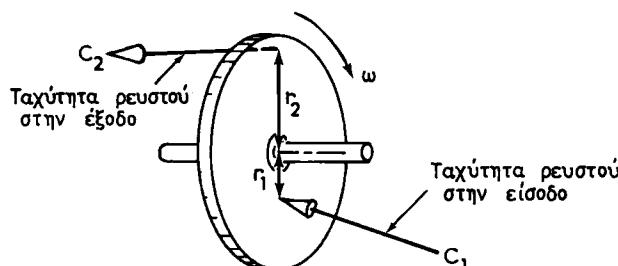
$C = \text{εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας του ρευστού } C$ .

Επειδή η μεταβιβαζόμενη ενέργεια ανά μονάδα χρόνου από το ρευστό στον τροχό (ή από τον τροχό προς το ρευστό) είναι γινόμενο της ανωτέρω ροπής  $Q$  επί τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής  $W$ , έχομε:

$$E = \dot{m}W (r_1C_{u1} - r_2C_{u2})$$

ή, επειδή η γραμμική ταχύτητα  $U$  ισούται με το γινόμενο της γωνιακής ταχύτητας  $W$  επί την ακτίνα  $r$ , δηλαδή  $U = Wr$ , έχομε:

$$E = \dot{m}(U_1C_{u1} - U_2C_{u2}) \quad (3.1)$$



Σχ. 3.2.  
Κοινή δράση ρευστού και τροχού.

Η πιο πάνω σχέση έχει γενικότερη ισχύ και καλύπτει το σύνολο των στροβιλομηχανών, η λειτουργία των οποίων ικανοποιεί τις δύο προϋποθέσεις που έχουν τεθεί, δηλαδή σταθερή γωνιακή ταχύτητα και μεταβολή της ορμής. Στη σχέση (3.1) διακρίνομε τις ακόλουθες περιπτώσεις:

α) Αν  $U_1C_{u1} > U_2C_{u2}$ ,

τότε προφανώς  $E > 0$ , δηλαδή έργο παράγεται από το ρευστό επάνω στον τροχό, πρόκειται συνεπώς για στρόβιλο.

β) Αν  $U_1C_{u1} < U_2C_{u2}$ ,

είναι  $E < 0$ , δηλαδή έργο μεταδίδεται στο ρευστό από τον τροχό, είναι δηλαδή η περίπτωση αντλίας ή συμπιεστή ή ανεμιστήρα ή φυσητήρα.

Για λόγους γενικότερου τεχνικού ενδιαφέροντος αξίζει να επισημάνουμε τις διαφορές μεταξύ των παραπάνω μηχανημάτων (περίπτωση  $E < 0$ ).

**Αντλία** είναι το μηχάνημα που αυξάνει την ενέργεια ενός πρακτικά ασυμπίεστου ρευστού, δηλαδή ενός υγρού.

**Ανεμιστήρας ή φυσητήρας** (τεχνικά οι όροι είναι συνώνυμοι) είναι το μηχάνημα που αυξάνει την ενέργεια ενός συμπιεστή ρευστού, δηλαδή ενός αερίου, και αυξάνει την πίεσή του αλλά όχι σε τέτοιο βαθμό ώστε πρακτικά να μη μεταβάλλεται η πυκνότητα του ρευστού.

**Συμπιεστής** είναι το μηχάνημα το οποίο αυξάνει τόσο σημαντικά την πίεση ενός αερίου, ώστε να μεταβάλλεται και η πυκνότητά του.

Αν και υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των παραπάνω διαφόρων μηχανημάτων που αφορούν τη σχεδίαση, την κατασκευή και τη λειτουργία, υπάρχουν

και ορισμένες κοινές παράμετροι ή χαρακτηριστικά λειτουργίας. Μεταξύ αυτών, το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο είναι η σχέση μεταξύ ροής και αυξήσεως της πιέσεως.

### 3.3 Φυγοκεντρικοί συμπιεστές.

Φυγοκεντρικοί ονομάζονται οι συμπιεστές (και γενικότερα όλα τα συναφή μηχανήματα) στους οποίους το ρευστό αποχωρίζεται από το συνεργαζόμενο τροχό κατά ακτινική διεύθυνση.

Οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές είναι σχετικά απλής κατασκευής και ως εκ τούτου συναντώνται σε μικρότερες μηχανές και εγκαταστάσεις, όπου η πολυπλοκότητα των συμπιεστών αξονικής ροής δεν δικαιολογείται. Αποτελούνται βασικά από ένα στροφείο (σχ. 3.3α), ένα διαχύτη (diffuser) και ένα συλλέκτη. Το στροφείο κινείται

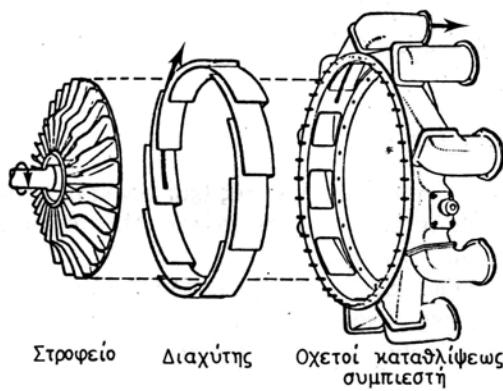


Σχ. 3.3α.  
Στροφεία φυγοκεντρικών συμπιεστών.

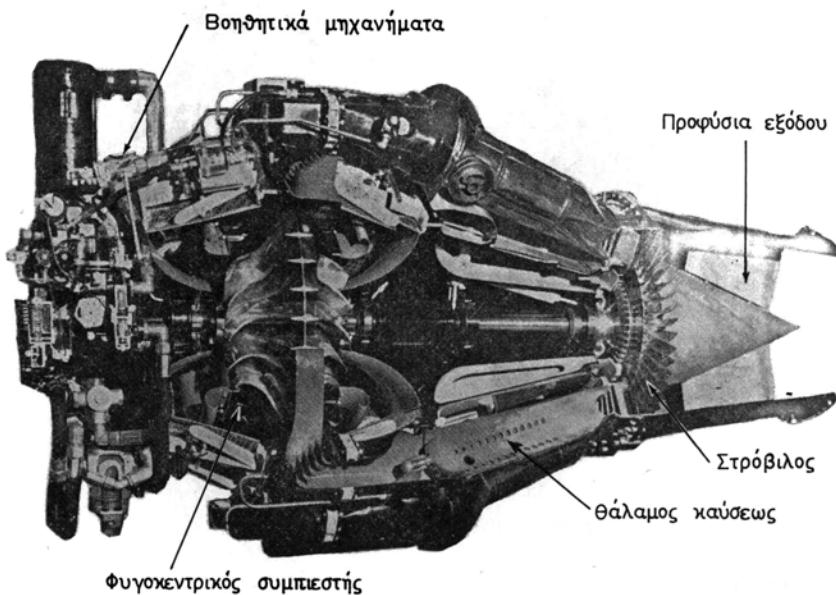
με τη βοήθεια άξονα μέσα σε κέλυφος, στην είσοδο του οποίου δημιουργείται η αναρρόφηση του αέρα κατά την αξονική διεύθυνση (σχ. 3.3β). Με την περιστροφή αναρροφάται αέρας και μέσω των πτερυγιακών αυλάκων, κατά την έννοια της ακτίνας, καταθλίβεται προς την περιφέρεια. Εκεί, από το διαχύτη επιβραδύνεται η αποκτηθείσα υψηλή ακτινική ταχύτητα και μετατρέπεται η κινητική ενέργεια σε ενέργεια πιέσεως. Ο καταθλιβόμενος αέρας συγκεντρώνεται στο συλλέκτη που ακολουθεί και οδηγείται στο χώρο καύσεως ή σε τυχόν υπάρχουσα άλλη βαθύτατα. Στο σχήμα 3.3γ φαίνεται τυπική διάταξη αεριοστροβίλου με φυγοκεντρικό συμπιεστή, ενώ στο σχήμα 3.3δ φαίνεται λεπτομερέστερα ο φυγοκεντρικός συμπιεστής του προηγούμενου σχήματος.

Για την ολοκλήρωση της στοιχειώδους αναλύσεως η οποία κατέληξε στη σχέση (3.1) προσφορότερος είναι ο τρόπος της διανυσματικής αναλύσεως.

Έτσι, στο σχήμα 3.3ε οι ταχύτητες της δέσμης του ρευστού και του περιστρε-



**Σχ. 3.3β.**  
Γενική άποψη φυγοκεντρικού συμπιεστή.



**Σχ. 3.3γ.**  
Φυγοκεντρικός συμπιεστής.

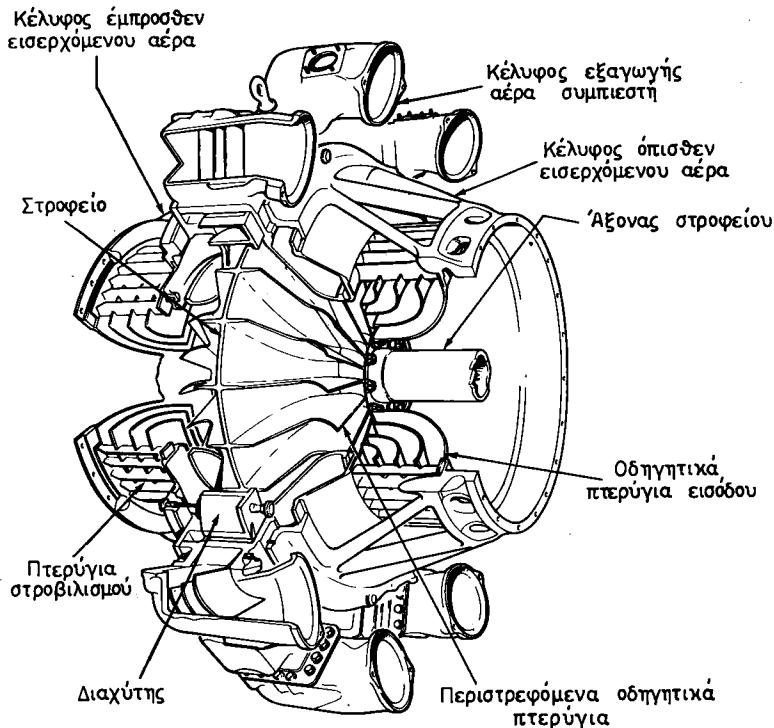
φόμενου στροφείου παριστάνονται με επίπεδα διανύσματα. Τα δύο τρίγωνα αντιστοιχούν στην κατάσταση εισόδου και εξόδου του ρευστού από τον τροχό. Ειδικότερα έχομε:

C = η απόλυτη ταχύτητα του ρευστού (προβαλλόμενη στο επίπεδο του τροχού αν δεν είναι συνεπίπεδη),

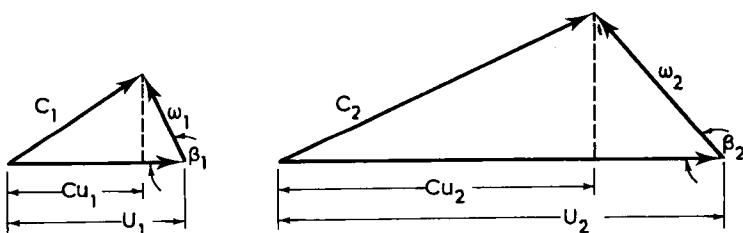
C<sub>u</sub> = η εφαπτομενική συνιστώσα της προηγούμενης,

U = η γραμμική ταχύτητα του τροχού. Ισχύει U = W.r και

W = η σχετική ταχύτητα του ρευστού ως προς τον τροχό που ισούται με το διανυσματικό άθροισμα U και C, δηλαδή W = U + C.



**Σχ. 3.36.**  
Λεπτομέρειες φυγοκεντρικού συμπιεστή.



**Σχ. 3.3ε.**  
Διανύσματα ταχυτήτων στροβιλομηχανής.

Με βάση τα ανωτέρω, καθώς και το σχήμα 3.3ε, η σχέση (3.1) τροποποιείται ως ακολούθως:

a) Ο όρος  $U_1 Cu_1$  θεωρείται αμελητέος, γιατί  $U_2 > U_1$  και  $Cu_2 > Cu_1$ , άρα το γινόμενο  $U_1 Cu_1$  είναι πολύ μικρότερο αν συγκριθεί προς το  $U_2 Cu_2$ . Συγχρόνως το πρόσημο του  $U_2 Cu_2$  γίνεται θετικό.

- β) Από τη θεώρηση του σχήματος προκύπτει η σχέση  $Cu = U - W_{συνβ}$ .  
γ) Η ροή μάζας του ρευστού εκφράζεται σαν ροή δύκου από τη σχέση:

$$V = W(\pi D \nu \eta \mu \beta)$$

όπου:  $V = \rho \cdot g$ , όγκου,

$D = \text{διάμετρος του τροχού και}$

$B = \text{το βάθος της σχηματιζόμενης από τα πτερύγια του τροχού αύλακας (κάθετα προς τη } D\text{)}.$

δ) Η ενέργεια στη μονάδα του χρόνου που δίνεται από τη σχέση (3.1) τροποποιείται σε διαφορά πιέσεων, αν πολλαπλασιάσομε και τα δύο μέλη της επί  $\rho/m$ , όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του ρευστού.

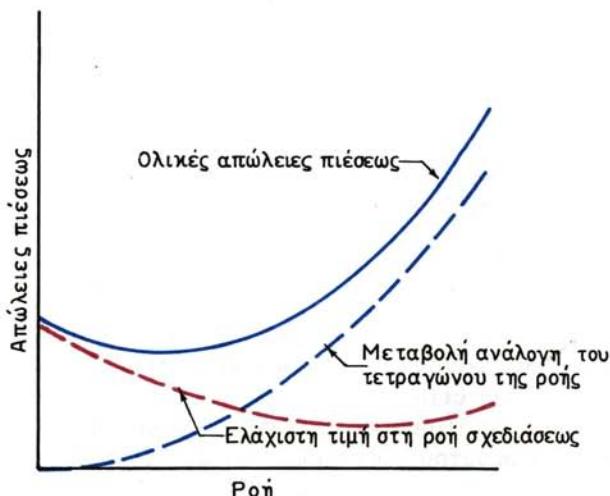
Έτσι καλήγομε στη σχέση:

$$\Delta P = \rho U^2 - \frac{\dot{m} U}{\pi D B e \beta} \quad (3.2)$$

Η σχέση αυτή συνδέει την ύψωση πιέσεως  $\Delta P$  και τη ροή μάζας του ρευστού  $\dot{m}$  για δεδομένη ταχύτητα  $U$  και γεωμετρία του στροφείου ( $B$ ,  $D$ ,  $e\beta$ ). Διευκρινίζεται ότι η γωνία  $\beta$  είναι ίση προς τη γωνία που σχηματίζουν τα άκρα των πτερυγώσεων του στροφείου και της εφαπτομένης στην περιφέρειά του (σχ. 3.3α) (για ακτινικές πτερυγώσεις έχουμε  $\beta = 90^\circ$ ). Από τη σχέση (3.2) προκύπτουν τα εξής:

- α) Υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ υψώσεως πιέσεως ( $\Delta P$ ) και ροής μάζας ( $\dot{m}$ ).
- β) Επιτρέπεται ο προσδιορισμός των απωλειών πιέσεως ( $\Delta P$ ) που δημιουργούνται κατά τη διέλευση του ρευστού από τον τροχό σαν συνάρτηση της ροής.
- γ) Επιτρέπεται ο προσδιορισμός των απωλειών πιέσεως ( $\Delta P$ ) σε συνάρτηση της ροής, όταν μεταβάλλεται παραμετρικά η ταχύτητα περιστροφής  $U$ .

Σε ό,τι αφορά τις απώλειες πιέσεως ( $\Delta P$ ), αυτές υποδιαιρούνται σε δύο κυρίως κατηγορίες. Στην πρώτη ανήκουν οι απώλειες που είναι μηδέν όταν δεν υφίσταται ροή και αυξάνουν με αυτή (συνήθως ανάλογα με το τετράγωνο της ροής). Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι απώλειες που υπάρχουν ανεξάρτητα από το ποσό της ροής και οι οποίες συνήθως ελαχιστοποιούνται πλησίον της περιοχής λειτουργίας του μηχανήματος. Στο σχήμα 3.3στ φαίνονται τα δύο είδη απωλειών σε συνάρτηση με τη ροή καθώς και το άθροισμά τους που δίνει τη συνολική απώλεια σε συνάρτηση με τη ροή.



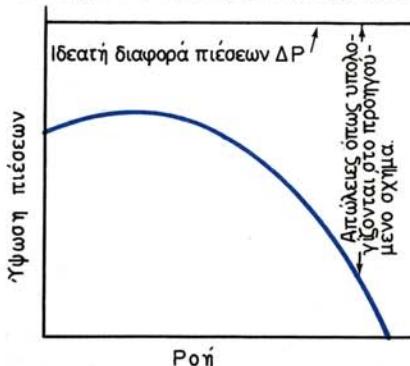
Σχ. 3.3στ.  
Είδη απωλειών.

Λέγοντας απώλεια πιέσεως ( $\Delta P$ ), με την έννοια που χρησιμοποιείται εδώ ο όρος, εννοούμε τη διαφορά επιδόσεων της πραγματικής μηχανής από εκείνη που θεωρητικά υπολογίζεται ότι θα έπρεπε να είχε. Έτσι, η θεωρητική διαφορά πιέσεων ( $\Delta P$ ) μπορεί να παρασταθεί σαν ευθεία γραμμή, ενώ η πραγματική σαν καμπύλη που προκύπτει από την ευθεία με αφαίρεση της συνολικής καμπύλης απωλειών του σχήματος 3.3στ.

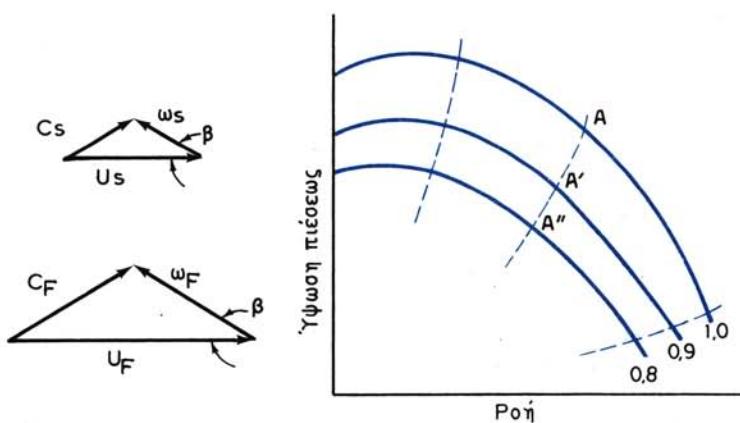
Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι:

- Η ροή είναι ανάλογη της σχετικής ταχύτητας  $W$ .
- Η διαφορά πιέσεων ( $\Delta P$ ) μεταβάλλεται όπως το τετράγωνο της σχετικής ταχύτητας  $W$ .

γ) Γνωρίζοντας τη χαρακτηριστική λειτουργίας ( $\Delta P$ ) — ροή για δεδομένη ταχύτητα  $W_s$ , με βάση τη δυναμική ομοιότητα, βρίσκεται η χαρακτηριστική λειτουργίας που αντιστοιχεί σε διαφορετική ταχύτητα  $W_F$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3η. Οι

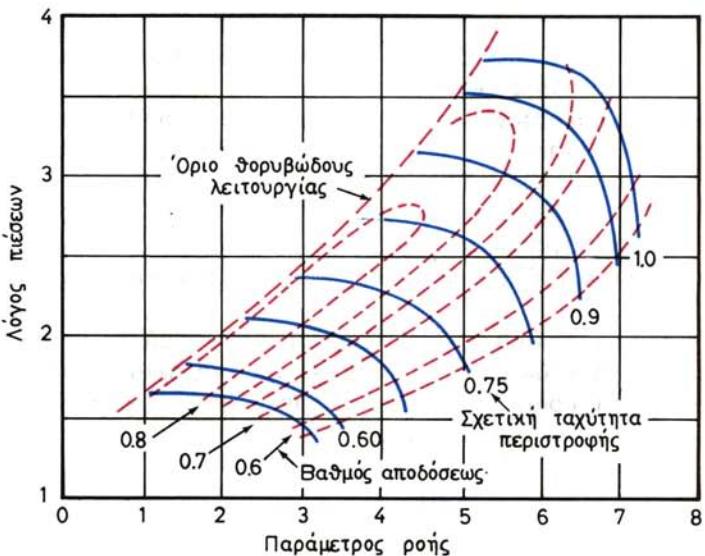


Σχ. 3.3ζ.  
Σχέση ροής και απώλειας πιέσεως.



Σχ. 3.3η.  
Πτώση πιέσεως για αλλαγή ταχύτητας.

πλήρεις γραμμές είναι καμπύλες πού αντιστοιχούν σε διαφορετικές ταχύτητες  $W$  με λόγο 0,8 και 0,9 ως προς μία ταχύτητα αναφοράς, ενώ οι διακεκομένες (γραμμή ΑΑ'Α'') είναι καμπύλες σταθερής αποδόσεως. Οι επιδόσεις ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή μπορούν να παρασταθούν κατά πολλούς τρόπους, περισσότερο διαδεδομένος όμως είναι αυτός του σχήματος 3.3θ.



Σχ. 3.30.  
Χαρακτηριστικές καμπύλες φυγοκεντρικού συμπιεστή.

Όπως φαίνεται, οι καμπύλες της διαφοράς πιέσεων ( $\Delta P$ ) και του βαθμού αποδόσεως είναι της ίδιας μορφής όπως αυτές που εξετάσθηκαν προηγουμένως (σχ. 3.3η), αν και μεταξύ των δύο σχημάτων 3.3η και 3.3θ υπάρχουν σημαντικές διαφορές. Κατ' αρχήν έχουν χρησιμοποιηθεί διαφορετικές συντεταγμένες, αντί δηλαδή της διαφοράς πιέσεων ( $\Delta P$ ) στον άξονα των τεταγμένων έχει τεθεί ο λόγος πιέσεων εξόδου - εισόδου και αντί της ροής χρησιμοποιείται η ονομαζόμενη παράμετρος ροής που ορίζεται από τη σχέση:

$$\text{Παράμετρος ροής (Π.Ρ.)} = \frac{BT^{1/2}}{P}$$

όπου:  $B$  = ροή βάρους,

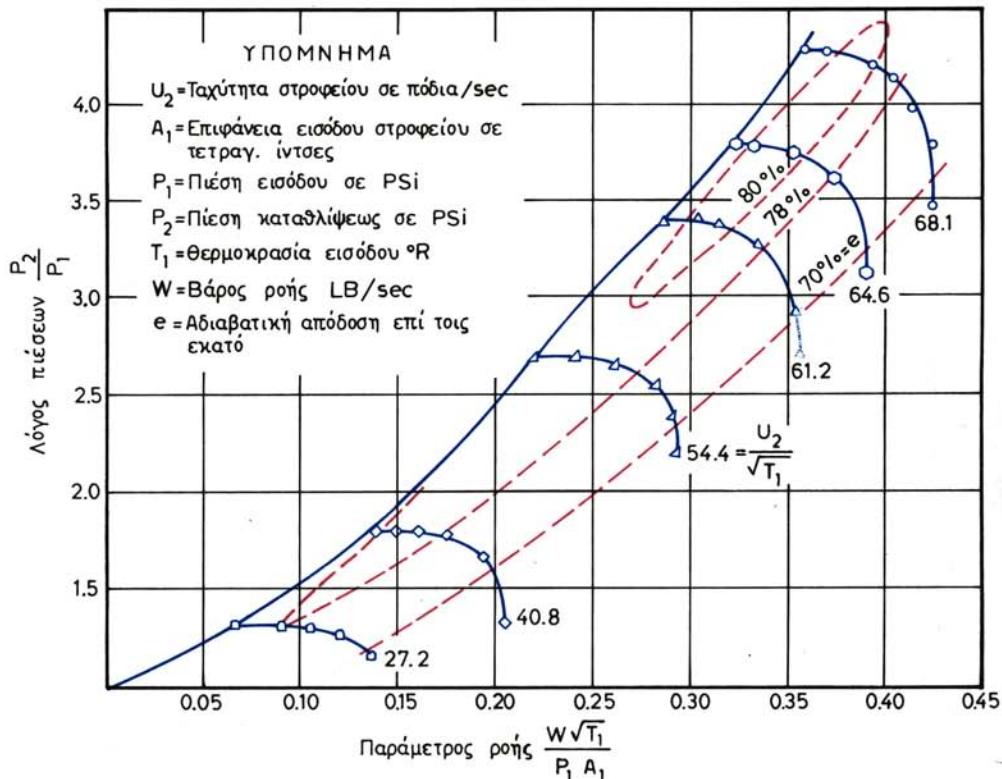
$P$  = πίεση εισόδου και

$T$  = απόλυτη θερμοκρασία εισόδου.

Το σημαντικότερο στοιχείο του σχήματος 3.3θ είναι η λεγόμενη οριακή γραμμή ασταθούς ισορροπίας (surge line). Αυτή παριστάνεται με διακεκομένη γραμμή και αποτελεί το αριστερό όριο των καμπυλών του σχήματος, παριστά δε το γεωμετρικό τόπο των σημείων για τα οποία ο λόγος πιέσεων και η παράμετρος ροής δεν συμβιβάζονται μεταξύ τους και η λειτουργία του μηχανήματος καθίσταται ασταθής, θορυβώδης και τελικά επικίνδυνη.

Η οριακή αυτή γραμμή συνήθως καθορίζεται εμπειρικά ή πειραματικά και αποτελεί σημαντικό στοιχείο των διαγραμμάτων λειτουργίας των στροβιλομηχανών. Στο σχήμα 3.3ι φαίνονται οι χαρακτηριστικές λειτουργίας ενός άλλου συμπιεστή σε άξονες συντεταγμένων λίγο διαφορετικούς από εκείνους του προηγούμενου σχήματος, με συνέπεια τη διαφορετική κλίση των καμπυλών.

Αν και η κατασκευή του φυγοκεντρικού συμπιεστή δεν είναι δυσχερής, η ανάγ-



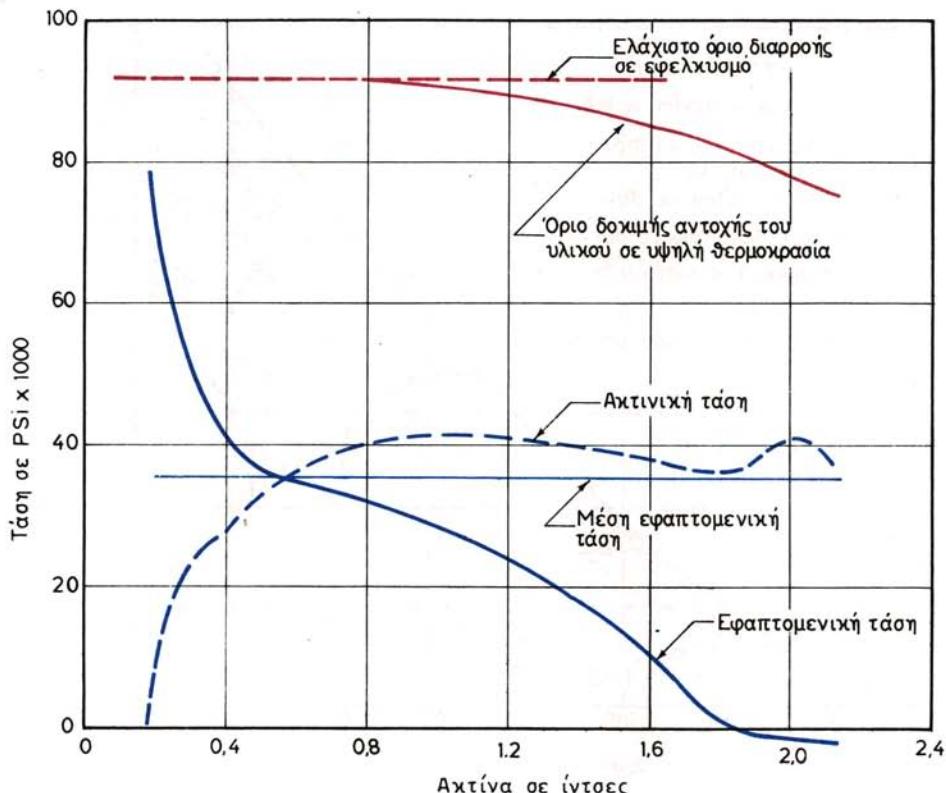
**Σχ. 3.3ι.**  
Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας συμπιεστή.

κη επιτεύξεως υψηλών λόγων πιέσεων και μεγάλων βαθμών αποδόσεως καθιστά πολύπλοκη τη σχεδίασή τους. Η πολυπλοκότητα της σχεδιάσεως οφείλεται στο γεγονός ότι η συνολική επίδοση και απόδοση του συμπιεστή δεν εξαρτάται μόνο από τη βελτιστοποίηση της αποδόσεως των επί μέρους τμημάτων του, αλλά και από τη μεταξύ των διαφόρων τμημάτων αλληλοεπίδραση. Πέρα από αυτό, οι αυξημένες συνθήκες καταπονήσεως των τμημάτων του συμπιεστή συνηγορούν για τον ακριβή υπολογισμό των τάσεων λειτουργίας, που οφείλονται τόσο στις υψηλές περιφεριακές ταχύτητες (άνω των 2100 ποδών ανά δευτ.), δύο και στις υψηλές θερμοκρασίες. Στο σχήμα 3.3ι παρουσιάζονται διαγραμματικά οι τάσεις αυτές και, όπως διαπιστώνεται, πλησιάζουν το όριο αντοχής επιμηκύνσεως τού υλικού.

Συγκριτικά με το συμπιεστή αξονικής ροής, που περιγράφεται παρακάτω, ο φυγοκεντρικός συμπιεστής παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

#### a) Πλεονεκτήματα.

- Απλούστερη καί πιό συμπαγής κατασκευή.
- Έχει μικρότερη ευαισθησία σε ρύπανση των διόδων διελεύσεως του αέρα.
- Παρουσιάζει ευρύτερη περιοχή ευσταθούς ισορροπίας λειτουργίας.



Σχ. 3.3α.

- Επιτυγχάνει υψηλότερους λόγους συμπιέσεως  $R$  ανά βαθμίδα.
- Είναι φθηνότερος.

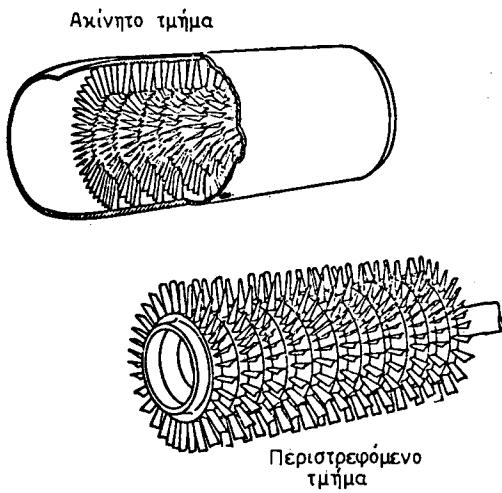
### β) Μειονεκτήματα.

- Έχει χαμηλότερο βαθμό αποδόσεως.
- Έχει σχετικά μεγαλύτερη διάμετρο στροφείου.
- Δεν είναι εύκολη η προσαρμογή του σε πολλές βαθμίδες.
- Η παροχική του ικανότητα (ροή αέρα) είναι σχετικά μικρότερη.

### 3.4 Συμπιεστές αξονικής ροής.

Στους συμπιεστές αξονικής ροής, όπως φανερώνει και η ονομασία τους, το ρευστό κινείται κατά τον άξονα της μηχανής στην περιοχή του χώρου που καταλαμβάνουν τα κινητά πτερύγια, δηλαδή μεταξύ κινητού (rotor) και ακίνητου (stator) μέρους. Στο σχήμα 3.4α φαίνονται τα παραπάνω τμήματα της μηχανής εξαρμοσμένα, ενώ στο σχήμα 3.4β φαίνεται εγκατάσταση αεριοστροβίλου με συμπιεστή αξονικής ροής και εξαρμοσμένο το κέλυφός του.

Η διαδρομή της ροής αποτελείται από αριθμό βαθμίδων (η βαθμίδα αποτελείται από μία περιφερειακή σειρά κινητών και την αντίστοιχη σειρά ακινήτων πτερυ-



Σχ. 3.4a.  
Συμπιεστής αξονικής ροής.

γίων), κάθε μια από τις οποίες αυξάνει διαδοχικά την πίεση του διερχόμενου αέρα. Έκτός από τις βαθμίδες, η διαδρομή των αερίων περιλαμβάνει και τη δίοδό τους μέσω οδηγητικών ακινήτων πτερυγίων, κυρίως πριν από την είσοδο και μετά την έξοδο από τις βαθμίδες. Ο αριθμός των βαθμίδων συνήθως είναι μεγαλύτερος από έξι (6) και μικρότερος από είκοσι (20), πράγμα που εξαρτάται από τον επιθυμητό λόγο πιέσεων R και την αεροδυναμική σχεδίαση των πτερυγίων.

Ο συμπιεστής αξονικής ροής είναι βασικά μηχάνημα σταθερής ροής δύκου, δηλαδή η ροή εξαρτάται κυρίως από τις στροφές και είναι ανεξάρτητη από τους λοιπούς παράγοντες, όπως είναι π.χ. ο λόγος πιέσεων.

Μια στοιχειώδης ανάλυση, όπως η αντίστοιχη για τους φυγοκεντρικούς συμπιεστές, επεξηγεί τις κυριότερες ποιοτικές διαφορές μεταξύ των δύο ειδών συμπιεστών. Έτσι, ξεκινώντας από τη σχέση (3.1) και με τη βοήθεια του σχήματος 3.4γ, έχομε:

$$C_{U_2} = U_2 - \frac{CA_2}{\epsilon \phi \beta_2}$$

(επειδή η  $C_1$  είναι κατά την αξονική διεύθυνση  $C_{U_1} = 0$ )

$$\rho C_A = \frac{\dot{m}}{A}$$

και, τελικά, ανάλογα με τη σχέση (3.2) έχομε:

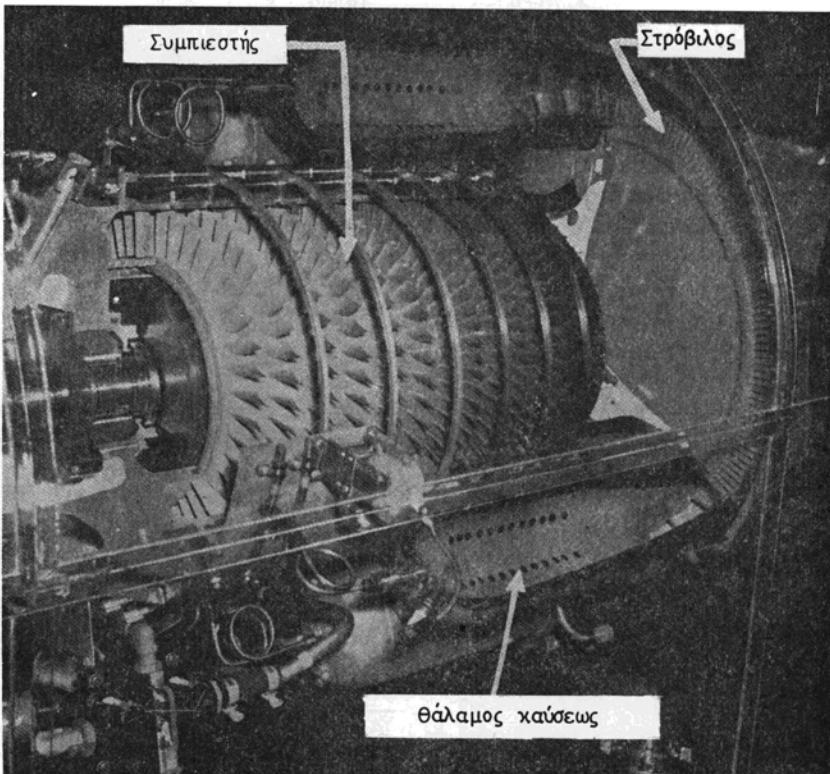
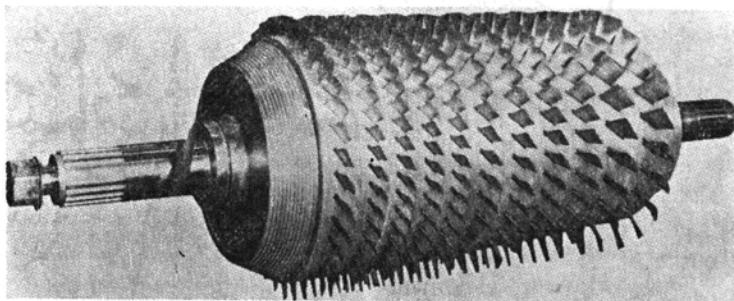
$$\Delta P = \rho U^2 - \frac{\dot{m} U}{A \epsilon \phi \beta} \quad (3.3)$$

όπου:  $C_A$  = αξονική συνιστώσα της ταχύτητας,

$A$  = επιφάνεια ροής,

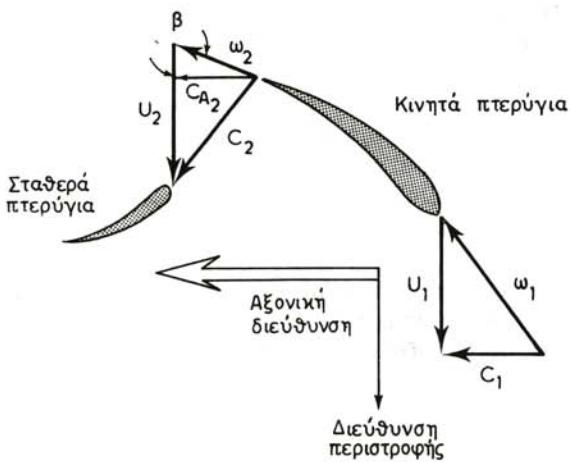
$\rho$  = πυκνότητα του ρευστού,

- $\dot{m}$  = μάζα ανά μονάδα χρόνου,  
 $U$  = γραμμική ταχύτητα του τροχού και  
 $\beta$  = γωνία ίση περίπου προς  $90^\circ$  που σχηματίζουν τα άκρα των πτερυγώ-  
 σεων του στροφείου και της εφαπτομένης στην περιφέρειά του.

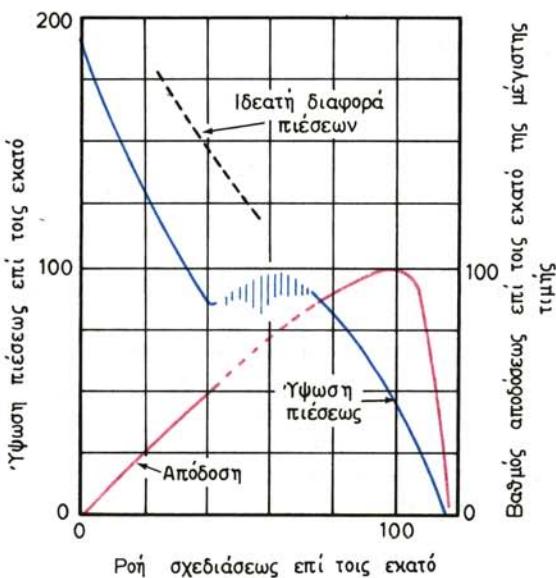


**Σχ. 3.4β.**  
Συμπιεστής αερονικής ροής.

Όπως φαίνεται από τη σχέση (3.3), υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ ( $\Delta P$ ) και  $m$  με έντονα αρνητική κλίση της κεμπύλης, οφειλόμενη στην τιμή της γωνίας  $\beta$ .



**Σχ. 3.4γ.**  
Διάγραμμα ταχυτήτων συμπιεστή αξονικής ροής.



**Σχ. 3.4δ.**  
Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας συμπιεστή αξονικής ροής.

Στο σχήμα 3.4δ παρουσιάζεται η καμπύλη διαφοράς πιέσεων ( $\Delta P$ ) για ένα συμπιεστή αξονικής ροής και μιας μόνο ταχύτητας λειτουργίας. Σημεία που χρειάζονται διευκρίνιση είναι τα ακόλουθα:

- Ως άξονες συντεταγμένων έχουν χρησιμοποιηθεί η ύψωση πιέσεως ( $\Delta P$ ) και η ροή, ως ποσοστά των αντιστοίχων τιμών σχεδιάσεως του συμπιεστή.
- Υπάρχουν, όπως και στην περίπτωση των φυγοκεντρικών συμπιεστών, απώλειες λόγω των οποίων η ύψωση πιέσεως ( $\Delta P$ ) είναι μικρότερη από τη θεωρητικά προβλεπόμενη.

γ) Η έντονα αρνητική κλίση της καμπύλης είναι φανερή.

δ) Όταν η ροή και η ύψωση πιέσεως είναι κατά τι μικρότερες από τις ονομαστικές τιμές 100%, παρουσιάζεται ασταθής «ισορροπία» στη λειτουργία του συμπιεστή, με αποτέλεσμα πτώση της ( $\Delta P$ ) και μηδενισμό της ροής. Το φαινόμενο οφείλεται στον καλούμενο αποχωρισμό ροής (separation of flow)\* και είναι ανάλογο της απώλειας στηρίξεως (stall) που υφίστανται τα αεροπλάνα. Η περιοχή της ασταθούς αυτής ισορροπίας παρουσιάζεται με διακεκομένη γραμμή στο σχήμα 3.4δ.

ε) Η καμπύλη του βαθμού αποδόσεως παρουσιάζει μια διακοπή στη συνέχειά της στην περιοχή ασταθούς ισορροπίας, ενώ η μέγιστη τιμή της συμπίπτει με την περιοχή λειτουργίας του συμπιεστή.

Στο σχήμα 3.4ε παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα λειτουργίας συμπιεστή αξονικής ροής με μεταβαλλόμενη παραμετρικώς τη σχετική ταχύτητα. Επίσης παρατηρείται ότι:

α) Οι καμπύλες μεταβολής της πιέσεως ( $\Delta P$ ) σε συνάρτηση με την ταχύτητα παρουσιάζουν περισσότερο απότομη κλίση απ' ό,τι στην περίπτωση του φυγόκεντρου συμπιεστή.

β) Οι καμπύλες αποδόσεως παρουσιάζονται σε μορφή «ισούψών» καμπυλών με μέγιστη τιμή γύρω στο 87%.

γ) Το αριστερό όριο των καμπυλών του σχήματος αποτελεί, όπως και στην περίπτωση των φυγοκέντρων συμπιεστών, η οριακή καμπύλη ασταθούς ισορροπίας (surge line), η οποία οφείλεται, όπως έχει εξηγηθεί, στο φαινόμενο αποχωρισμού της ροής.

δ) Το δεξιό όριο των καμπυλών του σχήματος αποτελεί η οριακή καμπύλη απότομου κραδασμού (shock limit). Αυτή είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων μέγιστης επιτρεπόμενης ροής για δεδομένη ανύψωση πιέσεως ( $\Delta P$ ) ή δεδομένο λόγο συμπιέσεως  $R$ . Το φαινόμενο είναι αποτέλεσμα της αδυναμίας αυξήσεως της ροής και της ταυτόχρονης δημιουργίας ισχυρών κραδασμών, όταν το κινούμενο ρευστό φθάσει την ταχύτητα του ήχου. Βέβαια, το φαινόμενο αυτό μπορεί να παρατηρηθεί και σε φυγόκεντρους συμπιεστές, αλλά η εμφάνισή του είναι πιο συνηθέστερη και περισσότερο ανεπιθύμητη στους συμπιεστές αξονικής ροής.

Τά διάφορα είδη συμπιεστών αξονικής ροής διαχωρίζονται συνήθως μεταξύ τους ανάλογα με το ποσοστό υψώσεως της πιέσεως ( $\Delta P$ ) που δημιουργείται σε κάθε βαθμίδα του κινητού (rotor) και του ακίνητου (stator) τμήματος.

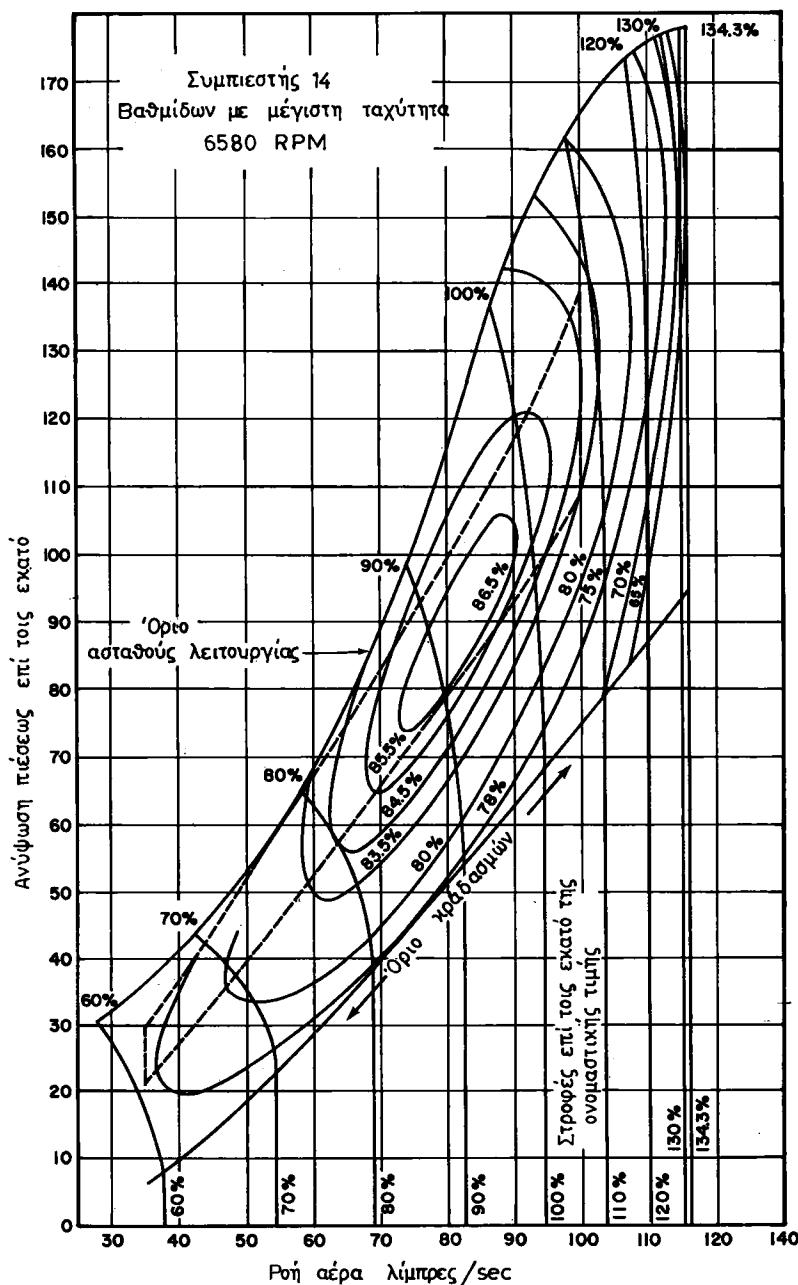
Έτσι, οι συμπιεστές διακρίνονται σε:

- α) Συμμετρικής ροής.
- β) Ασύμμετρης ροής.
- γ) Τυρβώδους ροής (vortex).

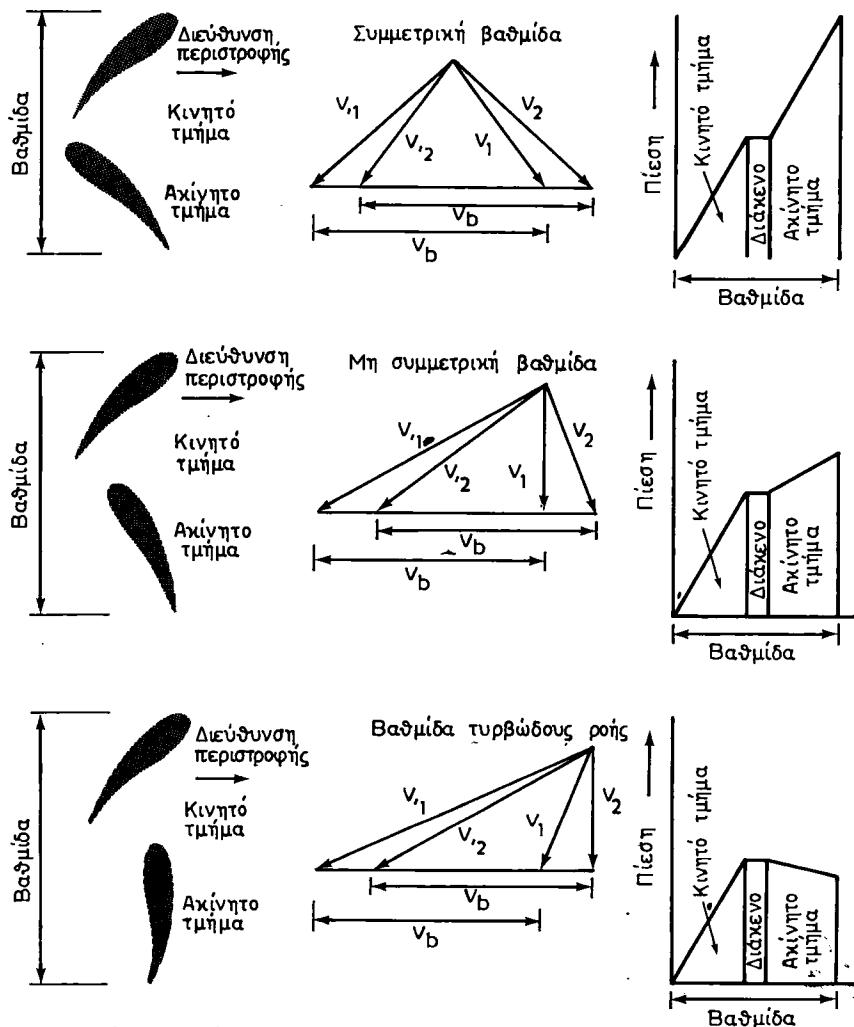
Η διάταξη των πτερυγίων, τα τρίγωνα ταχυτήτων και η ύψωση της πιέσεως **ανά βαθμίδα** για τα τρία είδη των συμπιεστών φαίνεται στο σχήμα 3.4στ.

---

\* Ο αποχωρισμός της ροής είναι σύνθετο υδρο-αεροδυναμικό φαινόμενο που δεν θα εξετασθεί περισσότερο. Οφείλει την ονομασία του στο γεγονός ότι το ρευστό δεν ακολουθεί κατά τη ροή του τη μορφή του πτερυγίου αλλά απομακρύνεται από την επιφάνειά του.



**Σχ. 3.4ε.**  
Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας συμπιεστή αξονικής ροής.



$V$  = Απόλυτη ταχύτητα

$V_e$  = Σχετική ταχύτητα

$v_b$  = Ταχύτητα περιστροφής

### Σχ. 3.4στ.

Βαθμίδες συμπιεστών αξονικής ροής.

#### Βαθμίδα συμμετρικής ροής.

Η ύψωση της πιέσεως ( $\Delta P$ ) είναι η ίδια (για δεδομένη ακτινική απόσταση από τον άξονα) τόσο στο κινητό όσο και στο ακίνητο τμήμα της βαθμίδας και συνεπώς τα αντίστοιχα τρίγωνα ταχυτήτων παρουσιάζουν τη συμμετρία του σχήματος.

#### Βαθμίδα ασύμμετρης ροής.

Η ύψωση της πιέσεως ( $\Delta P$ ) είναι διαφορετική (για δεδομένη ακτινική απόσταση

από τον άξονα) στο κινητό και ακίνητο τμήμα της βαθμίδας και γι' αυτό τα τρίγωνα ταχυτήτων είναι ασύμμετρα.

### **Βαθμίδα τυρβώδους ροής (vortex).**

Σ' αυτή, ορίζεται ότι η γωνιακή ποσότητα της κινήσεως (օρμής) κάθε τμήματος του ρευστού παραμένει σταθερή. Το είδος αυτό της ροής έχει ως αποτέλεσμα μικρότερες απώλειες και υψηλότερους βαθμούς αποδόσεως. Συνήθως απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό βαθμίδων από ό,τι οι άλλοι τύποι. Μπορεί να θεωρηθεί ως μια ειδική περίπτωση ασύμμετρης ροής.

Για σύγκριση, για να επιτευχθεί δεδομένη τιμή του λόγου συμπιέσεως, απαιτούνται 14,24 και 31 βαθμίδες για την περίπτωση συμμετρικής, ασύμμετρης και τυρβώδους ροής αντίστοιχα. Οι σύγχρονοι αεριοστρόβιλοι κατασκευάζονται κατά τέτοιο τρόπο που να συνδυάζουν τον υψηλό βαθμό αποδόσεως των βαθμίδων τυρβώδους ροής και συγχρόνως να επιτυγχάνουν τις υψηλές πιέσεις των βαθμίδων σύμμετρης και ασύμμετρης ροής.

Σε ό,τι αφορά τη σχεδίαση, ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα είναι η αποφυγή υπερφορτώσεως των πτερυγίων, και κυρίως των κινητών, καθώς και η όλη σχεδίασή τους, ώστε να ικανοποιούνται οι ακόλουθες αλληλοσυγκρουόμενες απαιτήσεις:

- Διατήρηση της μορφής όπως επιβάλλεται από την αεροδυναμική προς επίτευξη μέγιστης αποδόσεως.
- Αποφυγή υψηλών καταπονήσεων.
- Δυνατότητα εύκολης κατασκευής.

Για τη σχεδίαση και κατασκευή των συγχρόνων αεριοστροβίλων χρησιμοποιούνται κατάλληλα αξιοποιημένα και προσαρμοσμένα τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την έρευνα της αεροναυπηγικής και του διαστήματος. Όλα τα πτερύγια π.χ. έχουν αεροτομές (τομή  $90^{\circ}$  προς την κατακόρυφο) της σειράς NASA ή άλλων, ανάλογης τυποποιήσεως, ή για την κατασκευή τους ευρύτατα χρησιμοποιούνται μεταλλοκράματα, τα οποία πρώτη φορά είχαν χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή αεροπλάνων ή διαστημοπλοίων.

### **3.5 Στρόβιλοι.**

Θα εξετασθούν εδώ λεπτομερέστερα οι στρόβιλοι\* που χρησιμοποιούνται σε ναυτικούς αεριοστροβίλους καθώς και η συνεργασία τους με τα λοιπά μηχανήματα και συσκευές της εγκαταστάσεως.

Στο στρόβιλο, η ενέργεια των θερμών και υψηλής πιέσεως καυσαερίων μετατρέπεται σε μηχανικό έργο, ένα μεγάλο ποσοστό του οποίου (περίπου τα  $3/4$ ) χρησιμοποιείται για την κίνηση του συμπιεστή και των λοιπών παρελκομένων της μηχανής, ενώ το υπόλοιπο απολαμβάνεται ως αφέλιμο έργο άξονα.

Όπως και οι συμπιεστές έτσι και οι στρόβιλοι διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

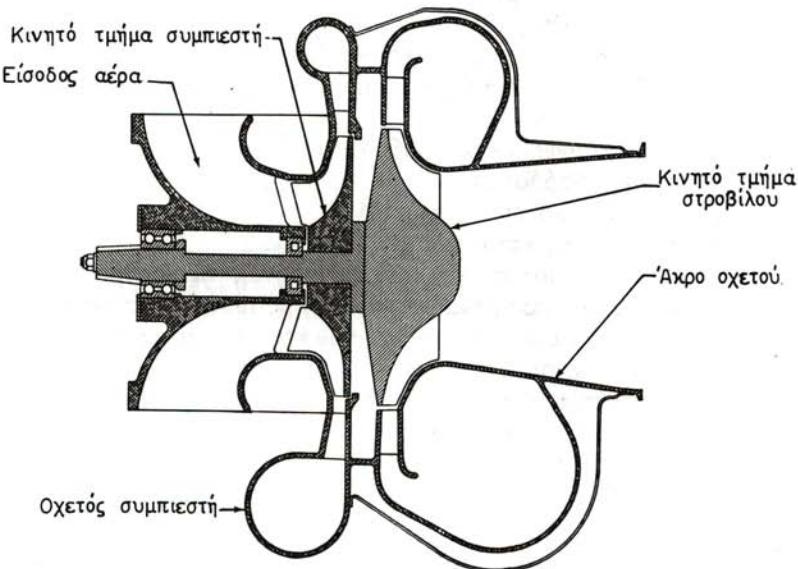
---

\* Διευκρινίζεται ότι με τον όρο **στρόβιλος** εννοείται το κινητήριο μέρος ενώ ο όρος **αεριοστρόβιλος** δηλώνει το σύνολο της κύριας μηχανής, δηλαδή στρόβιλο, θάλαμο καύσεως και συμπιεστή. Οι στρόβιλοι ατμού σε αντιδιαστολή ονομάζονται **ατμοστρόβιλοι**.

- Ακτινικής ροής: λειτουργούν με την ίδια αρχή, όπως και οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές (αλλά κατ' αντίστροφο τρόπο).
- Αξονικής ροής: εντελώς ανάλογοι των ίδιας ονομασίας συμπιεστών.

Οι **ακτινικής** ροής έχουν συνήθως ροή διευθυνόμενη πρός τα μέσα και σπανίτερα προς τα έξω, ενώ οι **αξονικής** ροής χαρακτηρίζονται ως δράσεως (impulse) ή αντιδράσεως (reaction) κατά τον ίδιο τρόπο που χαρακτηρίζονται και οι ατμοστροβίλοι, ανάλογα δηλαδή από το ποσοστό ενέργειας ανά βαθμίδα που αποδίδεται στα κινητά πτερύγια.

Η χρήση στροβίλων **ακτινικής** ροής έχει περιορισθεί σήμερα στις ναυτικές εγκαταστάσεις, μόνο σε βοηθητικές χρήσεις μικρής ιπποδυνάμεως. Οι στρόβιλοι αυτοί είναι κατασκευαστικά παρόμοιοι προς τους φυγόκεντρους συμπιεστές, ενώ τα καυσαέρια εκτονώνονται κατά την έννοια της ακτίνας προς τα μέσα, προς το μέρος του άξονα. Στο σχήμα 3.5α φαίνεται η τομή στροβίλου ακτινικής ροής με τον αντίστοιχο φυγόκεντρο συμπιεστή του.



**Σχ. 3.5α.**  
Στρόβιλος αξονικής ροής με το φυγόκεντρο συμπιεστή του.

Οι στρόβιλοι **αξονικής** ροής, εξεταζόμενοι από καθαρά σχεδιαστική πλευρά, διακρίνονται σε **υψηλής ενέργειας βαθμίδα** και **χαμηλής ενέργειας βαθμίδα**. Από αυτούς, οι πρώτοι αξιοποιούν την διατιθέμενη ενέργεια των καυσαερίων σε πολύ λίγες βαθμίδες υψηλής ταχύτητας, με αποτέλεσμα μεγάλη θερμική πτώση ανά βαθμίδα και χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Οι δεύτεροι έχουν περισσότερες βαθμίδες χαμηλότερης ταχύτητας, μικρότερης θερμικής πτώσεως ανά βαθμίδα και υψηλοτέρων θερμοκρασιών λειτουργίας.

Σχετική με τα παραπάνω είναι και η χρησιμοποίηση του όρου της «ειδικής ταχύτητας» καθώς και η επιλογή με βάση αυτή του βέλτιστου (optimum) τύπου στροβίλου για κάθε χρήση. Η «ειδική ταχύτητα» (specific speed) στη γενικότερη μορφή της δίνεται από τη σχέση:

$$\theta = \frac{N \sqrt{\frac{Ve}{550}}}{H^{3/4}}$$

όπου:  $\theta$  = ειδική ταχύτητα,

$N$  = στροφές ανά λεπτό,

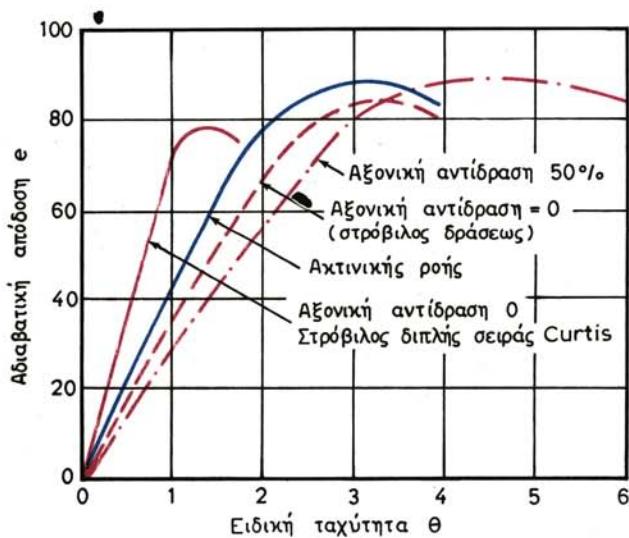
$V$  = ροή όγκου αερίων (κυβικά πόδια ανά δευτερόλεπτο  $ft^3 \cdot sec^{-1}$ ),

$H$  = στήλη αδιαβατικής εκτονώσεως σε πόδια και

$e$  = βαθμός αδιαβατικής αποδόσεως.

Στο σχήμα 3.5β παρουσιάζονται χαρακτηριστικές καμπύλες βαθμού αποδόσεως, ανάλογα με την ειδική ταχύτητα  $\theta$  για τα διάφορα είδη στροβίλων.

Έτσι, για δεδομένο πρόβλημα, είναι γνωστά τα διάφορα στοιχεία από τα οποία εξαρτάται η ειδική ταχύτητα. Καθίσταται λοιπόν δυνατός ο υπολογισμός της τιμής της οπότε, από αυτήν, το είδος του στροβίλου που θα επιλεγεί προκύπτει από το ανωτέρω σχήμα. Άν π.χ.  $\theta=1$ , τότε ο στρόβιλος αξονικής ροής δράσεως δύο βαθμίδων Curtis έχει το μεγαλύτερο βαθμό αποδόσεως, ενώ για  $\theta=5$  συνιστάται η χρησιμοποίηση στροβίλου αξονικής ροής με βαθμό αντιδράσεως 0,5. Διευκρινίζεται ότι ο χρησιμοποιούμενος σαν άξονας των τεταγμένων βαθμός θερμοδυναμικής αποδόσεως έχει σχετική αξία, γιατί ο βαθμός αποδόσεως κάθε στροβίλου εξαρτάται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά σχεδιάσεως και κατασκευής του.



Σχ. 3.5β.

Καμπύλες αποδόσεως ανάλογα με την ειδική ταχύτητα.

### 3.5.1 Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά στροβίλων ναυτικών εγκαταστάσεων.

Αν και υπάρχουν πολλές ομοιότητες μεταξύ στροβίλων και ατμοστροβίλων τόσο από την πλευρά σχεδιάσεως και κατασκευής όσο και από την πλευρά χαρακτηρι-

στικών λειτουργίας, υπάρχουν επίσης και σημαντικές διαφορές και ιδιαιτερότητες του κάθε είδους. Υπενθυμίζεται η αντιδιαστολή μεταξύ στροβίλου, αεριοστροβίλου και ατμοστροβίλου που ορίσθηκε στα προηγούμενα.

Έτσι, ο στρόβιλος που χρησιμοποιεί καυσαέρια σάν θερμοδυναμικό μέσο διαφέρει από τον ατμοστρόβιλο κυρίως στο υλικό κατασκευής των πτερυγίων, στους τρόπους και τα μέσα απαγωγής της αναπτυσσόμενης θερμότητας, στις θερμικές καταπονήσεις και στις προκαλούμενες από αυτές θερμικές παραμορφώσεις των στοιχείων της κατασκευής, στο μεγαλύτερο αριθμό και το μέγεθος των πτερυγίων και προφυσίων από τα οποία διέρχεται η πολύ μεγαλύτερη ποσότητα του θερμοδυναμικού μέσου, καθώς και σε άλλα σημεία.

Οι βασικές απαιτήσεις είναι περίπου κοινές, δηλαδή μικρό βάρος κατασκευής και, όσο είναι δυνατό, μικρός όγκος, υψηλός βαθμός αποδόσεως, ικανότητα λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλα χρονικά διαστήματα, αξιοπιστία στη λειτουργία και εύκολη συντήρηση.

Από τα μέχρι στιγμής αποτελέσματα των στροβίλων που έχουν χρησιμοποιηθεί στην πράξη τόσο για ναυτική όσο και για αεροπορική κυρίως χρήση, έχει καταδειχθεί ότι ο ρυθμιστικός παράγοντας της συντηρήσεως και της ενεργού χρησιμοποίησεως των αεριοστροβίλων είναι η διάρκεια ζωής των πτερυγίων των στροβίλων, η οποία εξαρτάται από το είδος του υλικού κατασκευής τους και από τη θερμοκρασία  $T_3$  εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο (κατά αντίστροφη σχέση).

Ο καθορισμός του υλικού κατασκευής των πτερυγίων εξαρτάται από τις ιδιαιτερες απαιτήσεις κάθε προβλήματος σε συνδυασμό προς τις προσφερόμενες δυνατότητες του υλικού, αφού ληφθούν υπόψη κυρίως οι ακόλουθες ιδιότητές του:

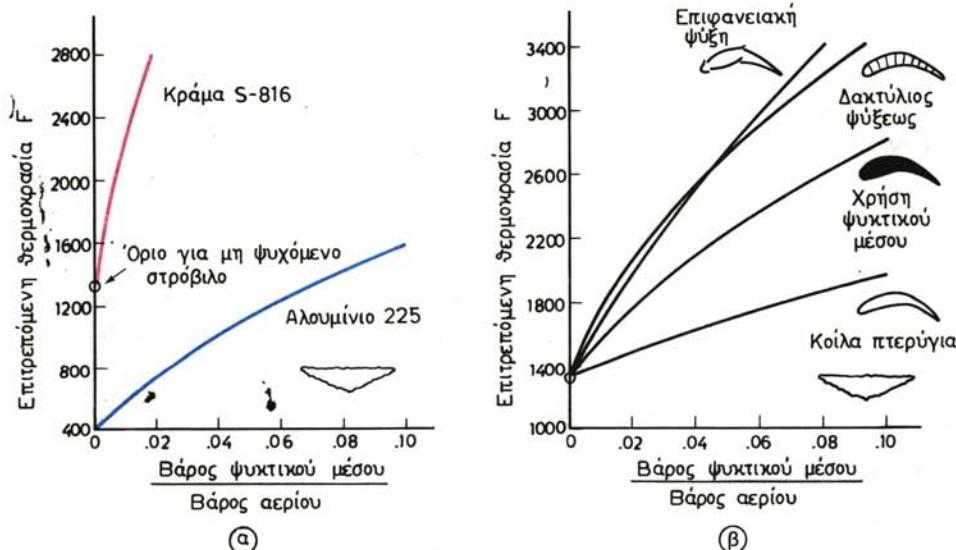
- Επίδραση της θερμοκρασίας στο όριο μηχανικής διαρροής.
- Ερπυσμός (μεταβολή μόνιμης παραμορφώσεως σε συνάρτηση με το χρόνο).
- Σχέση των ορίων διαρροής και θραύσεως.
- Αντοχή σε απότομες μηχανικές και θερμικές καταπονήσεις (shock).
- Αντοχή σε συνθήκες διαβρωτικού περιβάλλοντος.
- Αντοχή σε κραδασμούς.

Όπως αναφέρθηκε ήδη, με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων  $T_3$  στο στρόβιλο, ελαπτώνεται η διάρκεια ζωής των πτερυγίων. Εξ άλλου στο Δεύτερο κεφάλαιο, περί θερμικών κύκλων, έχει αποδειχθεί ότι ο θερμικός βαθμός αποδόσεως τους εξαρτάται έντονα από τη θερμοκρασία  $T_3$  και αυξάνει μέσα αυτήν. Γι' αυτό καί συνιστάται η κατά τό δυνατόν αύξηση της  $T_3$ . Η καύση των χρησιμοποιουμένων υδρογονανθράκων σε εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων προκαλεί δημιουργία θερμοκρασιών  $3500^{\circ} - 4000^{\circ}\text{F}$ , ενώ τα διατιθέμενα υλικά κατασκευής δεν συνιστάται να εκτίθενται συνεχώς σε θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους  $1800^{\circ}\text{F}$ .

Για μερική αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, ένα μεγάλο ποσοστό του χρησιμοποιημένου από την εγκατασταση αέρα διατίθεται, όπως θα επεξηγηθεί στο σχετικό με τους θαλάμους καύσεως κεφάλαιο, για να ψύξει τα θερμά προϊόντα της καύσεως.

Συμπερασματικά, ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα στη χρησιμοποίηση των αεριοστροβίλων είναι η εξεύρεση υλικών ή και μεθόδων ψύξεως που θα καθιστούν δυνατή τη χρησιμοποίηση υψηλοτέρων θερμοκρασιών  $T_3$  εισόδου των καυ-

σαερίων στο στρόβιλο, ώστε να βελτιώθει ο βαθμός αποδόσεως και η ειδική ισχύς του. Η προσπάθεια τών ειδικών στρέφεται πρός τήν ευρεία επιστημονική έρευνα για την ψύξη των πτερυγίων των στροβίλων. Μεταξύ των διαφόρων τρόπων ψύξης που εξετάζονται ή και εφαρμόζονται ήδη περιλαμβάνονται η κατασκευή κοίλων πτερυγίων, η επιφανειακή ψύξη των πτερυγίων περιφερειακά ή η παρεμβολή ψυκτικού μέσω πορώδους υλικού κατασκευής των πτερυγίων. Το σημαντικότερο συμπέρασμα από τα μέχρι τώρα αποτελέσματα της έρευνας στον τομέα αυτό είναι ότι υπάρχουν ακόμη ευρύτατα περιθώρια βελτιώσεως. Στο σχήμα 3.5γ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ερευνών που έγιναν από τη NASA. Στο αριστερό φαίνεται η επιτρεπόμενη ανύψωση της θερμοκρασίας  $T_3$  σε δύο διαφορετικά υλικά κατασκευής με τη βοήθεια ψύξης με νερό και στο δεξιό η επιτρεπόμενη ανύψωση της θερμοκρασίας  $T_3$  για το ίδιο υλικό κατασκευής των πτερυγίων (κράμα S 816) που ψύχεται με αέρα, αλλά για διαφορετικές αεροτομές των πτερυγίων. Βέβαια, πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψη το γεγονός ότι η ψύξη των πτερυγίων καθιστά πολυπλοκότερη την εγκατάσταση των αεριοστροβίλων και ότι αν δεν εφαρμοσθεί κατάλληλα σε κάθε περίπτωση (σχεδιαστικά και κατασκευαστικά) μπορεί να οδηγήσει στα εντελώς αντίθετα από τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα.



Σχ. 3.5γ.  
Η εξέλιξη των υλικών των αεριοστροβίλων.

Ένας άλλος τομέας της διεξαγόμενης έρευνας είναι η εξέταση και η δημιουργία υλικών υψηλού σημείου τήξεως, όπως πυρίμαχων, κεραμικών, τα ονομαζόμενα cermaic από το συνδυασμό των λέξεων κεραμικά (ceramics) και μέταλλα (metal) ή υλικών πού δημιουργούνται με σύνθεση κόνεων. Από τα παραπάνω έχει προκύψει ότι κυρίως τα υλικά cermaics και τα προερχόμενα από σύνθεση κόνεων θα ανυψώνουν σημαντικά την επιτρεπόμενη θερμοκρασία συνεχούς λειτουργίας των στροβίλων, ενώ συγχρόνως παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πτερυγίων είναι φθηνές και εύκολα διαθέσιμες.

Αν και το θέμα της ψύξεως των πτερυγίων είναι ίσως το σημαντικότερο πρόβλημα των στροβίλων, υπάρχουν προφανώς και άλλα, όπως η πλήρως αεροδυναμική σχεδίαση των πτερυγίων, ο περιορισμός των απωλειών, ο περιορισμός των δημιουργουμένων τάσεων λειτουργίας σε αποδεκτά για την αξιοπιστία και τη διάρκεια ζωής του μηχανήματος επίπεδα κλπ.

Έτσι, η πλήρης αεροδυναμική σχεδίαση των πτερυγίων\* είναι απόλυτα αναγκαία για διατήρηση υψηλού βαθμού αποδόσεως και κυρίως στην περίπτωση βαθμίδων «υψηλής ενέργειας» που συνεπάγονται ταχύτητες θερμοδυναμικού μέσου συνηθέστατα υπερηχητικές.

Τα συνηθέστερα είδη απωλειών, των οποίων επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση με κατάλληλη σχεδίαση, είναι:

- Απώλειες τριβής μεταξύ του θερμοδυναμικού μέσου και των επιφανειών διελεύσεως του.
- Απώλειες λόγω αποχωρισμού της ροής ή λόγω δημιουργίας άλλων αεροδυναμικών φαινομένων, όπως στροβιλισμοί, ανάμιξη γραμμών νηματικής ροής κλπ.
- Απώλειες λόγω διαρροών, κυρίως στα σημεία στεγανότητας προφυσίων, κελύφη κλπ.
- Απώλειες λόγω υψηλών ταχυτήτων του θερμοδυναμικού μέσου.
- Απώλειες λόγω ανομοιομορφίας τής διατιθέμενης ενέργειας σε περιπτώσεις μεγάλης περίσσειας αέρα ή ανομοιόμορφης καύσεως.

Τέλος, οι τάσεις λειτουργίας υπολογίζονται για τις ακόλουθες συνθήκες λειτουργίας:

- Ταχύτητα που αντιστοιχεί στο 110% της μέγιστης επιτρεπόμενης, με σύγχρονες συνθήκες θερμοκρασίας η οποία αντιστοιχεί σε πλήρες φορτίο.
- Θερμοκρασία λειτουργίας μεγαλύτερη κατά 15% όσης αντιστοιχεί σε πλήρη φόρτο και σύγχρονη μέγιστη ταχύτητα.

Επειδή οι τάσεις λειτουργίας πρέπει οπωσδήποτε να διατηρούνται μικρότερες από ένα επιτρεπόμενο όριο που προσδιορίζεται από τα διατιθέμενα υλικά κατασκευής και το συντελεστή ασφαλείας, επιβάλλεται η προσεκτική σχεδίαση του στροβίλου, ώστε οι τάσεις λειτουργίας να παραμένουν στο χαμηλότερο δυνατό επίπεδο.

### **3.5.2 Στοιχειώδης ανάλυση των στροβίλων.**

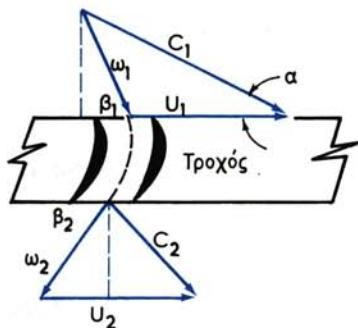
Η ανάλυση που ακολουθεί αφορά κυρίως τους στροβίλους αξονικής ροής που είναι και ο σχεδόν αποκλειστικά απαντώμενος τύπος σε ναυτικές εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων.

Η ανάλυση θεωρεί, για λόγους απλουστεύσεως, ότι το θερμοδυναμικό μέσο ακολουθεί πλήρως και αποκλειστικά τη διαδρομή που καθορίζεται από τα πτερύγια του στροβίλου. Ως αφετηρία για την ανάλυση θα χρησιμοποιηθεί η σχέση (3.1) που βρήκαμε προηγουμένως και το σχήμα 3.5δ.

Το διάνυσμα  $C_1$ , παριστάνει τη δέσμη ενός ρευστού όπως εξέρχεται από μη εμφανόμενο προφύσιο. Η δέσμη προσκρούει στα πτερύγια (δύο από τα οποία φαίνονται στο σχήμα) του περιστρεφόμενου τροχού με γραμμική ταχύτητα  $U_1$  στο μέ-

---

\* Επισημαίνεται ότι με τον όρο πτερύγια εννοούμε τόσο τα κινητά όσο και τα ακίνητα.



**Σχ. 3.56.**  
Διάγραμμα ταχυτήτων στροβίλου.

σού ύψος του πτερυγίου. Η εφαπτομενική (οριζόντια στο σχήμα) συνιστώσα της  $C_1$  είναι η  $Cu_1$ , καί η **σχετική** ταχύτητα του ρευστού ως προς τον κινούμενο τροχό είναι  $W_1$ . Τα αντίστοιχα μεγέθη στην έξοδο των πτερυγίων φαίνονται στο κάτω μέρος του σχήματος με το δείκτη 2.

Όπως προκύπτει από το σχήμα 3.5δ, ισχύουν οι σχέσεις:

$$C_A^2 = C^2 - Cu^2$$

$$C_A^2 = W^2 - (U - Cu)^2$$

όπου  $C_A =$  η αξονική συνιστώσα της  $C$ .

Επειδή, όπως είναι φανερό, από το συνδυασμό των παραπάνω σχέσεων ισχύει και η σχέση:

$$Cu = 1/2[C^2 + U^2 - W^2]$$

τότε με αντικατάσταση και στα δύο μέρη της σχέσεως (3.1), προκύπτει τελικά:

$$E = \dot{m}[(C_1^2 - C_2^2) + (W_2^2 - W_1^2)] \quad (3.4)$$

Στη σχέση αυτή παρατηρούμε ότι:

α) Ο όρος  $(C_1^2 - C_2^2)$  παριστάνει την εναλλαγή κινητικής ενέργειας της δέσμης του ρευστού ή εναλλαγή κινητικής ενέργειας λόγω «δράσεως».

β) Ο όρος  $(W_2^2 - W_1^2)$  παριστάνει την εναλλαγή κινητικής ενέργειας λόγω της δημιουργούμενης αντιδράσεως, η οποία προκύπτει από την αύξηση της σχετικής ταχύτητας του ρευστού καθώς αυτό διέρχεται από τον τροχό. Άν ο όρος αυτός ισούται με μηδέν, δηλαδή  $W_2 = W_1$ , τότε ο στρόβιλος ονομάζεται στρόβιλος **δράσεως**, ενώ, αν  $W_2 \neq W_1$ , τότε μιλάμε για **στρόβιλο αντιδράσεως** (κάποιου ποσοστού ανάλογα με τη συμμετοχή του στην όλη εναλλαγή ενέργειας). Το σχήμα 3.5δ αφορά την περίπτωση μηδενικής αντιδράσεως.

γ) Η σχέση (3.4) περιλαμβάνει και όρο  $(U_1^2 - U_2^2)$ , ο οποίος ισούται με μηδέν προκειμένου για αξονική ροή.

Ανεξάρτητα από την ύπαρξη μόνο δράσεως ή και αντιδράσεως, το βασικό έργο του στροβίλου είναι η πλήρης, κατά το δυνατό, απορρόφηση της κινητικής ενέργειας η οποία διατίθεται στο προσπίπτον ρευστό. Είναι όμως φανερό από το σημαντικό μέγεθος των διανυσμάτων  $C_2$  και  $W_2$ , ότι αρκετό ποσοστό της διατίθέμενης από το ρευστό κινητικής ενέργειας υπάρχει και μετά τη διέλευσή του από τον τροχό, χωρίς να απορροφηθεί από αυτόν. Αν δεν υπάρχει στη συνέχεια μια επόμενη βαθμίδα όπου να αξιοποιείται η ενέργεια που δεν έχει απορροφηθεί, η ενέργεια

αυτή χάνεται. Επομένως αποτελεί απώλεια η οποία μειώνει το βαθμό αποδόσεως του στροβίλου.

Ο σχεδιαστής συνεπώς του στροβίλου εξετάζει τρόπους ελαχιστοποιήσεως της ενέργειας που μένει αναξιοποίητη, ή χρησιμοποιώντας το σχήμα 3.5δ, προσπαθεί να καταστήσει το διάνυσμα  $C_2$  δύσιο το δυνατό μικρότερο. Συναφής προς τα παραπάνω είναι η χρησιμοποίηση του όρου «αξιοποίηση» όπου από τον ορισμό, ισχύει:

$$\text{αξιοποίηση} \quad \langle\epsilon\rangle = \frac{U(C_1 - C_2)}{\frac{1}{2} C_1^2}$$

Σημειώνεται ότι ο αριθμητής του όρου είναι το δεξιό μέλος της σχέσεως (3.1), ενώ ο παρονομαστής είναι η κινητική ενέργεια της προσπίπουσας στον τροχό δέσμης του ρευστού. Η φυσική σημασία του όρου « $\epsilon$ » είναι το ποσοστό της διατιθέμενης στο θερμοδυναμικό μέσον κινητικής ενέργειας, το οποίο αξιοποιείται κατά τη διέλευσή του από τον τροχό του στροβίλου.

Είναι επομένως επιθυμητό η τιμή του « $\epsilon$ » να είναι κατά το δυνατό μέγιστη και αυτό εξαρτάται από τη βέλτιστη τιμή του λόγου της ταχύτητας του τροχού  $U$  προς την ταχύτητα της δέσμης του ρευστού  $C_1$ .

Για τη συνήθη στις πρακτικές εφαρμογές περίπτωση που  $\beta_1 = \beta_2$  και από θεώρηση του σχήματος 3.5δ, προκύπτουν οι σχέσεις:

$C_{11} = C_1$  συνα και  $C_{21} = -(C_1 \text{ συνα} - 2U)$ , οπότε, αντικαθιστώντας στον ορισμό της αξιοποίησεως Ε παίρνομε:

$$\epsilon = \frac{4U}{C_1} \left[ \text{συνα} - \frac{U}{C_1} \right] \quad (3.5)$$

Η σχέση (3.5) παριστάνεται γραφικά στο σχήμα 3.5ε από το οποίο προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή του « $\epsilon$ » συμβαίνει για τιμή  $U/C_1 = 1/2$  συνα και είναι  $\max \epsilon = \text{συν}^2 a$ . Η ίδια τιμή μέγιστου βρίσκεται με απλή παραγώγιση της σχέσεως (3.5).

Στο σχήμα 3.5ε χρησιμοποιήθηκε για τη γραφική παράσταση τιμή της γωνίας  $a = 24^\circ$ , οπότε προκύπτει τιμή μέγιστη  $\epsilon = 0,46$ . Η συνήθης τιμή της γωνίας α είναι κατά τι μικρότερη και συνεπώς το συνα  $\approx 1,0$ , άρα ο λόγος ταχυτήτων  $U/C_1 \approx 0,5$ .

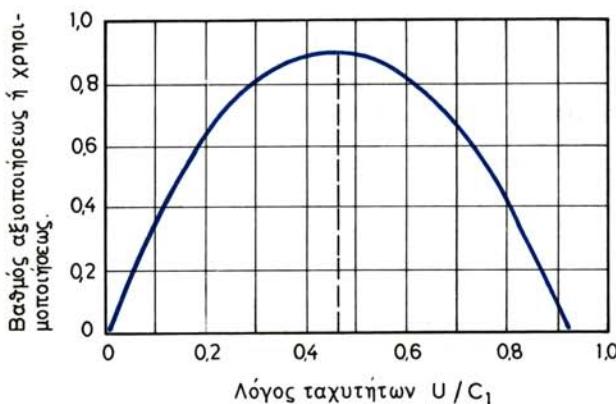
Στην περίπτωση υπάρχεως ποσοστού αντιδράσεως στο στρόβιλο ( $W_1 \neq W_2$ ), η γενική ίδεα παραμένει η ίδια, άν και το τελικό αποτέλεσμα είναι κάπως πολυπλοκότερο. Για την ειδική περίπτωση που το ποσοστό αντιδράσεως είναι 50%, δηλαδή η μισή κινητική ενέργεια εναλλάσσεται στα σταθερά και η άλλη μισή στα κινητά πτερύγια, επειδή  $C_1^2 = W_2^2 - W_1^2$  η αξιοποίηση Ε παίρνει τη μορφή:

$$\epsilon = \frac{U}{C_1} \left( 2 \text{ συνα} - \frac{U}{C_1} \right)$$

για την οποία  $\max \epsilon = \text{συν}^2 a$  για  $U/C_1 = \text{συνα}$ .

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει το βασικής σημασίας συμπέρασμα που αφορά τη λειτουργία των στροβίλων, δηλαδή για ποιο λόγο ο στρόβιλος (όσο και ο ατμοστρόβιλος) λειτουργούν με μεγάλο αριθμό στροφών.

Όπως αποδείχθηκε στο κεφάλαιο των θερμικών κύκλων, για μεγάλο κατά το δυνατό θερμικό βαθμό αποδόσεως, πρέπει να υπάρχει σημαντική διαφορά πιέ-



Σχ. 3.5ε.

Σχέση αξιοποίησεως «ε» και λόγου ταχυτήτων.

σεων και θερμοκρασιών του θερμοδυναμικού μέσου πριν και μετά το στρόβιλο, δηλαδή η διαφορά ενθαλπιών ( $h_3 - h_4$ ) να είναι μέγιστη. Μεγάλη τιμή δύναμης της διαφοράς ενθαλπιών συνεπάγεται μεγάλη τιμή της ταχύτητας  $C_1$ , της δέσμης του θερμοδυναμικού μέσου [ $C_1$ , ανάλογος του  $(h_3 - h_4)^{0.5}$ ], η οποία είναι της τάξεως χιλιάδων ποδών ανά δευτερόλεπτο. Επειδή δύναμη η μέγιστη τιμή της αξιοποίησεως ε συμβαίνει για  $U/C_1 \approx 0.5$ , πρέπει και η γραμμική ταχύτητα  $U$  του τροχού να είναι μεγάλη, πράγμα που σημαίνει είτε μεγάλη διάμετρο είτε μεγάλη ταχύτητα περιστροφής. Δεδομένου ότι η μεγάλη διάμετρος τροχού συνεπάγεται αυξημένο όγκο, βάρος και κόστος κατασκευής, προκύπτει το συμπέρασμα ότι «η περιστροφική ταχύτητα των στροβίλων πρέπει να είναι οπωσδήποτε μεγάλη». Με τη βοήθεια πολλών συνεχομένων βαθμίδων η διατιθέμενη ενέργεια ( $h_3 - h_4$ ) είναι δυνατό να αξιοποιηθεί τμηματικά, οπότε επιτυγχάνονται ικανοποιητικές τιμές του λόγου  $U/C_1$ , χωρίς την ανάγκη προσφυγής σε ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες περιστροφής που θα χρειάζονταν αν χρησιμοποιούσαν στρόβιλος μιας μόνο βαθμίδας. Συνηθέστατα, στην πράξη, και προκειμένου για πρωστήριες μηχανές, μονοβάθμιος κατασκευάζεται ο στρόβιλος υψηλής πιέσεως που κινεί το συμπιεστή, ενώ ο στρόβιλος ισχύος, όπου απολαμβάνεται και το ωφέλιμο έργο, κατασκευάζεται πολυβάθμιος.

Ορισμένες μηχανές, επίσης για τους στροβίλους ισχύος, χρησιμοποιούν ρυθμιζόμενα προφύσια με αντικειμενικό σκοπό τη βελτίωση της αποδόσεως στα μερικά φορτία, όταν η επιβράδυνση του στροβίλου (μικρότερο  $U$ ) απομακρύνει το λόγο  $U/C_1$ , από τη βέλτιστη τιμή σχεδιάσεως. Έτσι με ρύθμιση των προφυσίων μεταβάλλεται και η τιμή και η διεύθυνση της  $C_1$  (ταχύτητα της δέσμης του θερμοδυναμικού μέσου), ώστε να παραμένει ο λόγος  $U/C_1$ , κοντά στη βέλτιστη τιμή του.

Ο βαθμός αξιοποίησεως είναι προφανώς πάντοτε μικρότερος από τη μονάδα, γιατί η τελευταία βαθμίδα, ανεξάρτητα από τον τυχόν μεγάλο αριθμό τους, πρέπει οπωσδήποτε να έχει κάποια τιμή της ταχύτητας εξόδου  $C_2$ .

Ο βαθμός αποδόσεως είναι οπωσδήποτε κατά τι μικρότερος από το βαθμό αξιοποίησεως, γιατί εκτός από την ενέργεια που δεν αξιοποιείται κατά τη διέλευση του θερμοδυναμικού μέσου από τον τροχό και την έξοδό του με ταχύτητα  $C_2$  υπάρχουν και άλλες αιτίες υποβαθμίσεως της ενέργειας, οι οποίες ήδη εξετάσθηκαν, όπως τριβείς, διαρροές κλπ. Οι πρόσθετες αυτές απώλειες είναι συγκριτικά

μικρές και η σύγχρονη εξελικτική τάση σχεδιάσεως και κατασκευής των στροβίλων έχει κατορθώσει την ελαχιστοποίησή τους.

### **Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι:**

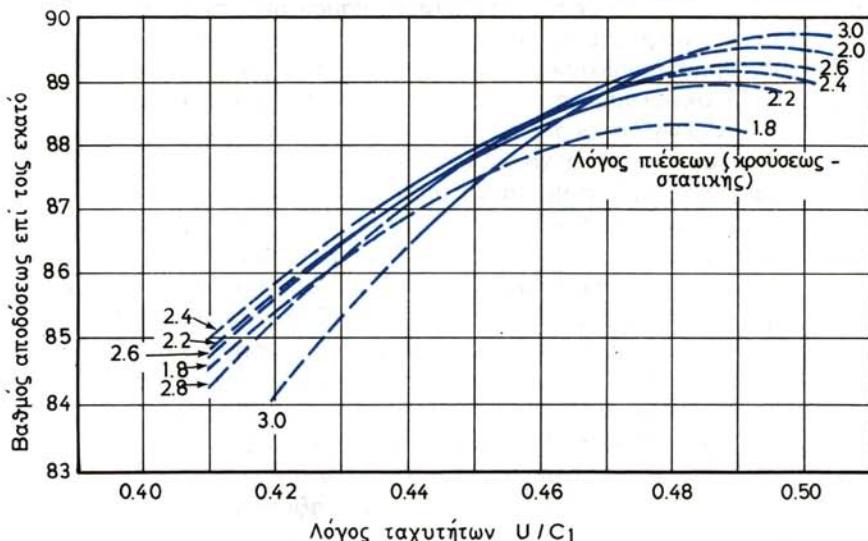
Το βασικότερο πρόβλημα για την επίτευξη υψηλού βαθμού αποδόσεως κατά τη σχεδίαση και διατήρησή του κατά τη λειτουργία του στροβίλου είναι η αποφυγή μεταβολής του λόγου  $U/C_1$ , από την περιοχή της βέλτιστης τιμής του.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι, εκτός από το λόγο ταχυτήτων  $U/C_1$ , ο βαθμός αποδόσεως εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους, από τις οποίες κυρίως χρησιμοποιείται ο λεγόμενος λόγος πιέσεων (κρούσεως - στατικής) ή λόγος ( $I - S$ ) όπως αναφέρεται στην αγγλική βιβλιογραφία. Διευκρινίζεται ότι η πίεση κρούσεως, όπως χρησιμοποιείται εδώ ο όρος, είναι ίση με τη στατική πίεση αυξανόμενη κατά το μανομετρικό ύψος που αντιστοιχεί στην απόλυτη ταχύτητα με την οποία το θερμοδυναμικό μέσο εγκαταλείπει τη βαθμίδα.

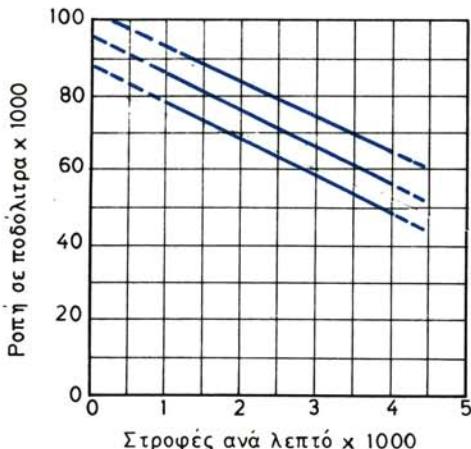
Στο σχήμα 3.5στ φαίνονται χαρακτηριστικές καμπύλες βαθμού αποδόσεως βαθμίδων στροβίλων αξονικής ροής για διάφορη τιμή του λόγου ταχυτήτων  $U/C_1$ , και του λόγου πιέσεων  $I - S$ . Πέρα από τα ανωτέρω, η μέγιστη, πρακτικής σημασίας για το σχεδιαστή της εγκαταστάσεως προώσεως, χαρακτηριστική λειτουργίας της μηχανής είναι η σχέση μεταξύ ροπής και στροφών. Υπενθυμίζοντας ότι η ενέργεια που μεταβιβάζεται από το ρευστό προς το στρόβιλο ισούται με το γινόμενο της ροπής επί τον αριθμό στροφών του στροβίλου, έχομε από τη σχέση (3.5) και αφού διαιρέσομε και τα δύο μέλη της δια του αριθμού στροφών  $u$ :

$$\epsilon_q = \frac{8\pi r}{C_1} \left( \text{συνα} - \frac{U}{C_1} \right) \quad (3.6)$$

όπου  $\epsilon_q = \epsilon/n$  είναι **εξ ορισμού** ο καλούμενος βαθμός αξιοποιήσεως ροπής.



**Σχ. 3.5στ.**  
Σχέση βαθμού αποδόσεως και λόγου ταχυτήτων.

**Σχ. 3.5ζ.**

Καμπύλες ταχύτητας και στρεπτικής ροπής.

Αν η ταχύτητα  $C_1$  διατηρείται σταθερή, τότε όπως προκύπτει από την ανωτέρω σχέση, η ροπή είναι γραμμική συνάρτηση της περιφερειακής ταχύτητας  $U$ , δηλαδή του αριθμού στροφών.

Αν  $U/C_1 = 1/2$  συνα, δηλαδή η βέλτιστη τιμή, τότε:

$$\epsilon_q = \frac{4\pi r \text{ συνα}}{C_1}$$

Αν  $U/C_1 = 0$ , δηλαδή δεν περιστρέφεται ο στρόβιλος, τότε:

$$\epsilon_q = \frac{8\pi r \text{ συνα}}{C_1}$$

Από τις δύο τελευταίες σχέσεις προκύπτει ότι, για σταθερή παροχή του θερμοδυναμικού μέσου στο στρόβιλο, η ροπή σε μηδενικό αριθμό στροφών είναι διπλάσια της ροπής που αντιστοιχεί στις στροφές του μέγιστου βαθμού αξιοποίησεως που συνήθως είναι και οι στροφές λειτουργίας του στροβίλου.

Οι χαρακτηριστικές λειτουργίας ροπής - αριθμού στροφών του ιδεατού στροβίλου δράσεως μιας βαθμίδας είναι συνεπώς ευθεία γραμμή με αρνητική κλίση, ενώ οι χαρακτηριστικές λειτουργίας των πραγματικών στροβίλων προσεγγίζουν πάρα πολύ προς τις ιδεατές, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5ζ.

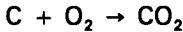
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ ΘΑΛΑΜΟΙ ΚΑΥΣΕΩΣ

### 4.1 Αρχές της καύσεως και θεμελιώδεις σχέσεις.

Το φαινόμενο της καύσεως στους αεριοστροβίλους, εξεταζόμενο κατά απλό τρόπο, μπορεί να θεωρηθεί σαν μια σειρά από χημικές αντιδράσεις υδρογονανθράκων και ατμοσφαιρικού αέρα, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα και τη δημιουργία επίσης πολύ υψηλών θερμοκρασιών.

Σε όλες σχεδόν τις εγκαταστάσεις ναυτικών αεριοστροβίλων, η μηχανή χρησιμοποιεί ως καύσιμο υγρούς υδρογονάνθρακες\*. Στην πραγματικότητα πρόκειται για μίγμα διαφόρων ειδών υδρογονανθράκων, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί χημικά ισοδύναμο με το δωδεκάνιο ( $C_{12}H_{28}$ ), γιατί έχουν την ίδια αναλογία άνθρακα και υδρογόνου.

Το ποσό του ατμοσφαιρικού αέρα που απαιτείται για την πλήρη καύση ενός καυσίμου εξαρτάται από το πόσο οξυγόνο χρειάζεται και καθορίζεται από τις ακόλουθες απλές χημικές αντιδράσεις:



Οι σχέσεις αυτές δείχνουν ότι ένα γραμμομόριο οξυγόνου (γραμμομόριο ή πολείναι το μοριακό βάρος του στοιχείου σε μονάδες βάρους) απαιτεί για την πλήρη καύση του ένα γραμμομόριο άνθρακα και αυτά παράγουν ένα γραμμομόριο διοξειδίου του άνθρακα. Επίσης μισό γραμμομόριο οξυγόνου χρειάζεται για την πλήρη καύση του ένα γραμμομόριο υδρογόνου· και τα δύο μαζί παράγουν ένα γραμμομόριο νερού.

Αντικαθιστώντας τα ατομικά ή μοριακά βάρη των διαφόρων χημικών στοιχείων και ενώσεων στις παραπάνω αντιδράσεις καταλήγομε στο αποτέλεσμα ότι απαιτούνται 3,48 μονάδες βάρους οξυγόνου για την πλήρη καύση μιας μονάδας βάρους υδρογονάνθρακα δωδεκανίου ( $C_{12}H_{28}$ ). Επειδή η περιεκτικότητα του ατμοσφαιρικού αέρα σε οξυγόνο κατά βάρος είναι 23% και το δωδεκάνιο είναι χημικά ισοδύναμο προς τα συνήθως χρησιμοποιούμενα καύσιμα των αεριοστροβίλων, προκύπτει το πρακτικής σημασίας συμπέρασμα ότι:

\* Η καύση αερίου, μερική ή ολική, και το φαινόμενο boil-off θα εξετασθούν στο κεφάλαιο για τα καύσιμα.

Για την πλήρη καύση μιας μονάδας βάρους καυσίμου (π.χ. 1 kg ή 1 λίτρο) χρειάζονται 15,13 αντίστοιχες μονάδες βάρους ατμοσφαιρικού αέρα.

Άλλος σημαντικός παράγοντας της καύσεως είναι η θερμαντική ικανότητα του καυσίμου, δηλαδή το ποσό της θερμότητας που αποδίδεται κατά την καύση του\*. Η θερμαντική ικανότητα για όλους τους τύπους των καυσίμων που χρησιμοποιούνται σε αεριοστροβίλους κυμαίνεται στα αυτά περίπου επίπεδα.

Πολύ σημαντική παράμετρος είναι η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά την καύση του καυσίμου, δηλαδή κατά τη χημική ένωση αυτού μετά του οξυγόνου. Η θερμοκρασία αυτή υπολογίζεται με πολύ ικανοποιητική προσέγγιση για την περίπτωσή μας, με τη βοήθεια του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου και ορισμένες απλουστευτικές υποθέσεις.

Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος εφαρμοζόμενος στην περίπτωση της καύσεως έχει τη μορφή:

$$Q + H_R = H_p$$

όπου:  $Q$  = η θερμαντική ικανότητα του καυσίμου,

$H_R$  = η ενθαλπία των ενώσεων της αντιδράσεως, δηλαδή αέρα και καυσίμου και

$H_p$  = η ενθαλπία των προϊόντων της αντιδράσεως, δηλαδή των καυσαερίων.

Αν στη συνέχεια θεωρήσομε τον αέρα και τα καυσαέρια σαν τέλεια αέρια, σαν θερμοκρασία αναφοράς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος  $77^{\circ}\text{F}$ , και την ένωση καυσίμου - αέρα σαν χημικά ορθή ή στοιχειομετρική (όπως αλλιώς ονομάζεται), τότε οι ποσότητες της ανωτέρω σχέσεως είναι αντίστοιχα:

$Q = 18970$  (η κατώτερη θερμαντική ικανότητα),

$H_R = 0$  (δεχθήκαμε σαν θερμοκρασία αναφοράς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος),

$H_p = m \cdot C_p \cdot \Delta T = (16,13) (0,25) (\Delta T)$ ,

οπότε  $(\Delta T) \approx 4660^{\circ}\text{F}$ , δηλαδή τα προϊόντα της καύσεως έχουν μεγαλύτερη θερμοκρασία κατά  $(\Delta T)$  της θερμοκρασίας αναφοράς. Είναι φανερό ότι η θερμοκρασία αυτή είναι ιδιαίτερα υψηλή και στην πράξη δεν υπάρχουν υλικά τα οποία μπορούν να την αντέξουν χωρίς προβλήματα. Επομένως πρέπει να ελαπτωθεί. Για το σκοπό αυτό, κατά την καύση χρησιμοποιείται ποσότητα αέρα πολύ μεγαλύτερη από δ', τι καθορίζεται από τη χημική αντίδραση, δηλαδή περίσσεια αέρα ως προς τη στοιχειομετρική ποσότητα. Αν π.χ. χρησιμοποιηθεί τριπλάσια ποσότητα της στοιχειομετρικής ή περίσσεια αέρα 200%, τότε θα είναι  $H_p = (3 \text{ m}) \cdot (C_p) \cdot (\Delta T)$ , οπότε προκύπτει  $(\Delta T) \approx 1760^{\circ}\text{F}$ , δηλαδή θερμοκρασία πρακτικά αποδεκτή. Η επί πλέον αυτή ποσότητα του αέρα, η οποία ονομάζεται και **περίσσεια**, συνήθως παρέχεται μετά την καύση, γι' αυτό και ονομάζεται **δευτερεύων αέρας**.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην πράξη, λόγω στιγμιαίας ατελούς καύσεως, δημιουργούνται αρκετά κατάλοιπα από τα οποία περισσότερο ανεπιθύμητα είναι το μονοξείδιο του άνθρακα και το διοξείδιο του θείου επειδή μολύνουν το πε-

\* Η θερμαντική ικανότητα διακρίνεται σε **ανώτερη** και **κατώτερη** όταν οι υδρογονάνθρακες που κάγιονται περιέχουν υδρογόνο. Το υδρογόνο αυτό δημιουργεί νερό (υδρατμό), το οποίο, αν συμπυκνωθεί, αποδίδει επιπλέον ποσότητα θερμότητας. Αν το επιπλέον αυτό ποσό θερμότητας λαμβάνεται υπόψη, τότε μιλάμε για ανώτερη θερμαντική ικανότητα, διαφορετικά, θα μιλάμε για κατώτερη. Για το δωδεκάνιο, οι αντίστοιχες τιμές είναι 20140 και 18970 BTU ανά λίμπρα.

ριβάλλον. Και βέβαια προκειμένου για πλοίο που ταξιδεύει στην ανοικτή θάλασσα το οικολογικό πρόβλημα που δημιουργείται είναι ασήμαντο. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο κατά τη λειτουργία των μηχανών σε κλειστό λιμάνι ή σε εγκαταστάσεις ξηράς που χρησιμοποιούν αεριοστροβίλους.

## 4.2 Θάλαμοι καύσεως.

Ο όρος «αεριοστρόβιλοι», όπως χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει τις θερμικές μηχανές\* που αποτελούν το αντικείμενο του βιβλίου αυτού, θα ήταν πληρέστερος στην πραγματικότητα, αν τον αντικαθιστούσαμε με τον όρο «αεριοστρόβιλοι καύσεως», κατά ανάλογο τρόπο προς τις μηχανές εσωτερικής καύσεως. Ο αεριοστρόβιλος είναι βασικά μια μηχανή εσωτερικής καύσεως, αφού η καύση που παρέχει την ενέργεια στο θερμικό κύκλο πραγματοποιείται μέσα στη μηχανή, σε αντίθεση με τις εγκαταστάσεις ατμοστροβίλων, όπου πραγματοποιείται στον εκτός της μηχανής λέβητα.

Υπάρχει όμως διαφορά και μεταξύ μιας συμβατικής ΜΕΚ (πετρελαιομηχανής ή βενζινομηχανής) και του αεριοστροβίλου σε ό,τι αφορά την καύση και συγκεκριμένα, ενώ η καύση στις ΜΕΚ γίνεται σε ορισμένες φάσεις του θερμικού κύκλου και είναι διακοπόμενη, στους αεριοστροβίλους είναι συνεχής.

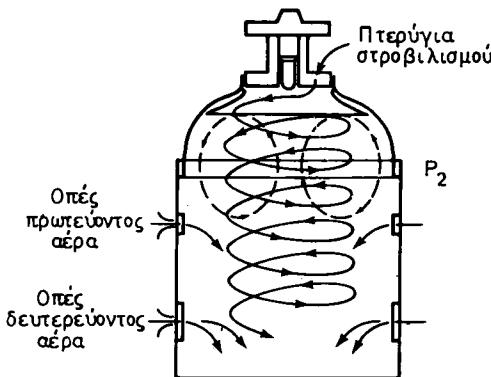
Το εκ πρώτης όψεως πλεονέκτημα αυτό της συνεχούς καύσεως παρουσιάζει αρκετά προβλήματα στην πρακτική εφαρμογή του. Ειδικότερα ο μικρός διατιθέμενος όγκος του αεριοστροβίλου απαιτεί ώστε η καύση να γίνεται σε περιορισμένο χώρο με αέρα πιέσεως κατά πολύ μεγαλύτερης από την ατμοσφαιρική, με ταχύτητες αέρα που πολλές φορές ξεπερνούν τα 150 m/sec και περίσσεια αέρα αυξημένη.

Στο σχήμα 4.2α φαίνεται διαγραμματικά ένας χαρακτηριστικός θάλαμος καύσεως με τη χρησιμοποιούμενη τεχνική πλήρους αναμίξεως αέρα και καυσίμου μέσα στο μικρό διατιθέμενο χώρο. Όπως φαίνεται, ο καυστήρας βρίσκεται στην κορυφή του θαλάμου, ενώ ο αέρας για την καύση εισέρχεται και από την περιοχή κοντά στον καυστήρα από θυρίδες, αλλά και περιφερειακά στο μέσο του θαλάμου καύσεως, κατά τέτοιο τρόπο που να επιτυγχάνεται ισχυρός στροβιλισμός και πλήρης ανάμιξη του αέρα με το εγχέδωμενο καύσιμο. Είναι επομένως φανερό ότι στούς θαλάμους καύσεως τών αεριοστροβίλων η παραγόμενη θερμότητα ανά μονάδα διατιθέμενου όγκου είναι πολύ υψηλή. Γ' αυτό, τόσο η επίτευξη ικανοποιητικού βαθμού καύσεως όσο και η ψύξη των θαλάμων καύσεως είναι σοβαρά προβλήματα, τα οποία βέβαια έχουν αντιμετωπισθεί, με την πάροδο του χρόνου και εξελικτικά με επιτυχία κατά διαφόρους τρόπους.

Η σχεδίαση των θαλάμων καύσεως είναι συνήθως αποτέλεσμα βελτιώσεως κάποιου προηγούμενου θαλάμου που αποδείχθηκε επιτυχής στην πράξη, σε συνδυασμό με τις νεώτερες επιτεύξεις της εφαρμοσμένης τεχνικής. Αποτελεί δηλαδή προϊόν εμπειρίας, τεχνικής και επιστήμης. Για το λόγο αυτό υπάρχουν πολλά είδη θαλάμων, ανάλογα με τον κατασκευαστή τους, τα οποία διαφέρουν σημαντικά με-

---

\* Υπενθυμίζεται η διάκριση μεταξύ αεριοστροβίλων (το σύνολο της μηχανής) και στροβίλων (το τμήμα της μηχανής που παράγει αφέλιμο έργο).



Σχ. 4.2α.  
Θάλαμος καύσεως.

ταξύ τους. Γενικά, όλοι οι θάλαμοι καύσεως διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

α) Σε αυτούς που είναι σχετικά απομακρυσμένοι από το συμπιεστή και το στρόβιλο και αποτελούν ξεχωριστή μονάδα και

β) σε αυτούς που μαζί με το στρόβιλο και το συμπιεστή αποτελούν μια ενιαία κατασκευή.

Στο σχήμα 4.2β παρουσιάζονται δύο χαρακτηριστικοί θάλαμοι καύσεως **μεμονωμένου τύπου** (όπως ονομάζονται). Της πρώτης κατηγορίας οι θάλαμοι αποτελούνται από ένα «δοχείο πιέσεως» επενδυμένο εσωτερικά με ένα ή περισσότερα χιτώνια για προστασία από τις υψηλές θερμοκρασίες και τα προϊόντα της καύσεως. Πολλές φορές μέσα στο ίδιο «δοχείο πιέσεως» βρίσκονται πολλοί μικρότεροι θάλαμοι καύσεως διατεταγμένοι κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται συνεχής και ομοιόμορφη ροή καυσαερίων προς το στρόβιλο.

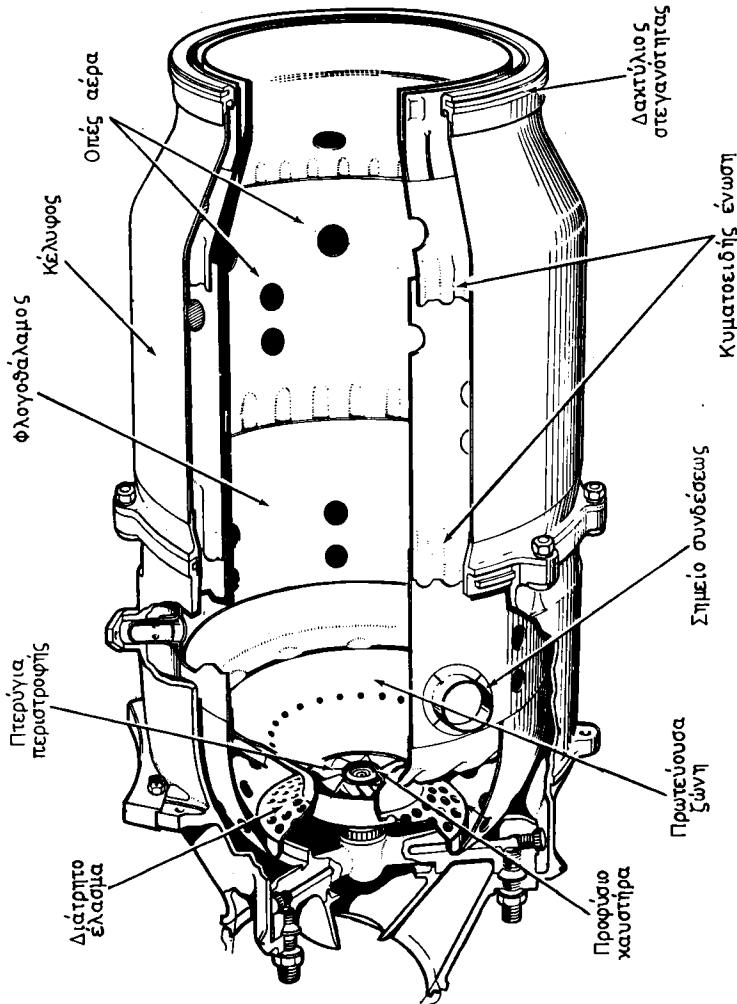
Στη δεύτερη μεγάλη κατηγορία των θαλάμων καύσεως, που ενσωματωμένοι με το στρόβιλο και το συμπιεστή αποτελούν μαζί ενιαία κατασκευή, ανήκουν τα περισσότερα είδη θαλάμων που χρησιμοποιούνται σε σύγχρονους ναυτικούς αεριοστροβίλους. Η τάση των συγχρόνων κατασκευαστών έχει δείξει σαφή προτίμηση προς τους ενιαίους θαλάμους. Η κατηγορία αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει τρία βασικά είδη θαλάμων, ήτοι:

- Πολλαπλοί ξεχωριστοί θάλαμοι μορφής σωλήνα.
- Ενιαίος θάλαμος μορφής περιφερειακού δακτυλίου.
- Θάλαμοι καύσεως που είναι συνδυασμός των ανωτέρω (α) και (β).

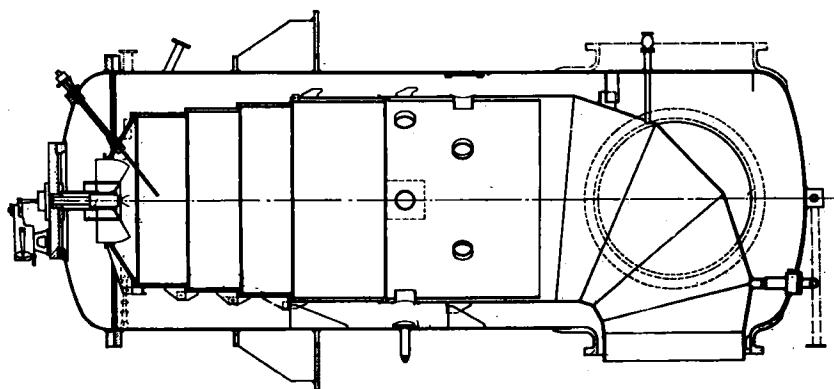
#### 4.2.1 Πολλαπλοί ξεχωριστοί θάλαμοι μορφής σωλήνα.

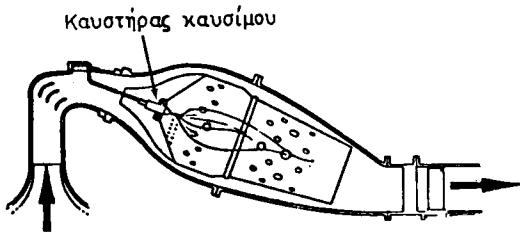
Οι θάλαμοι αυτοί, που λέγονται και θάλαμοι μορφής δοχείου (can type), φαίνονται στη βασική τους μορφή στο σχήμα 4.2γ.

Έτσι, ο αέρας, μετά το συμπιεστή, οδηγείται σε ατομικούς (ιδιαίτερους) θαλάμους καύσεως υπό μορφή κυλινδροειδών δοχείων ή σωλήνων διαταγμένων στην εξωτερική περιφέρεια της μηχανής. Κάθε θάλαμος καύσεως έχει ιδιαίτερο καυστή-

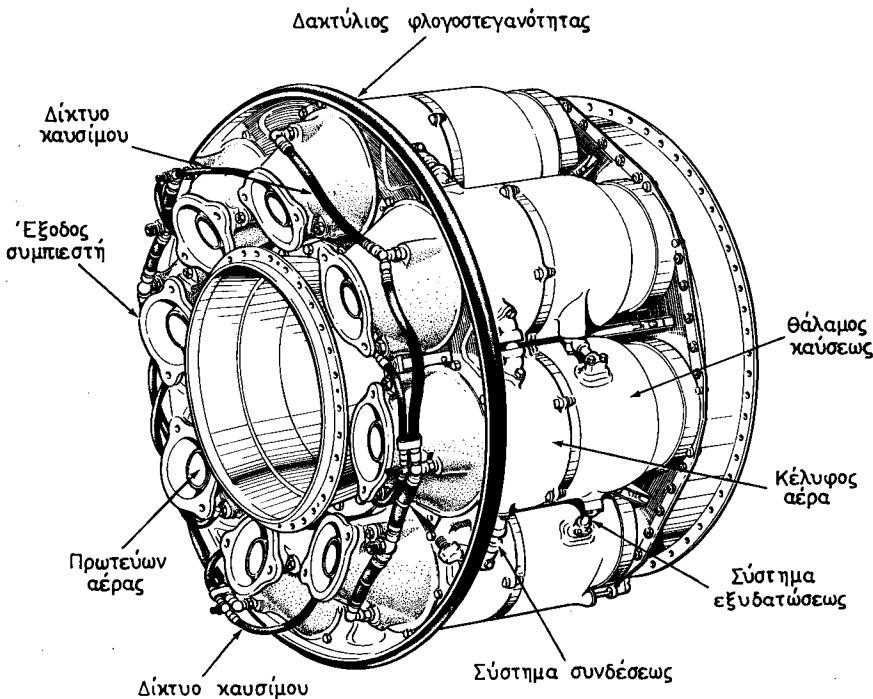


**Σχ. 42β.**  
Θέλαμοι καύσεως.





**Σχ. 4.2γ.**  
Θάλαμος καύσεως μορφής δοχείου.



**Σχ. 4.2δ.**  
Σύστημα καύσεως πολλαπλών θαλάμων.

ρα στο κέντρο του θαλάμου. Η όλη διάταξη των ιδιαιτέρων θαλάμων επάνω στη μηχανή φαίνεται στο σχήμα 4.2δ.

Ο «πρωτεύων αέρας», μετά το συμπιεστή, αναμιγνύεται με το καύσιμο και συντρεί την καύση, ενώ ο «δευτερεύων αέρας» αναμιγνύεται με τα προϊόντα της καύσεως, τα αραιώνει και κατεβάζει τη θερμοκρασία τους. Τα καυσαέρια αυτά οδεύουν προς το στρόβιλο. Τα πλεονεκτήματα του θαλάμου καύσεως αυτού του τύπου είναι:

α) Λόγω της μικρής του διαμέτρου δεν απαιτείται σοβαρή ενίσχυση της κατασκευής (ώστε η δομική του αντοχή να είναι ικανοποιητική), με συνέπεια να έχει μικρό βάρος.

β) Η συντήρηση είναι ευκολότερη, γιατί η εξάρμοση ενός θαλάμου δεν προϋ-

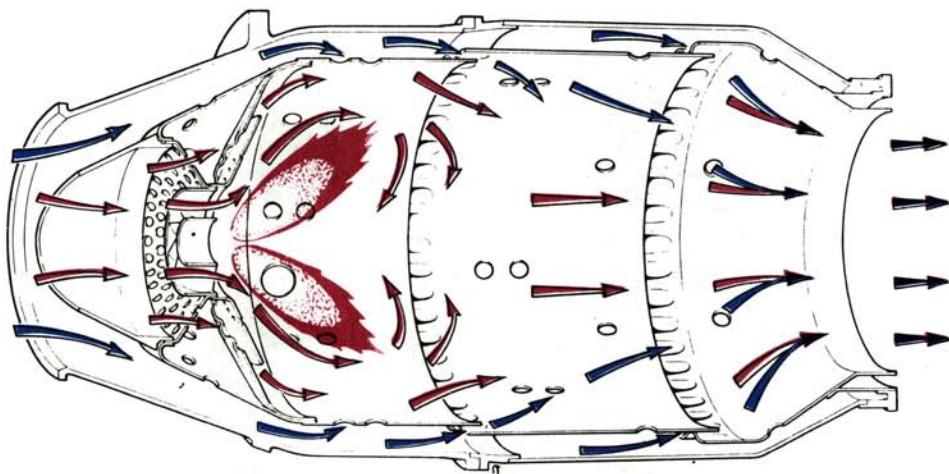
ποθέτει μεγάλης εκτάσεως εξαρμόσεις στα λοιπά τμήματα της μηχανής.

Τα μειονεκτήματα αντίστοιχα είναι:

α) Λόγω της μικρής διαμέτρου των σωλήνων, για την εξασφάλιση του απαιτούμενου χώρου καύσεως, αυξάνει το μήκος τους, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και το μήκος ολόκληρης της μηχανής.

β) Τυχόν κακή λειτουργία ενός καυστήρα δημιουργεί αυξημένη τοπική υπερθέρμανση.

Στο σχήμα 4.2ε φαίνεται διαγραμματικά η ροή των θερμοδυναμικών ρευστών (αέρα, προϊόντων καύσεως), καθώς και η λειτουργία των καυστήρων σε μηχανή που χρησιμοποιεί θαλάμους τύπου σωλήνα.



Σχ. 4.2ε.

Η ροή αέρα και καυσαερίων στο θάλαμο καύσεως.

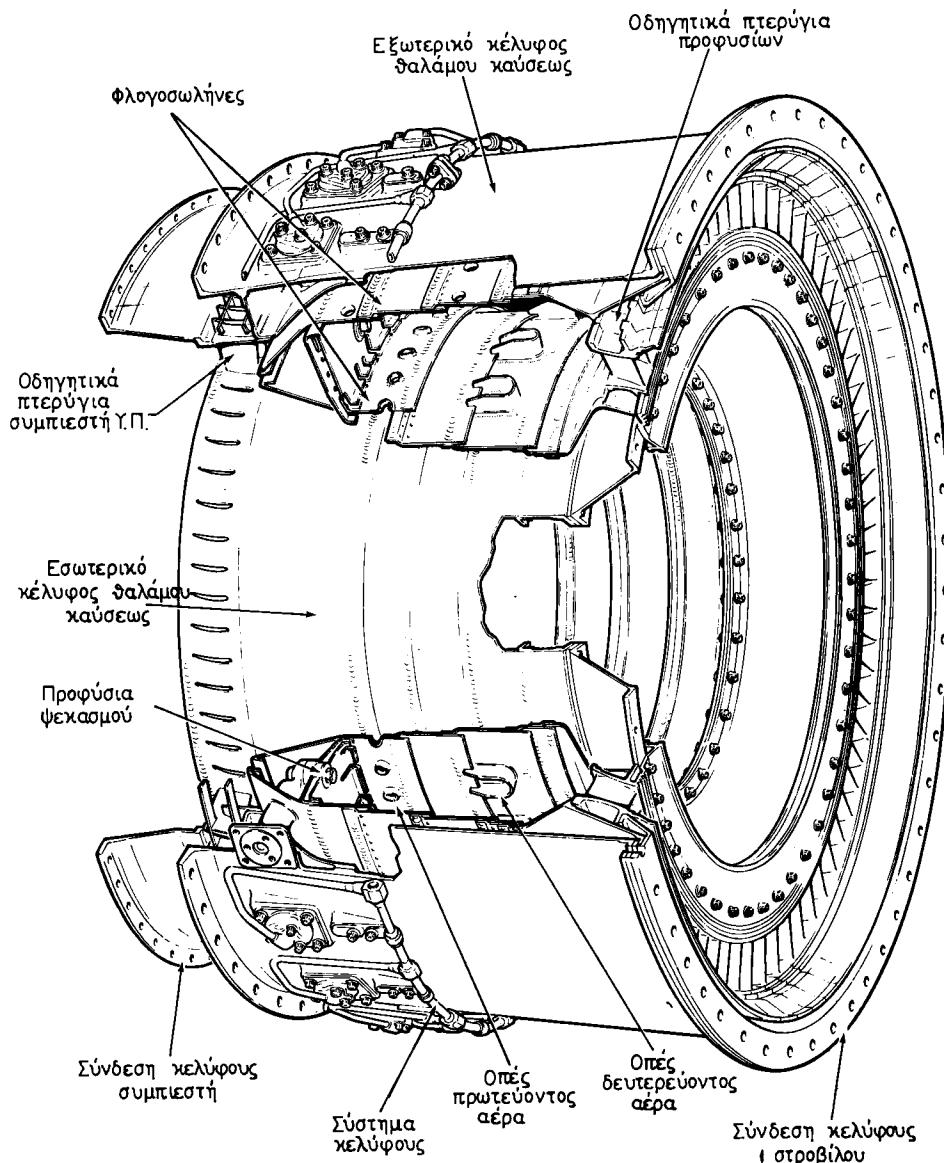
#### 4.2.2 Ενιαίοι θάλαμοι καύσεως μορφής περιφερειακού δακτυλίου.

Οι θάλαμοι του είδους αυτού αποτελούνται από ένα δακτυλιοειδή χώρο που περιβάλλει τη μηχανή, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2στ.

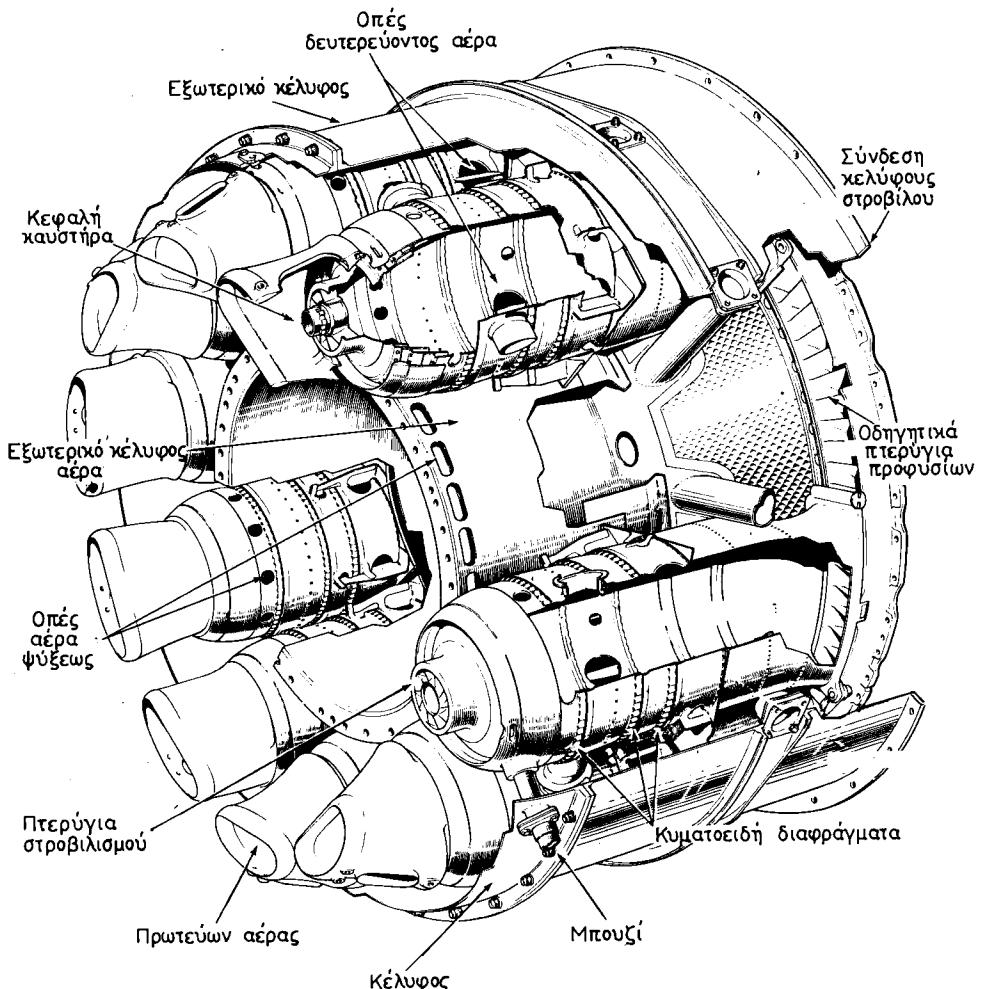
#### 4.2.3 Θάλαμοι καύσεως συνδυασμού (canannular type).

Από το συνδυασμό των προηγουμένων τύπων θαλάμων προκύπτει ένα νέο είδος όπως αυτό του σχήματος 4.2ζ.

Όπως φαίνεται, αυτός αποτελείται από ιδιαίτερους κυλινδροειδείς θαλάμους τοποθετημένους σε επαφή μεταξύ τους μέσα σε κοινό δακτυλιοειδές κέλυφος. Κάθε κυλινδροειδής θάλαμος έχει ένα ομόκεντρο σωλήνα, ο οποίος επιτρέπει αύξηση της αναμιγνυόμενης ποσότητας καυσίμου αέρα, χωρίς υπερβολική αύξηση των διαστάσεων του θαλάμου. Οι θάλαμοι συνδέονται μεταξύ τους με κοινούς σωλήνες - αγωγούς, μέσω των οποίων μεταδίδεται η φλόγα από θάλαμο σε θάλαμο μετά την αρχική έναυση. Κατά τον τρόπο αυτό χρησιμοποιούνται συνολικά ένας ή δύο σπινθηριστές (μπουζί) για όλο το θάλαμο. Επίσης, με κατάλληλη σχεδίαση επιτυγχάνεται αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων των προηγουμένων ειδών των θαλάμων και συγχρόνως περιορισμός των δυσμενών επιπτώσεων των μειονεκτημάτων.



**Σχ. 4.2στ.**  
Θάλαμος καύσεως μορφής περιφερειακού δακτύλου.



Σχ. 4.2ζ.

Θάλαμος καύσεως συνδυασμένου τύπου.

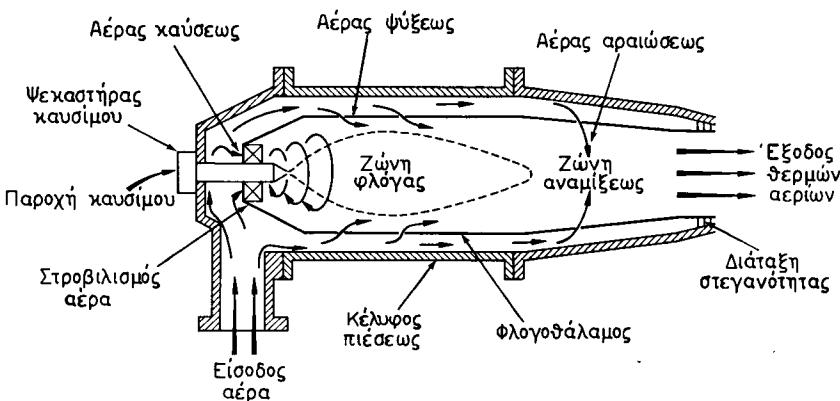
των τους. Έτσι, επιτυγχάνομε μεγάλη ευχέρεια συντηρήσεως και επισκευής, μικρότερο μήκος θαλάμου, καλύτερη ανάμιξη καυσίμου - αέρα, ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασιακών και κατακευαστικών τάσεων.

#### 4.2.4 Θάλαμοι καύσεως αναστρεφόμενης ροής.

Οι θάλαμοι αυτοί αποτελούν ιδιάιτero eίδος ενσωματωμένων θαλάμων και, όπως φανερώνει το όνομά τους, αντιστρέφεται η ροή του καυσιγόνου αέρα κατά τη διαδρομή του. Έτσι ο αέρας, καταθλιβόμενος από το συμπιεστή σε εσωτερικό διαμπερή σωλήνα, φθάνει στο άλλο άκρο του θαλάμου, όπου ο καυστήρας ενώνεται με το καύσιμο και τα παραγόμενα καυσαέρια οδεύουν προς το μέρος της εισόδου του αέρα, οπότε, με ειδικό οχετό, αντιστρέφεται η ροή τους και κατευθύνονται προς το στρόβιλο. Παρουσιάζουν δύο πλεονεκτήματα: πρώτον προσδίδουν ποσό θερμότητας στον πρωτεύοντα αέρα και δεύτερον η απαιτούμενη διάταξη εισ-

όδου του αέρα και εξόδου των καυσαερίων διευκολύνει την προσαρμογή του θαλάμου στην υπόλοιπη μηχανή. Σαν μειονέκτημά τους μπορεί να θεωρηθεί η σημαντική πτώση πιέσεως του αέρα - καυσαερίων λόγω μήκους διαδρομής και αντιστροφής της ροής.

Απ' όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η διαδικασία της καύσεως στους αεριοστροβίλους (με υγρά καύσιμα) μοιάζει περισσότερο με την καύση παρομοίων καυσίμων σε εστία λέβητα. Στους αεριοστροβίλους βέβαια ο καυσιγόνος αέρας είναι υπό μεγαλύτερη πίεση και έχει υποστεί υψηλότερη προθέρμανση. Ουσιώδεις επίσης είναι οι διαφορές, λόγω πολύ μικρότερου διατιθέμενου χώρου και πολύ μεγαλύτερης περίσσειας αέρα εξ αιτίας της οποίας ουδέποτε παρουσιάζεται πρόβλημα έντονου καπνίσματος της μηχανής, αλλά πρόβλημα σταθερότητας της φλόγας. Σε σχέση με τις ΜΕΚ, η συνεχής και μη διακοπόμενη καύση είναι πλεονεκτική. Η πίεση όμως του αέρα είναι μικρότερη και η προθέρμανσή του δεν έχει φθάσει στο σημείο αυτοαναφλέξεως του εγχεόμενου καυσίμου. Δηλαδή, το καύσιμο για να αναφλεγεί «δανείζεται» φλόγα από τα προηγούμενα από αυτό σταγονίδια. Έτσι, η φλόγα συντηρείται με μετάδοση από σταγονίδιο σε σταγονίδιο και η διατήρηση της σταθερότητας αποτελεί αντικείμενο ενδιαφέροντος. Στο σχήμα 4.2η παρουσιάζεται διαγραμματικά ένας τυπικός θάλαμος καύσεως και οι αρχές λειτουργίας του στη γενική μορφή τους, ενώ η πιο λεπτομερειακή σχεδίασή τους αναλύεται αμέσως παρακάτω.



Σχ. 4.2η.  
Λειτουργία θαλάμου καύσεως.

#### 4.3 Παράμετροι και στόχοι σχεδιάσεως θαλάμου καύσεως.

Αν και, όπως προαναφέρθηκε, η σχεδίαση ενός θαλάμου καύσεως είναι κυρίως αποτέλεσμα εμπειρίας και επιτυχών πειραματικών δοκιμών του κατασκευαστή του, υπάρχουν όμως παράμετροι, οι οποίες έχουν γίνει αποδεκτές και αποτελούν τη βάση της σχεδιάσεως των θαλάμων. Στην πράξη, οι παράμετροι αυτές εκφράζονται ποσοτικά σαν περιοχή τιμών επιτυχούς λειτουργίας των θαλάμων καύσεως.

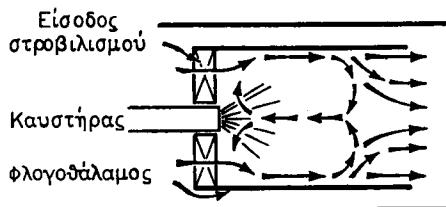
Η σπουδαιότερη ίσως από τις παραμέτρους αυτές είναι η εντός του θαλάμου αποδεσμεύμενη θερμότητα από τη χημική αντίδραση καυσίμου και αέρα. Η θερμότητα αυτή εκφράζεται συνήθως υπό μορφή θερμικής ροής στη μονάδα του χρό-

vou, δηλαδή (για το αγγλοσαξωνικό σύστημα) BTU ανά ώρα και τετραγωνικό πόδι επιφάνειας και η τυπική αριθμητική τιμή της είναι της τάξεως των 100.000 BTU/h.ft<sup>2</sup>.

Η τιμή της θερμικής ροής αυξάνει με το μέγεθος του θαλάμου καύσεως και τη λαμπρότητα της παραγόμενης φλόγας. Η λαμπρότητα της φλόγας εξαρτάται κυρίως από το είδος του χρησιμοποιούμενου καυσίμου και είναι μικρότερη για βαρέα αποστάγματα πετρελαίου από ό,τι για ελαφρύτερα. Για το λόγο αυτό, στους μεγάλους μεμονωμένους θαλάμους καύσεως της πρώτης κατηγορίας, που χρησιμοποιούν βαρέα είδη καυσίμων αφού τα προθερμάνουν, η θερμική ροή είναι μικρότερη από ό,τι σε θαλάμους μικρότερου μεγέθους.

Το ίδιο σοβαρή με την εντός του θαλάμου αποδεσμευόμενη θερμότητα είναι και η ορθή ανάμιξη του καυσίμου με τον αέρα δεδομένου ότι η θερμότητα από αυτή κυρίως εξαρτάται.

Οι περισσότεροι θάλαμοι καύσεως σχεδιάζονται έτσι ώστε μια ποσότητα του πρωτεύοντα αέρα να αναμιγνύεται με το καύσιμο στην περιοχή εγχύσεώς του, που ονομάζεται (λόγω του σχήματός του) **Θόλος του Θαλάμου**. Στην περιοχή του θόλου το καύσιμο καίγεται με τον υψηλό στροβιλισμό αέρα σε στοιχειομετρική περίπου αναλογία\* και έτσι η θερμοκρασία ξεπερνά τους 4000°F. Ο υπόλοιπος αέρας, ο δευτερεύων, χρησιμοποιείται μερικώς για την ψύξη του χώρου καύσεως και κυρίως για την αραίωση των προϊόντων της καύσεως, ώστε η θερμοκρασία των καυσαερίων που φθάνουν στο στρόβιλο να μην υπερβαίνει την για λόγους αντοχής της ύλης μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία  $T_3$ . Ο καταμερισμός αυτός του αέρα μέσα στο θάλαμο καύσεως φαίνεται στο σχήμα 4.2η, ενώ στο σχήμα 4.3α φαίνεται ο στροβιλισμός και η δρομολόγησή του.



Σχ. 4.3α.  
Ο αέρας εντός του θαλάμου καύσεως.

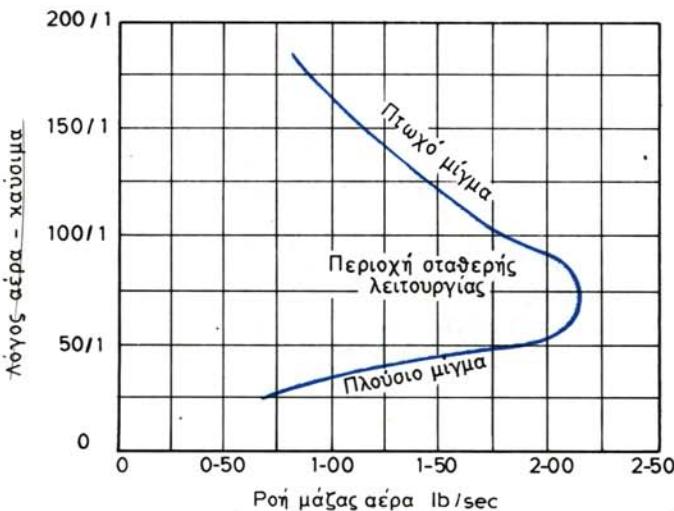
Οι τιμές που μπορεί να πάρει ο λόγος καυσίμου - αέρα εξαρτάται όχι μόνο από τον ιδιαίτερο κύκλο του αεριοστροβίλου, αλλά και από τις συνθήκες λειτουργίας του (το φορτίο, συνθήκες περιβάλλοντος κλπ.), κυμαίνεται δε μέσα σε ευρύτατα όρια της τάξεως  $0,005 \div 0,020$ . Συνεπώς η ικανοποιητική καύση εξασφαλίζεται με την ισορροπία, σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας, του αέρα που χρησιμοποιείται:

- Για την πρωτογενή ανάμιξη με το εγχέδυμενο καύσιμο.
- Για την ψύξη του χώρου του θαλάμου.
- Για την αραίωση των προϊόντων της καύσεως.

\* Στοιχειομετρική: ό,τι υπαγορεύουν οι χημικές αντιδράσεις, χωρίς δηλαδή περίσσεια αέρα.

Σχετικό είναι το θέμα επίσης της σταθερότητας της φλόγας (flame stability), δηλαδή η συνεχής διατήρηση φλόγας σταθερής λαμπρότητας και χωρίς διακυμάνσεις. Το σβήσιμο ή αστάθεια της φλόγας μπορεί να οφείλεται είτε σε δημιουργούμενο ρεύμα αέρα (π.χ. σβήνει το κερί από το άνοιγμα παραθύρου εξαιτίας του οποίου παρασύρεται η φλόγα του προς τα έξω), είτε σε υπερβολική ποσότητα παρεχόμενου πρωτεύοντος αέρα σε σχέση προς το κατά τη στιγμή εκείνη εγχεδόμενο καύσιμο (στιγμιαίο πτωχό μίγμα). Στο σχήμα 4.3β φαίνεται χαρακτηριστική καμπύλη σταθερότητας της φλόγας σε άξονες ροής αέρα και λόγου καυσίμου-αέρα.

Όπως φαίνεται, για να διατηρηθεί η φλόγα, πρέπει οι συντεταγμένες να πέφτουν μέσα στην περικλειόμενη από την καμπύλη περιοχή, ενώ, έξω από αυτή, η φλόγα σβήνει. Το φαινόμενο συνδέεται άμεσα με τις χρησιμοποιούμενες υψηλές ταχύτητες του αέρα μέσα στο θάλαμο καύσεως, οι οποίες κυμαίνονται από μερικά έως και διακόσια μέτρα ανά δευτερόλεπτο, και περιπλέκεται λόγω των υψηλών τιμών ταχυτήτων αυτών.



**Σχ. 4.3β.**  
Καμπύλη σταθερότητας της φλόγας.

Γενικά τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στους θαλάμους καύσεως είναι από τα πιο σύνθετα αεροδυναμικά, χημικά και μεταδόσεως θερμότητας φαινόμενα. Ο βαθμός αποδόσεως της καύσεως, δηλαδή η πραγματικά αποδεσμευόμενη θερμική ενέργεια προς τη θεωρητικά δυνατή για αποδέσμευση, είναι πολύ μεγάλος και λαμβάνεται συνήθως μεγαλύτερος του 0,97. Σημαντικότερο είναι ίσως το γεγονός ότι η τιμή του βαθμού αποδόσεως θεωρείται πρακτικά σταθερή και ανεξάρτητη των συνθηκών λειτουργίας και συντηρήσεως του θαλάμου.

Μετά την εξέταση των βασικών παραμέτρων σχεδιάσεως των θαλάμων, μπορούμε να συνοψίσουμε τις απαιτήσεις — πέρα από τη βασικά πρωταρχική, να καίει δηλαδή δεδομένη ποσότητα καυσίμου — που οφείλει να ικανοποιεί ένας σύγχρονος θάλαμος καύσεως. Οι απαιτήσεις αυτές είναι:

- 1) Ικανοποιητική αποδέσμευση χημικής - θερμικής ενέργειας με την καύση υδρογονανθράκων μέσα σε περιορισμένο χώρο.

2) Σταθερότητα λειτουργίας σε ευρεία περιοχή του λόγου αέρα - καυσίμου και ταχύτητας του αέρα.

3) Ελάχιστη πτώση πιέσεως αέρα και καυσαερίων.

4) Ελεγχόμενη κατανομή θερμοκρασίας των καυσαερίων κατά την είσοδό τους στο στρόβιλο.

5) Βραχύ μήκος φλόγας, ώστε να μην εξέρχεται από το θάλαμο παρασυρόμενη από το ρεύμα αέρα - καυσαερίων.

6) Καθαρή καύση, χωρίς δηλαδή δημιουργία καπνού ή εξανθρακωμάτων σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας.

7) Ταχεία και εύκολη έναυση για αξιόπιστη εκκίνηση.

8) Αυξημένη αντοχή υλικών κατασκευής, χωρίς εκτεταμένη συντήρηση.

Είναι φανερό ότι ορισμένες από τις παραπάνω απαιτήσεις - στόχους της σχεδίασεως είναι μεταξύ τους αντιφατικές. Η αποφυγή π.χ. δημιουργίας καπνού και η σταθερότητα λειτουργίας για όλους τους λόγους αέρα - καυσίμου ή η μικρή πτώση πιέσεως και το μικρό μήκος φλόγας δεν μπορούν να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα. Έτσι, οι επί μέρους αλληλοσυγκρουόμενοι στόχοι αποτελούν σειρά προβλημάτων που το καθένα μόνο του αλλά και ως σύνολο, πολύ περισσότερο, είναι δύσκολο να επιλυθούν.

#### **4.4 Κατασκευαστικές λεπτομέρειες των θαλάμων καύσεως.**

Αν και η αρχή λειτουργίας των θαλάμων φαίνεται απλή, η σχεδίαση και η κατασκευή τους δυσχεραίνεται λόγω των ποικίλων συνθηκών λειτουργίας τους, οι κυριότερες από τις οποίες είναι:

1) Υψηλή θερμοκρασία φλόγας άνω των  $1800^{\circ}\text{C}$  ή  $3500^{\circ}\text{F}$ .

2) Μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές και δημιουργία θερμικών τάσεων.

3) Θερμοκρασίες λειτουργίας μεταλλικών επιφανειών που φθάνουν τους  $1000^{\circ}\text{C}$  ή  $1800^{\circ}\text{F}$ .

4) Μηχανικές καταπονήσεις από διεγείρουσες δυνάμεις ταλαντώσεων διαφόρων συχνοτήτων και πλάτους. Οι διεγείρουσες αυτές δυνάμεις οφείλονται τόσο σε καθαρώς μηχανικά φαινόμενα όσο και σε αεροδυναμικά, λόγω της ροής αέρα και καυσαερίων.

5) Μηχανικές καταπονήσεις χιτωνίου και κελυφών λόγω διαφοράς πιέσεων.

6) Μηχανικές καταπονήσεις οφειλόμενες σε διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής.

Αποτέλεσμα όλων αυτών των συνθηκών εργασίας είναι οι περισσότερες από τις αναπόφευκτα παρουσιαζόμενες βλάβες υλικού των διαφόρων συστημάτων του θαλάμου καύσεως, οι οποίες εκδηλώνονται, κατά μεγάλο ποσοστό, με ένα ή περισσότερους από τους ακόλουθους τρόπους:

α) Εμφάνιση ρωγμών κυρίως κοντά σε οπές ή ασυνέχειες της κατασκευής.

β) Εμφάνιση διακένων κοντά στις κοινές περιοχές (ενώσεις) διαφορετικών στοιχείων της κατασκευής.

γ) Αστοχία υλικού λόγω τοπικής υπερβάσεως του ορίου αντοχής.

δ) Δημιουργία μονίμων παραμορφώσεων.

ε) Εμφάνιση τοπικών υπερθερμάνσεων με σύγχρονη βλάβη του υλικού.

στ) Διάβρωση λόγω υψηλών θερμοκρασιών.

Τα φορτία που, λόγω διαφοράς πιέσεων, έχουν τάση συνθλίψεως των χιτωνίων

των θαλάμων και συγχρόνως δημιουργούν αξονικές δυνάμεις στην περιοχή του θόλου, είναι ιδιαίτερα σημαντικά στην περίπτωση των θαλάμων καύσεως της μορφής περιφερειακού δακτυλίου (annular type). Έτσι, για κάθε τέτοιο τύπο θαλάμου ο κατασκευαστής καθορίζει μια μέγιστη επιτρεπόμενη διαφορά πιέσεως, που εξαρτάται από τις διαστάσεις, τον τύπο της κατασκευής (ισχυρή ή όχι) και τις θερμοκρασίες λειτουργίας. Τυχόν υπέρβαση της μέγιστης αυτής διαφοράς πιέσεων έχει σαν αποτέλεσμα την τοπική ή καθολική βλάβη του υλικού. Σχετικό προς τα ανωτέρω είναι το γεγονός ότι κατά την πρώτη περίοδο κατασκευής αεριοστροβίλων κατασκευάζονταν τα χιτώνια θαλάμου καύσεως με παχιά τοιχώματα για την επίτευξη πιο αξιόπιστων και μακροχρόνιων κατασκευών. Η εμπειρία όμως που αποκτήθηκε στο μεταξύ, σε συνδυασμό με την πρόδοτο της μεταλλουργίας οδήγησαν στην ελάττωση του πάχους αυτού και έτσι σήμερα σπανίως συναντάται χιτώνιο με έλασμα πάχους μεγαλύτερου των 50 χιλιοστών της ίντσας.

Όπως προαναφέρθηκε η σχεδίαση των θαλάμων καύσεως βασίζεται κυρίως στην εξέλιξη πετυχημένων σχεδιάσεων που έγιναν παλαιότερα, γιατί έτσι αξιοποιείται η εμπειρία που αποκτάται στο μεταξύ. Έχει διαπιστωθεί π.χ. ότι στα χιτώνια, η δημιουργία οπών ειδικής διαμορφώσεως (με βυθισμένα χείλη), όπως του σχήματος 4.4a, τοποθετημένων επάνω σε ειδική ενίσχυση, μέσω των οποίων διέρχεται ο προοριζόμενος για την αραίωση των προϊόντων της καύσεως δευτερεύων αέρας, έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση των θερμικών τάσεων και επομένως την αποφυγή δημιουργίας ρωγμών. Επί πλέον, στην ειδική διαμόρφωση των οπών αποδίδεται τόσο η μεγαλύτερη αντοχή των χιτωνίων σε κόπωση (fatigue), δύσι και η καλύτερη ροή του αέρα. Ως υλικά κατασκευής των θαλάμων καύσεως χρησιμοποιούνται βασικά χαλυβοκράματα υψηλών θερμοκρασιών με αυξημένη αντοχή στη διάβρωση. Στις ΗΠΑ, ως υλικό κατασκευής χρησιμοποιείται ανοξείδωτος χάλυβας τύπου 18 - 8 ή 25 - 20, καθώς και τα χαλυβοκράματα εμπορικής



Σχ. 4.4a.

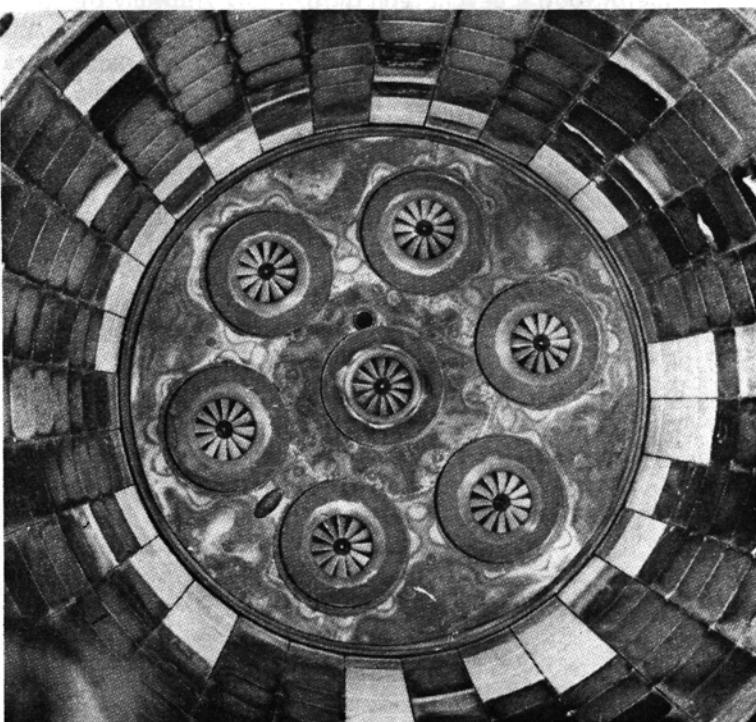
Κατασκευαστικές λεπτομέρειες χιτωνίου θαλάμου καύσεως.

ονομασίας Inconel. Όλα αυτά έχουν αποδειχθεί ικανοποιητικής λειτουργίας κατά τη χρήση τους σε θαλάμους καύσεως, υπό την προϋπόθεση επαρκούς και ελεγχόμενης ψύξεως.

Στην Ευρώπη χρησιμοποιούνται χαλυβοκράματα με την εμπορική ονομασία Nitoponic. Το υλικό αυτό είναι δύσκολο στην κατεργασία του, αλλά η χρησιμοποίησή του στην πράξη έχει αποδειχθεί πολύ επιτυχής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι Ευρωπαίοι κατασκευαστές συχνά επενδύουν τους θαλάμους καύσεως με πυρίμαχα υλικά που έχουν βάση τα οξείδια του αργιλίου. Τα υλικά αυτά εμποδίζουν την απώλεια θερμότητας από την περιοχή της φλόγας, κοντά στο θόλο του θαλάμου, ενώ συγχρόνως προστατεύουν τα υλικά κατασκευής χιτώνιου και θαλάμου καύσεως από την άμεση επαφή των φλογών. Πέρα από αυτό η με ακτινοβολία μεταδιδόμενη θερμότητα από τα πυρίμαχα υλικά βοηθεί την έναση του εγχεόμενου καυσίμου και έτσι εξασφαλίζεται σταθερότητα λειτουργίας της φλόγας, ακόμη και όταν χρησιμοποιούνται βαρέα καύσιμα, τα οποία είναι λιγότερο πτητικά.

Το πρόβλημα με τα υλικά αυτά είναι ότι δεν είναι δυνατή η μακρόχρονη χρησιμοποίησή τους, γιατί είτε οξειδώνονται είτε δημιουργούν ρωγμές λόγω της απότομης θερμοκρασιακής μεταβολής τους κατά τις εκκινήσεις και τις κρατήσεις της μηχανής. Τα φθειρόμενα πυρίμαχα υλικά πρέπει να αντικαθίστανται αμέσως, γιατί υπάρχει κίνδυνος να παρασυρθούν από το ρεύμα αέρα - καυσαερίων και να προκαλέσουν βλάβη στα πτερύγια του στροβίλου.

Στο σχήμα 4.4β φαίνεται η επένδυση ενός θαλάμου καύσεως με πυρίμαχα υλι-



**Σχ. 4.4β.**

Επένδυση θαλάμου καύσεως με πυρίμαχα υλικά.

κά. Όπως φαίνεται, αυτή αποτελείται από πολυάριθμες μικρές ψηφίδες με ενδιάμεσα κενά μεταξύ τους για τη διέλευση ψύχοντος αέρα.

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί το οξύ πρόβλημα της διαβρώσεως των θαλάμων καύσεως από τις περιεχόμενες στο καύσιμο διαβρωτικές ουσίες. Οι δυσμενέστερες επιπτώσεις προέρχονται από το υδρόθειο ( $H_2S$ ) στις περιοχές πρωτεύοντος αέρα, και από το πεντοξείδιο του βαναδίου, η σοβαρότητα δε των επιπτώσεων αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας των υλικών.

#### 4.5 Καυστήρες των θαλάμων καύσεως (μπεκ).

Στους θαλάμους καύσεως των αεριοστροβίλων χρησιμοποιούνται διάφορα είδη καυστήρων που διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους από πλευράς σχεδιάσεως και κατασκευής, ενώ έχουν κοινό το βασικό αντικειμενικό τους σκοπό, δηλαδή την έγχυση του καυσίμου υπό μορφή λεπτοτάτων σταγονιδίων, ώστε η καύση να ολοκληρώνεται μέσα στο διατιθέμενο χώρο στο συντομότερο δυνατό χρόνο.

Πέρα από τον παραπάνω βασικό στόχο, κατά την έγχυση θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι:

α) Το καύσιμο ψεκάζεται ομοιόμορφα, ώστε να μη συγκεντρώνεται τοπικά και να δημιουργούνται τοπικές υπερθερμάνσεις (hot spots).

β) Το καύσιμο ενώνεται πλήρως με τον αέρα σε όλη την περιοχή λειτουργίας της μηχανής, από την άεργη μέχρι την πλήρους φορτίου, οπότε η πάροχή του καυσίμου μεταβάλλεται κατά το λόγο 1:10.

Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι η πάροχη ικανότητα ενός δεδομένου καυστήρα εξαρτάται κυρίως από την πίεση του δικτύου πετρελαίου και το ιξώδες του καυσίμου. Θεωρητικά η παροχή είναι ανάλογη προς την τετραγωνική ρίζα της πίεσεως. Αν θέλομε δηλαδή να μειωθεί η παροχή στο μισό της αρχικής, η πίεση του δικτύου πρέπει να γίνει το ένα τέταρτο της αντίστοιχης προηγούμενης. Ιδιαίτερα χαμηλές πιέσεις όμως έχουν σαν αποτέλεσμα κακή ψέκαση του καυσίμου, ατελή καύση και δημιουργία εξανθρακωμάτων. Για την αποφυγή των προβλημάτων της χαμηλής πιέσεως, όπως επεξηγείται στα επόμενα για τα διάφορα είδη των καυστήρων, ορισμένοι καυστήρες έχουν από την κατασκευή τους δύο διαφορετικές χαρακτηριστικές καυτούλας λειτουργίας, μία για υψηλές και άλλη μία για χαμηλές παροχές.

Είναι φανερό ότι οι καυστήρες θα πρέπει να καίσουν όλα τα είδη καυσίμου που χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων. Οι περισσότεροι αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούν υγρά καύσιμα υπό την εμπορική ονομασία JP-4 (Jet propellant) ή JP-5 κλπ. Υπάρχουν όμως και τα πλοιά μεταφοράς υγροποιημένου αερίου (LNG ή LPG), τα οποία ως καύσιμο χρησιμοποιούν και τη μικρή ποσότητα του υγροποιημένου αερίου που αεριοποιείται καθημερινά λόγω εξατμίσεως\* (faيندμενο boil-off). Έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί ως καύσιμα στους αεριοστροβίλους και βαρέα κατάλοιπα πετρελαίου, όπως το λεγόμενο bunker C.

Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι το είδος του χρησιμοποιούμενου καυσίμου δημιουργεί ιδιαίτερα προβλήματα στους καυστήρες και γι' αυτό συνήθως για κάθε είδος καυσίμου έχει επικρατήσει και η χρήση αντίστοιχου τύπου καυστήρα, ενώ πα-

\* Βλέπε λεπτομέρειες στο 'Έβδομο κεφάλαιο (καύσιμα - λιπαντικά).

ράλληλα, από τους σύγχρονους κατασκευαστές, επιδιώκεται η κατασκευή καυστήρων που να μπορούν να καλύψουν τις απαιτήσεις δύλων των ειδών καυσίμου.

Οι κυριότεροι τύποι συγχρόνων καυστήρων είναι:

### **α) Καυστήρες προστομίων πιέσεως.**

Χρησιμοποιούνται κυρίως για καύσιμα χαμηλού ιξώδους και διακρίνονται σε προστόμια μιας και δύο διόδων. Είναι απλής κατασκευής, συντηρήσεως και λειτουργίας. Οι καυστήρες μιας διόδου χρησιμοποιούνται όπου το φορτίο του στροβίλου και συνεπώς και η παροχή του καυσίμου δεν μεταβάλλεται πολύ, ενώ οι της διπλής διόδου έχουν ευρύτερη περιοχή παροχικής ικανότητας καυσίμου. Οι καυστήρες διπλής διόδου, όπως φανερώνει και η ονομασία τους, έχουν ένα πρωτεύον και ένα δευτερεύον άνοιγμα. Στην άεργη λειτουργία ή στα χαμηλά φορτία, οπότε η ροή του καυσίμου είναι μικρή, το καύσιμο διέρχεται από το πρωτεύον άνοιγμα με τη βοήθεια ελατηριωτής βαλβίδας, ενώ, όταν αυξάνει το φορτίο, η αυξανόμενη πίεση καταθλίψεως ενεργοποιεί και το δευτερεύον άνοιγμα, οπότε αυξάνει και η παροχή. Με αυτό τον τρόπο ο καυστήρας έχει δύο διαφορετικές χαρακτηριστικές λειτουργίες ανάλογα με την παροχή του, και εξασφαλίζεται η ικανοποιητική λειτουργία του σε ευρείες μεταβολές της ποσότητας του καυσίμου.

### **β) Καυστήρες προστομίων υποπέσεως.**

Στους καυστήρες αυτούς, ο ψεκασμός του καυσίμου επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ρεύματος αέρα που δημιουργείται από την πτώση πιέσεως μέσα στο θάλαμο καύσεως, δηλαδή η ροή του ρεύματος γύρω από τον καυστήρα σχηματοποιεί τη δέσμη του εγχεδύμενου καυσίμου.

Η καύση χαρακτηρίζεται από φλόγα κυανού χρώματος χαμηλής φωτεινότητας (λαμπρότητας), ενώ συγχρόνως η θερμοκρασία των τοιχωμάτων του θαλάμου καύσεως διατηρείται σε χαμηλά δρια και δεν δημιουργείται καπνός. Το μειονέκτημα των καυστήρων αυτών είναι η σχετικά χαμηλή απόδοσή τους σε μικρά φορτία.

### **γ) Καυστήρες προστομίων πεπιεσμένου αέρα.**

Είναι καυστήρες μιας διόδου που λειτουργούν με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα, ο οποίος παρέχεται από εξωτερική πηγή. Σε χαμηλές παροχές και πιέσεις καυσίμου, ο αέρας αυτός βοηθεί στη διάσπαση και τον ψεκασμό του καυσίμου ενώ σε μεγαλύτερες παροχές η μεγαλύτερη αντίστοιχη πίεση δεν χρειάζεται τη βοήθεια του αέρα για να ψεκάσει το καύσιμο υπό μορφή σταγονιδίων. Το είδος αυτό των καυστήρων χρησιμοποιείται ευρύτατα σε αεριοστροβίλους που χρησιμοποιούν βαρέα καύσιμα μέχρι και bunker C, οπότε πα τη βοήθεια του πεπιεσμένου αέρα για τη διάσπαση και έγχυση του καυσίμου είναι απαραίτητη σε όλη την περιοχή λειτουργίας των μηχανών. Χρησιμοποιούνται επίσης και για την καύση ελαφροτέρων αποσταγμάτων πετρελαίου, όταν είναι επιθυμητή η σε κάθε περίπτωση αποφυγή δημιουργίας καπνού. Οι καυστήρες αυτοί έχουν, πέρα από τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν ήδη και το μειονέκτημα της πολυπλοκότερης εγκαταστάσεως και του μεγαλύτερου βάρους και δύκου.

### **δ) Καυστήρες προστομίων εξατμίσεως.**

Στους καυστήρες αυτούς, το καύσιμο, πριν εισέλθει στο θάλαμο καύσεως, περ-

νά μέσα από ένα σωλήνα και προθερμαίνεται.

Τα πλεονεκτήματα των καυστήρων του είδους αυτού είναι:

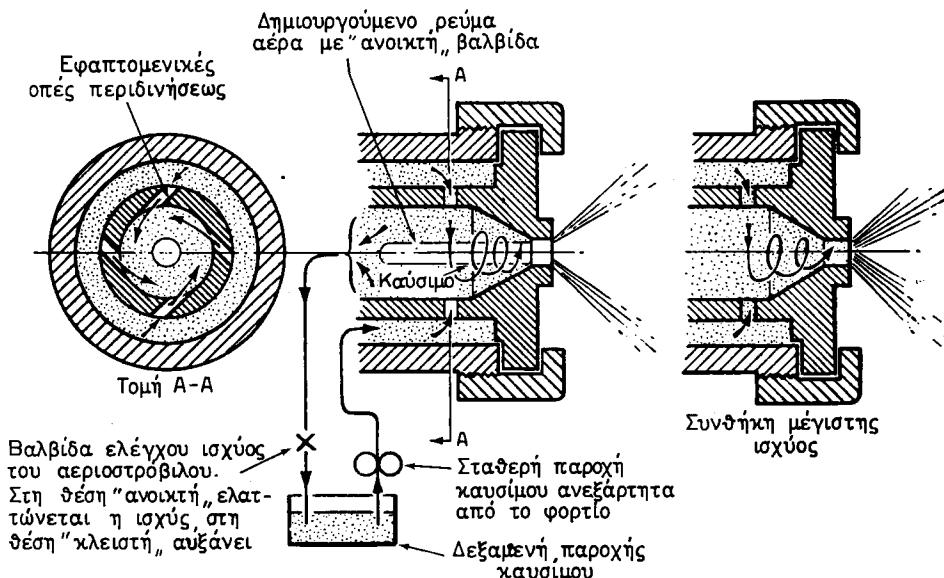
- 1) Αποφυγή δημιουργίας πλουσίων μιγμάτων σε καύσιμο.
- 2) Δημιουργία κυανής φλόγας και ελαχιστοποίηση των απωλειών θερμότητας από ακτινοβολία, καθώς επίσης και αποφυγή δημιουργίας καπνού.
- 3) Η πλήρης διάσπαση του καυσίμου επιτυγχάνεται ανεξάρτητα από τη ροή και συνεπώς και η κατανομή των θερμοκρασιών είναι ανεξάρτητη από αυτή.

Τα μειονεκτήματα των καυστήρων αυτού του είδους είναι ότι δεν λειτουργούν ικανοποιητικά σε περίπτωση ιδιαίτερα πτωχών μιγμάτων και ότι είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στις μεταβολές των ιδιοτήτων του χρησιμοποιούμενου καυσίμου.

#### **ε) Καυστήρες επανακυκλοφορίας.**

Αυτοί χρησιμοποιούνται σε αεριστροβίλους όπου είναι επιθυμητή η διατήρηση ικανοποιητικών συνθηκών καύσεως σε ευρεία περιοχή μεταβολής του φορτίου. Η αρχή λειτουργίας τους είναι, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5, η επανακυκλοφορία της πλεονάζουσας ποσότητας καυσίμου, ώστε η μορφή του κώνου ψεκάσεως να μη μεταβάλλεται αισθητά.

Έτσι, όταν η βαλβίδα επανακυκλοφορίας είναι ανοικτή, τμήμα του καυσίμου δεν καταλήγει στο χώρο καύσεως, ενώ, όταν κλείνει, όλο το καύσιμο ψεκάζεται στον καυστήρα. Ο χειρισμός της βαλβίδας επανακυκλοφορίας (χ στο σχήμα 4.5) εκτελείται από το κεντρικό χειριστήριο της μηχανής.



**Σχ. 4.5.**  
Αρχή λειτουργίας καυστήρων.

#### **στ) Φυγοκεντρικοί καυστήρες.**

Η αρχή λειτουργίας τους είναι η διάσπαση του καυσίμου από τη φυγόκεντρο δύναμη που αναπτύσσεται σε ένα περιστρεφόμενο κέλυφος, μέσα στο οποίο ει-

σέρχεται το υπό ψέκαση καύσιμο. Παρουσιάζει τα ακόλουθα σοβαρά πλεονεκτήματα:

1) Ομοιόμορφη κατανομή αναπτυσσομένων θερμοκρασιών στο θάλαμο καύσεως.

2) Δυνατότητα χρησιμοποιήσεως του συνόλου των χρησιμοποιουμένων σε αεριοστροβίλους καυσίμων, χωρίς δημιουργία καπνού ή καταλοίπων.

3) Ευχέρεια συντηρήσεως.

Εκτός των προαναφερθέντων ειδών καυστήρων έχουν κατά καιρούς προταθεί ή χρησιμοποιηθεί και άλλα, των οποίων δύναμη τελικά δεν γενικεύθηκε η χρησιμοποίηση. Η ύπαρξη πληθώρας καυστήρων που διαφέρουν στην αρχή λειτουργίας, δείχνει ότι κανένα από τα χρησιμοποιούμενα είδη δεν υπέρτερεί σημαντικά απέναντι στα υπόλοιπα, ώστε να επικρατήσει η χρήση του. Αντίθετα, η χρησιμοποίηση του ενός ή του άλλου είδους εξαρτάται από:

α) Το είδος του χρησιμοποιούμενου καυσίμου.

β) Τη διάταξη του συστήματος καύσεως.

γ) Την περιοχή μεταβολής της ροής καυσίμου, η οποία εξαρτάται από τις δυνατές διακυμάνσεις του φορτίου.

δ) Τις συνθήκες περιβάλλοντος λειτουργίας.

#### **4.6 Βοηθητικά συστήματα καύσεως.**

Εξετάζονται παρακάτω το σύστημα παρακολουθήσεως της καύσεως και το σύστημα αρχικής εναύσεως.

##### **4.6.1 Σύστημα παρακολουθήσεως της καύσεως.**

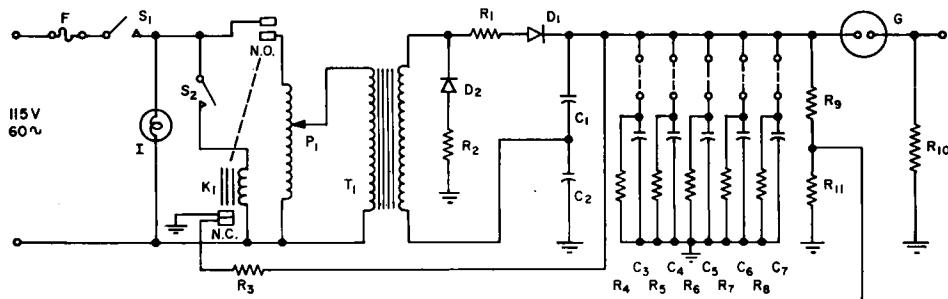
Πολλοί κατασκευαστές χρησιμοποιούν συστήματα ελέγχου, τα οποία, σε περίπτωση αντικανονικής λειτουργίας κάποιου θαλάμου καύσεως, είτε ειδοποιούν με οπτικοακουστικό σήμα είτε ακόμη και περιορίζουν τη ροή του καυσίμου. Αυτό γίνεται κυρίως για την αποφυγή εκρήξεως που θα μπορούσε να δημιουργηθεί από υπερβολική συγκέντρωση άκαυστου πετρελαίου σε κάποια περιοχή της εγκαταστάσεως.

Τα συστήματα ελέγχου λειτουργούν είτε με τη βοήθεια ενός φωτοηλεκτρικού κυττάρου, το οποίο «βλέπει» τη διατήρηση της φλόγας, είτε με βάση την αρχή ότι τα καυσαέρια με την παρουσία φλόγας ιονίζονται και καθίστανται καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού, οπότε, σε κάθε στιγμή είναι δυνατό να ελεγχθεί η διατήρηση ή όχι της φλόγας σε όλους τους θαλάμους καύσεως. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα συστήματα ελέγχου της καύσεως λειτουργούν «επάνω σε ασφαλή βάση», δηλαδή, σε περίπτωση τυχαίας βλάβης των ίδιων των συστημάτων, ενεργοποιείται η διάταξη ασφαλείας σαν να είχε σημειωθεί βλάβη στο ελεγχόμενο σύστημα.

##### **4.6.2 Σύστημα αρχικής εναύσεως.**

Αν και η καύση στους αεριοστροβίλους είναι αυτοδιατηρούμενη και συνεχής, δύναμη για την αρχική έναυση χρησιμοποιείται ξεχωριστό σύστημα.

Το ξεχωριστό αυτό σύστημα είναι βασικά ηλεκτρικό και αποτελείται από σπινθηριστές στους θαλάμους καύσεως και από το σύστημα δημιουργίας των σπινθήρων από μια πηγή υψηλής τάσεως (μέχρι 20.000 Volts).



|                       |                                |                       |
|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Τάση λειτουργίας      | : 110-120 VOLTS 50-60 περίοδοι | 'Ελεγχος σπινθηρισμών |
| Ρεύμα λειτουργίας     | : 7 AMPS , μέγιστο             |                       |
| Αποδημευμένη ενέργεια | : 1-20 JOULES                  |                       |
| Αριθμός σπινθηρισμών  | : 0-100 και 0-5 SPARKS/sec     |                       |
| Τάση διάκενου         | : 3000 - 3100 VOLTS            |                       |

**Σχ. 4.6.**  
Ηλεκτρικό σύστημα ενάύσεως.

Το σύστημα αποτελείται επίσης από μετασχηματιστές, πυκνωτές και λοιπά στοιχεία ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, φαίνεται δε διαγραμματικά στο σχήμα 4.6.

Ως σπινθηριστές χρησιμοποιούνται διάφορα είδη απ' αυτούς, εφ' όσον δεν παρουσιάζουν προβλήματα εξ αιτίας της αναπόφευκτης ρυπάνσεώς τους από τα προϊόντα της καύσεως.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

### ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΑΝΑΚΤΗΣΕΩΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΗΡΕΣ)

#### 5.1 Στοιχεία Θεωρίας. Ροή Θερμότητας.

Όταν κοντά σε ένα σώμα ή και σε επαφή με αυτό ρέει ένα ρευστό (υγρό ή αέριο) με διαφορετική θερμοκρασία από τη θερμοκρασία του σώματος, είναι φυσικό φαινόμενο η μεταφορά θερμότητας από ή προς το σώμα. Το φυσικό αυτό φαινόμενο είναι η βάση λειτουργίας για τους εναλλάκτες θερμότητας και λέγεται **μετάδοση θερμότητας με μεταφορά**. Η κίνηση (ή ροή ή κυκλοφορία) του ρευστού μπορεί να είναι **βεβιασμένη**, να προκαλείται δηλαδή από μια αντλία ή ένα ανεμιστήρα, ή **φυσική**, δηλαδή να οφείλεται στο ίδιο το φαινόμενο της μεταδόσεως θερμότητας που δημιουργεί διαφορές πυκνότητας στη μάζα του ρευστού.

Η βασική εξίσωση που καθορίζει ποσοτικά το φαινόμενο της μεταδόσεως θερμότητας με μεταφορά είναι:

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T$$

όπου:  $Q$  = μεταφερόμενη θερμότητα στη μονάδα του χρόνου,

$A$  = επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας,

$\Delta T$  = διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ σώματος και ρευστού και

$h$  = συντελεστής επιφανειακής μεταφοράς θερμότητας.

Στην παραπάνω σχέση, με την οποία υπολογίζεται η μεταφερόμενη θερμότητα, είναι συνήθως δύσκολος ο προσδιορισμός της τιμής του επιφανειακού συντελεστή μεταδόσεως θερμότητας « $h$ » που πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε κάθε πρόβλημα. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται κυρίως από τις ιδιότητες του ρευστού, την ταχύτητα, τις συνθήκες ροής κλπ. Μερικές αριθμητικές τιμές του « $h$ » για χαρακτηριστικά προβλήματα μεταδόσεως θερμότητας με μεταφορά δίνονται στον πίνακα 5.1.1.

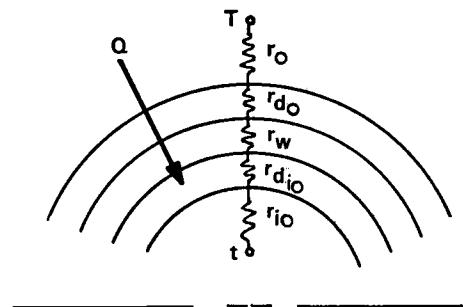
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1.1.

|                                | Αριθμητική τιμή $h$ (σε $W/m^2k$ ) |        |
|--------------------------------|------------------------------------|--------|
| Φυσική κυκλοφορία αέρα ή ατμού | 5 ÷                                | 25     |
| Φυσική κυκλοφορία νερού        | 70 ÷                               | 700    |
| Βεβιασμένη κυκλοφορία αέρα     | 12 ÷                               | 250    |
| Βεβιασμένη κυκλοφορία νερού    | 600 ÷                              | 6000   |
| Ατμοποιούμενο νερό             | 3000 ÷                             | 6000   |
| Συμπυκνούμενος υδρατμός        | 6000 ÷                             | 30.000 |

Από τον πίνακα 5.1.1 προκύπτουν δύο συμπεράσματα:

Το πρώτο είναι ότι το φαινόμενο της μεταδόσεως θερμότητας με μεταφορά διέπει και τα φυσικά φαινόμενα με αλλαγή φάσεως του ρευστού, δηλαδή τη συμπύκνωση και το βρασμό.

Το δεύτερο είναι ότι τα όρια στα οποία κυμαίνεται η τιμή του συντελεστή « $h$ » για κάθε περίπτωση είναι πολύ πλατιά. Επειδή η μεταφερόμενη θερμότητα είναι ανάλογη της τιμής του « $h$ », ανακριβής καθορισμός της τιμής αυτής οδηγεί σε αποτέλεσμα που μπορεί να διαφέρουν πολύ μεταξύ τους. Θα πρέπει να διευκρινισθεί ότι, όπου στα προηγούμενα αναφέρεται «σώμα» σε επαφή με ρευστό, εννοούνται και οι τρεις μορφές της ύλης, δηλαδή στερεά, υγρά και αέρια και συνεπώς η μετάδοση θερμότητας μπορεί να γίνεται από ένα ρευστό σε άλλο όπως είναι καί η συνηθέστερη περίπτωση στούς εναλλάκτες θερμότητας καί στούς αναγεννητήρες. Στην περίπτωση όμως ενός εναλλάκτη, το πρόβλημα μεταδόσεως της θερμότητας είναι πιο σύνθετο από την απλή μετάδοση με μεταφορά. Στο σχήμα 5.1α φαίνεται παραστατικά το φαινόμενο μεταδόσεως θερμότητας από ένα θερμό ρευστό θερμοκρασίας  $T_0$  σε ένα ψυχρότερο ρευστό θερμοκρασίας  $t_0$ .



Σχ. 5.1α.

Μετάδοση θερμότητας μέσα από πολλαπλά κυλινδρικά στρώματα.

Η μαθηματική σχέση που καθορίζει το φαινόμενο είναι:

$$Q = \frac{A_0 (T - t)}{\Sigma_r}$$

όπου:  $Q$  = μεταδιδόμενη θερμότητα,

$T$  = θερμοκρασία του θερμού ρευστού,

$t$  = θερμοκρασία του ψυχρού ρευστού,

$A_0$  = εξωτερική επιφάνεια των αυλών μέσα από την οποία μεταδίδεται η θερμότητα,

$\Sigma_r$  =  $r_{i_0} + r_{d_{i_0}} + r_w + r_{d_o} + r_o$ ,

$r_{d_{i_0}}$  = αντίσταση μεταδόσεως της θερμότητας μέσα από τις καθαλατώσεις (ή επικαθήσεις) στο εσωτερικό του αυλού,

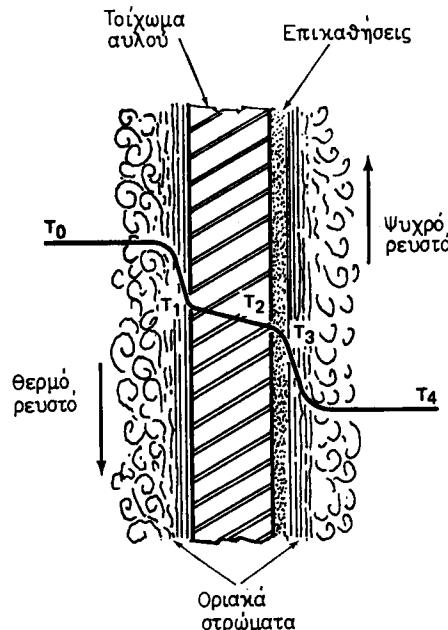
$r_{i_0}$  = αντίσταση μεταδόσεως της θερμότητας μέσα από το στρώμα του ρευστού στο εσωτερικό του αυλού,

$r_w$  = αντίσταση μεταδόσεως της θερμότητας μέσα από το μεταλλικό τοίχωμα του αυλού,

$r_{d_0}$  = αντίσταση μεταδόσεως της θερμότητας μέσα από τις καθαλατώσεις (ή επικαθήσεις) στο εξωτερικό του αυλού και

$r_o$  = αντίσταση μεταδόσεως της θερμότητας μέσα από το στρώμα του ρευστού στο εξωτερικό του αυλού.

Όλες οι ποσότητες φαίνονται στο σχήμα 5.1α, ενώ στο σχήμα 5.1β φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας καθώς η θερμότητα διέρχεται μέσα από τα διάφορα στρώματα.



Σχ. 5.1β.

Η μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τη μετάδοση θερμότητας.

Οι αντιστάσεις μεταδόσεως θερμότητας μέσα από τα στρώματα των ρευστών  $r_{io}$  και  $r_o$  συνδέονται με τους αντίστοιχους επιφανειακούς συντελεστές μεταδόσεως θερμότητας  $h_{io}$  και  $h_o$  διά των αντιστρόφων σχέσεων, δηλαδή:

$$r_{io} = \frac{1}{h_{io}} \quad \text{και} \quad r_o = \frac{1}{h_o}$$

Οι αντιστάσεις μεταδόσεως θερμότητας μέσα από τις καθαλατώσεις ή επικαθήσεις  $r_{d_{10}}$  και  $r_{d_o}$  υπολογίζονται κυρίως με βάση εμπειρικές μεθόδους ή κατ' εκτίμηση, ενώ η αντίσταση μεταδόσεως θερμότητας μέσα από το τοίχωμα του αυτού  $r_w$  είναι γνωστή για τα διάφορα υλικά κατασκευής και πάχη των αυλών.

Κατόπιν των ανωτέρω ορίζομε ως ολικό συντελεστή μεταδόσεως θερμότητας (ΟΣΜΘ) τον αντίστροφο του  $\Sigma_r$ , δηλαδή:

$$U = \frac{1}{(1/h_{io}) + r_{d_o} + r_w + r_{d_{10}} + (1/h_o)}$$

και το ποσό της μεταδιδόμενης θερμότητας  $Q$  δίνεται πια από τη σχέση:

$$Q = A \cdot U (T - t)$$

Είναι φανερό όμως ότι επειδή η θερμοκρασιακή διαφορά  $(T - t)$  μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο (σχ. 5.1β) όμοια θα μεταβάλλεται και η ροή θερμότητας  $Q$ . Για να υπολογισθεί το συνολικό ποσό θερμότητας που μεταδίδεται ανά μονάδα χρόνου σε ένα εναλλάκτη θερμότητας οι υπολογισμοί βασίζονται σε μια μέση θερμοκρασιακή διαφορά. Ως τέτοια θερμοκρασιακή διαφορά επιλέγεται η λογαριθμική μέση που ορίζεται από τη σχέση:

$$\text{Λογαριθμική μέση θερμοκρασιακή διαφορά (ΛΜΘΔ)} = \frac{1}{A_0} \int_0^{A_0} (T - t) dA$$

και το μεταβιβαζόμενο ποσό μεταδόσεως θερμότητας στη γενικότερη περίπτωση είναι:

$$Q = UA_0 \quad (\Lambda M \Theta \Delta) \quad (5.1)$$

Η σχέση (5.1) είναι το σημείο εκκινήσεως για τον αναλυτικό υπολογισμό και τη σχεδίαση δλων των εναλλακτών και των αναγεννητήρων θερμότητας.

## 5.2 Οι εναλλάκτες θερμότητας στις εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων.

Τους εναλλάκτες θερμότητας των εγκαταστάσεων αεριοστροβίλων, διακρίνομε σε τρεις κυρίως κατηγορίες, ανάλογα με τη χρήση τους. Ειδικότερα έχομε:

### α) Εναλλάκτες ψύξεως λαδιού λιπάνσεως.

Είναι μικρού σχετικά μεγέθους και χρησιμοποιούν ως ψυκτικό μέσον συνήθως νερό ή αέρα, με τα οποία επιτυγχάνεται ώστε η θερμοκρασία του λαδιού λιπάνσεως που κυκλοφορεί σε κλειστό κύκλωμα να μην υπερβαίνει ορισμένη τιμή.

### β) Εναλλάκτες ενδιάμεσης ψύξεως συμπεστή.

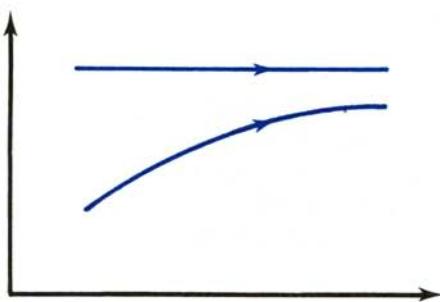
Η ενδιάμεση ψύξη σε συνδυασμό με αναγεννητήρες αυξάνει όπως είναι γνωστό το θερμικό βαθμό αποδόσεως του κύκλου, συγχρόνως όμως καθιστά την εγκάταση πολύπλοκη και απαιτεί πολύ διαθέσιμο όγκο.

### γ) Εναλλάκτες αναγεννητήρων.

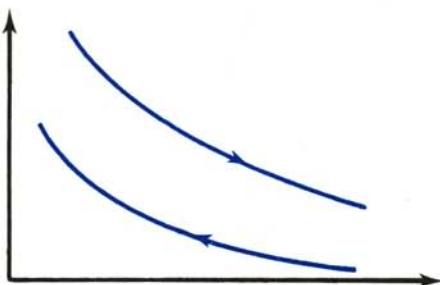
Παρ' ότι αυξάνουν σημαντικά το θερμικό βαθμό αποδόσεως του κύκλου, δεν χρησιμοποιούνται σε όλες τις εγκαταστάσεις, γιατί καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο και αυξάνουν πολύ τό βάρος της πρωστήριας εγκαταστάσεως. Αποτελούν ακόμη αντικείμενο έρευνας, ώστε να ελαπτωθεί το βάρος και ο όγκος των εναλλακτών και συγχρόνως, εκτός από την αύξηση του βαθμού αποδόσεως, να επιτυγχάνεται και μείωση του επιπέδου του θορύβου των καυσαερίων.

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται διαγραμματικά οι συνηθέστερες περιπτώσεις ροής σε εναλλάκτες θερμότητας από αυτούς που χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις των αεριοστροβίλων. Έτσι, στο σχήμα 5.2α φαίνονται τα είδη των ροών και στο σχήμα 5.2β οι ροές όπως λαμβάνουν χώρα στους εναλλάκτες.

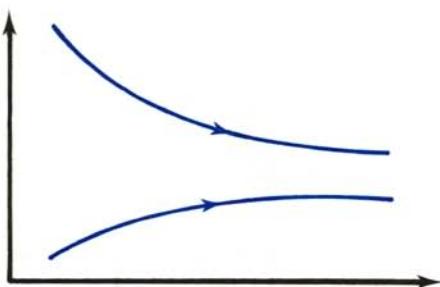
Θα προσπαθήσουμε τώρα να εφαρμόσουμε τα στοιχεία θεωρίας στις συγκεκριμέ-



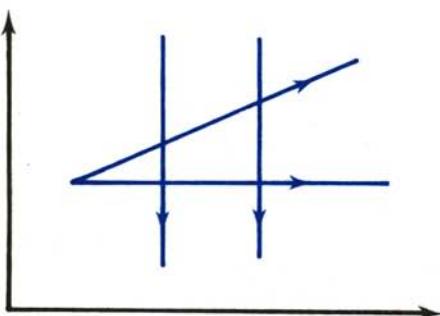
α) Περίπτωση μονορροής. Σταθερή θερμοκρασία στη μία πλευρά, μεταβαλλόμενη τοπικά θερμοκρασία στην άλλη.



β) Περίπτωση αντιρροής. Δύο ρευστά ρέοντα προς αντίθετες διευθύνσεις με μεταβαλλόμενη τοπικά θερμοκρασία και στις δύο πλευρές.

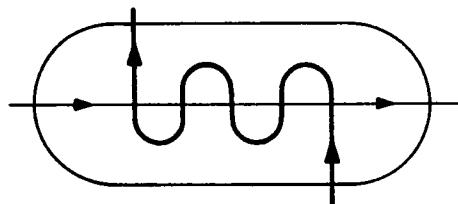


γ) Περίπτωση ομορροής. Παρόμοια προς την προηγούμενη αλλά τα δύο ρευστά ρέουν προς την ίδια διεύθυνση.



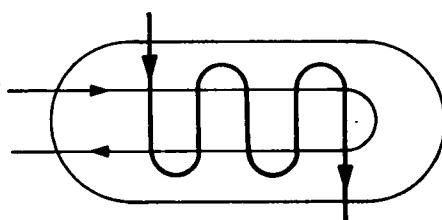
δ) Περίπτωση σταυρορροής. Παρόμοια προς τη (2), αλλά τα ρευστά ρέουν προς διασταυρούμενες κατευθύνσεις.

Σχ. 5.2α.



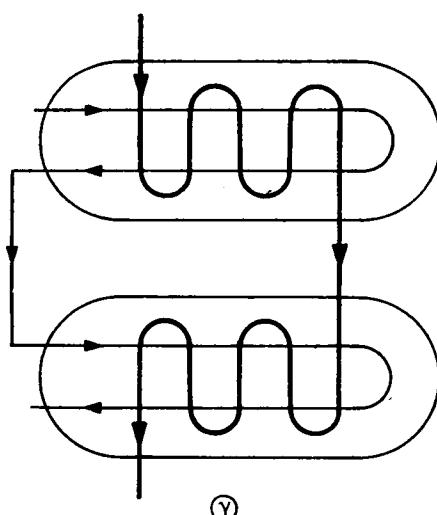
α) Περιστροφή αντιρροής απλής διαδρομής.

(a)



β) Περίπτωση αντιρροής διπλής διαδρομής.

(β)



γ) Συνδυασμός δύο εναλλακτών διπλής διαδρομής.

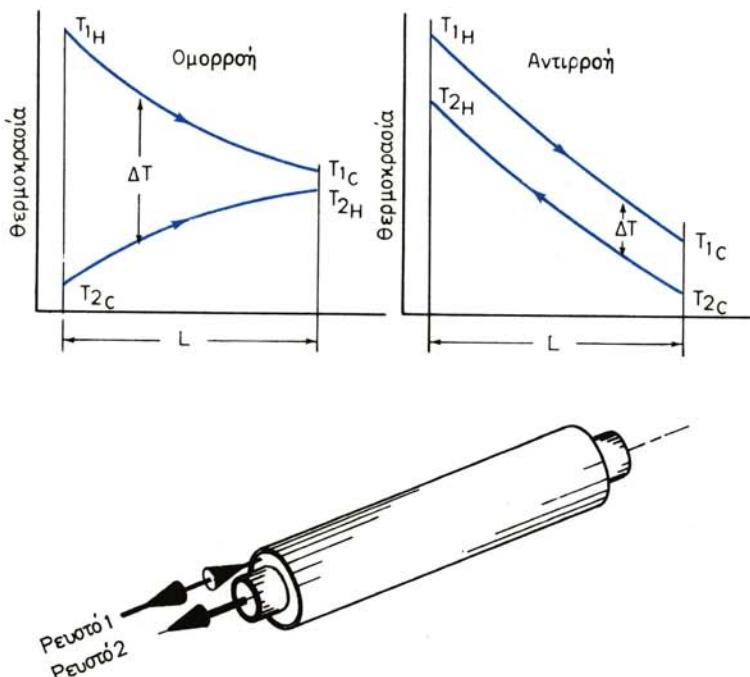
### Σχ. 5.2β.

Η ροή των ρευστών σε διάφορα είδη εναλλακτών θερμότητας.

νες περιπτώσεις μεταδόσεως θερμότητας των εναλλακτών που χρησιμοποιούνται συνήθως στην πράξη. Θεωρούμε ότι η στοιχειώδης μορφή του εναλλάκτη θερμότητας αποτελείται από δύο ομόκεντρους σωλήνες, στο εσωτερικό των οποίων κυκλοφορούν αντίστοιχα το ψυχρό και το θερμό ρευστό. Η μετάδοση θερμότητας καθορίζεται από παρόμοια σχέση προς την (5.1), δηλαδή:

$$Q = U \cdot A \Delta T_m$$

Ως επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας λαμβάνεται συνήθως η εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα που χωρίζει τα δύο ρευστά. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2γ, η θερμοκρασιακή μεταφορά μεταξύ θερμού και ψυχρού ρευστού μεταβάλλεται κατά μήκος του εναλλάκτη θερμότητας, καθώς του μεν θερμού ρευστού ελαττώνεται η θερμοκρασία, ενώ του ψυχρού αυξάνεται.



**Σχ. 5.2γ.**  
Αρχή λειτουργίας εναλλάκτη θερμότητας.

Ως μέση θερμοκρασιακή διαφορά  $\Delta T_m$  συνήθως χρησιμοποιείται η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασιών που ορίζεται για την περίπτωση αυτή ως:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_m - \Delta T_\epsilon}{\ln \left( \frac{\Delta T_m}{\Delta T_\epsilon} \right)}$$

Στη σχέση αυτή,  $\Delta T_m$  και  $\Delta T_e$  είναι αντίστοιχα η μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στα áκρα του εναλλάκτη θερμότητας. Ο ολικός συντελεστής μεταδόσεως θερμότητας ΟΣΜΘ (U) είναι όπως και στη γενική περίπτωση, το αντίστροφο του αθροίσματος τριών όρων που εκφράζουν τις θερμικές αντιστάσεις μεταξύ των δύο ρευστών, δηλαδή:

$$U = \left( \frac{1}{h_0} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_i} \right)^{-1}$$

όπου:  $h_0$  = επιφανειακός συντελεστής μεταδόσεως θερμότητας της εξωτερικής επιφάνειας διαχωρισμού των ρευστών,

$h_i$  = επιφανειακός συντελεστής μεταδόσεως θερμότητας της εσωτερικής επιφάνειας διαχωρισμού,

$x$  = πάχος της επιφάνειας διαχωρισμού και

$k$  = συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού κατασκευής των αυλών.

Όπως βλέπομε, στον υπολογισμό του ΟΣΜΘ δεν έχουν ληφθεί υπ' όψη οι αντιστάσεις  $r_{d_0}$  και  $r_{d_{10}}$ . Αυτό συμβαίνει είτε γιατί οι αριθμητικές τιμές τους είναι μικρές και δεν επηρεάζουν σημαντικά το αποτέλεσμα, είτε γιατί οι αυλοί θεωρούνται απαλλαγμένοι καθαλατώσεων και επικαθήσεων.

Στην περίπτωση επίσης που κάποιο από τα ρευστά του εναλλάκτη θερμότητας είναι αέριο, όπως συμβαίνει π.χ. στους αναγεννητήρες ή στους εναλλάκτες ενδιάμεσης ψύξεως, τότε οι τιμές των επιφανειακών συντελεστών μεταδόσεως θερμότητας  $h$  είναι πολύ μικρές, με αποτέλεσμα και η τιμή του ΟΣΜΘ  $U$  να είναι μικρή. Η φυσική σημασία της μικρής τιμής του  $U$  είναι ότι για δεδομένη απαίτηση μεταδόσεως θερμότητας, απαιτείται μεγάλος δύκος εναλλάκτη.

### 5.3 Πρακτική χρησιμοποίηση των εναλλακτών θερμότητας.

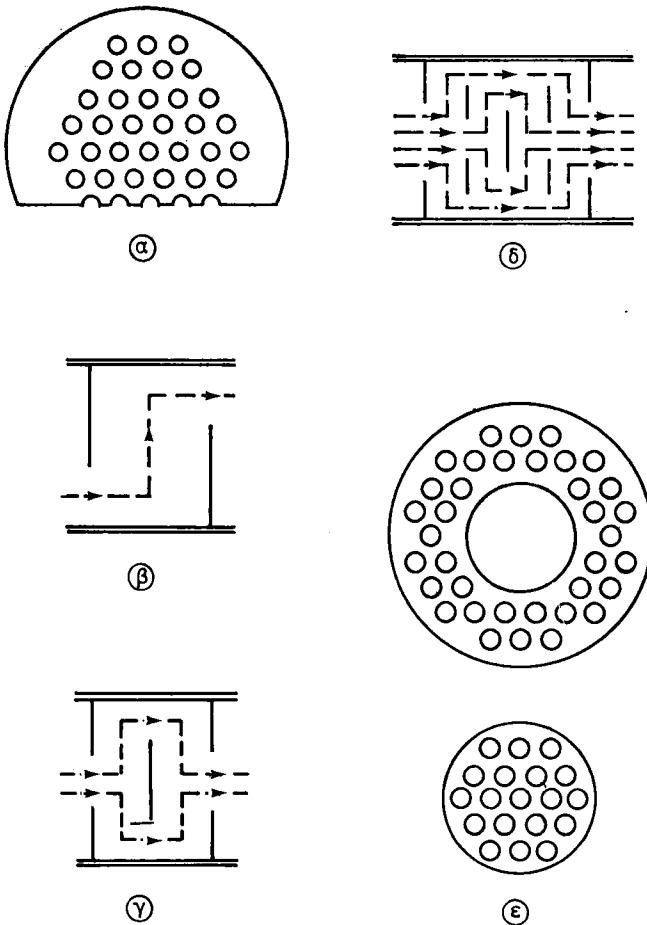
Για να αυξηθεί η μεταδόση θερμότητα, όπως προκύπτει από τη σχέση (5.1), αρκεί να αυξηθεί η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας  $A$ . Επειδή αύξηση της επιφάνειας  $A$  συνεπάγεται αύξηση του βάρους και του όγκου του εναλλάκτη, τα οποία είναι ανεπιθύμητα, υπάρχουν διάφοροι άλλοι τρόποι που, ενώ αυξάνουν κατά πολύ την επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας, η αντίστοιχη αύξηση του βάρους και του όγκου είναι μικρότερη.

Αν π.χ. στο σχήμα 5.2γ ο εσωτερικός σωλήνας αντικατασταθεί από περισσότερους μικρότερης διαμέτρου, τότε αυξάνει κατά πολύ η επιφάνεια  $A$ .

#### Αριθμητική εφαρμογή.

Με διάμετρο εξωτερικού σωλήνα 2 ίντσες και εσωτερικού 1,25 ίντσες, η επιφάνεια  $A$  είναι 0,43 τετραγωνικά πόδια ανά πόδι μήκους εναλλάκτη. Αντικαθιστώντας τον εσωτερικό σωλήνα με οκτώ (8) αυλούς διαμέτρου 0,5 ίντσες, που χωρούν στον εξωτερικό σωλήνα των 2 ίντσών, η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας  $A$  γίνεται 1,26 τετραγωνικά πόδια ανά πόδι μήκους εναλλάκτη, δηλαδή **τριπλασιάζεται**.

Άλλος τρόπος είναι η αύξηση του αριθμού των διαδρομών και της ταχύτητας των ρευστών που επιτυγχάνεται με τη βοήθεια διαφραγμάτων όπως του σχήματος 5.3α. Επίσης, με κατάλληλη διευθέτηση των αυλών και των μεταξύ τους αποστά-



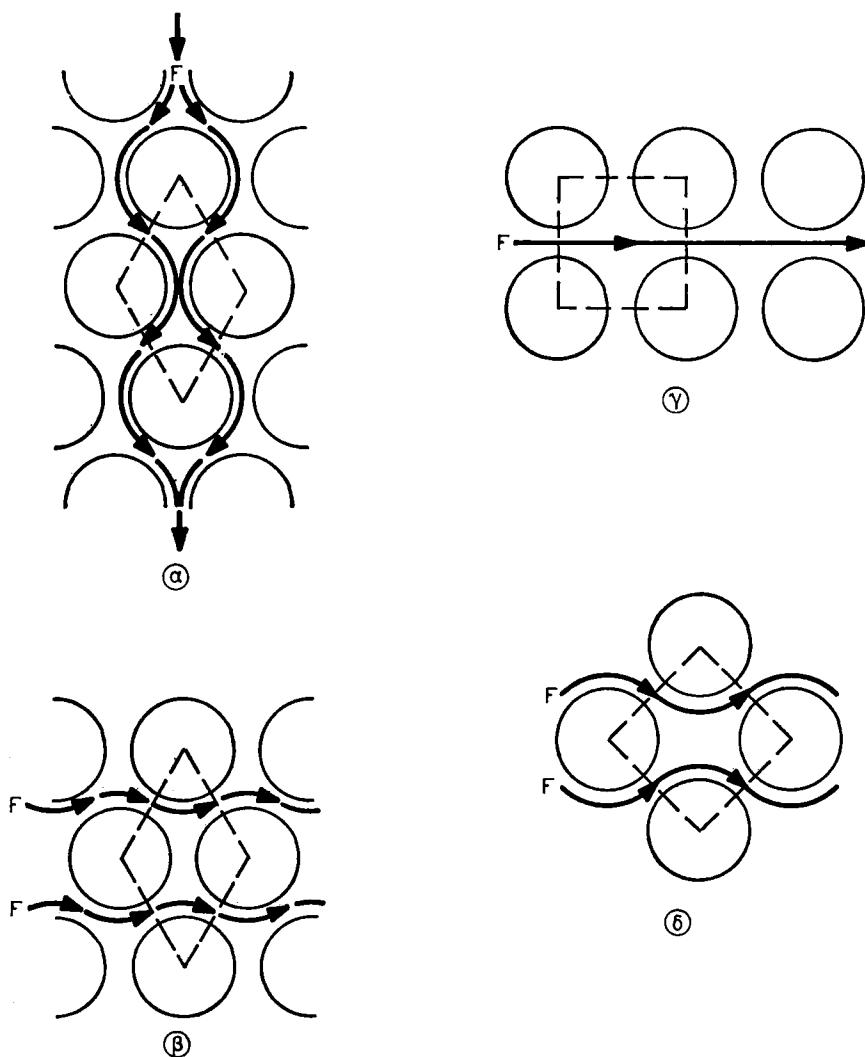
Σχ. 5.3α.

Διαφράγματα ελέγχου της ροής σε εναλλάκτες θερμότητας.

- α) Πολλαπλών οπών. β) Απλής διαδρομής. γ) Διπλής διαδρομής. δ) Τριπλής διαδρομής. ε) Δισκοειδές και δακτυλιοειδές.

σεων (βήμα αυλών) επιτυγχάνομε την αύξηση του αριθμού των διαδρομών με σύγχρονη αύξηση του αριθμού των αυλών. Στο σχήμα 5.3β φαίνονται διάφοροι σχηματισμοί αυλών, καθώς και η ροή του ρευστού έξω από αυτούς. Τα τριγωνικής μορφής βήματα χρησιμοποιούνται όπου η διατήρηση μικρού όγκου είναι πρωταρχικής σημασίας, ενώ τα τετραγωνικά βήματα καθιστούν ευκολότερο τον καθαρισμό και τη συντήρηση των εναλλακτών.

**Συμπερασματικά**, ο πρακτικότερος τρόπος μειώσεως του όγκου του εναλλάκτη θερμότητας είναι η αύξηση του αριθμού των αυλών του ή η αύξηση της ταχύτητας ή και η αύξηση των διαδρομών ροής. Σ' αυτές τις επιθυμητές αυξήσεις υπάρχει ένα δριο που δεν επιτρέπει την απεριόριστη συνέχισή τους και επιβάλλεται από δύο παράγοντες:

**Σχ. 5.3β.**

Διάταξη αυλών σε εναλλάκτες θερμότητας.

- α) Αυλοί τριγωνικού βήματος. β) Αυλοί ρομβοειδούς βήματος. γ) Αυλοί τετραγωνικού βήματος. δ) Αυλοί πλάγιου τετραγωνικού βήματος.

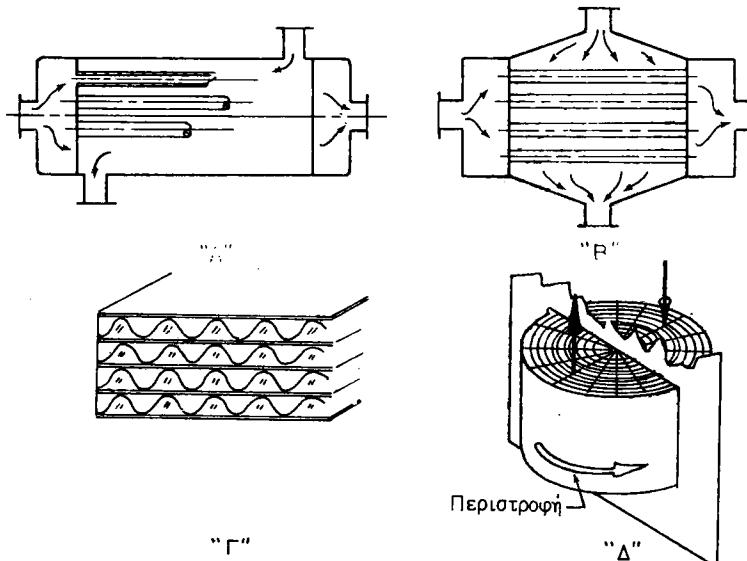
α) Υπάρχουν προβλήματα για την κατασκευή εναλλακτών με αυλούς πολύ μικρής διαμέτρου.

β) Με πολύ μικρούς αυλούς και μεγάλο αριθμό διαδρομών έχουμε μεγάλη πτώση πιέσεως των ρευστών, πράγμα που είναι τελείως ανεπιθύμητο στους αεριοστροβίλους.

Επομένως, αντικειμενικός σκοπός στη σχεδίαση των εναλλακτών θερμότητας είναι:

- Μεγιστοποίηση επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας Α.
- Ελαχιστοποίηση αυξήσεως βάρους και όγκου.
- Ελαχιστοποίηση πτώσεως πιέσεως.

Στο σχήμα 5.3γ φαίνονται τέσσερις χαρακτηριστικοί τύποι εναλλακτών θερμότητας που χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις ναυτικών αεριοστροβίλων. Από αυτούς, οι δύο επάνω είναι χαρακτηριστικής σχεδιάσεως πολλών αυλών, ενώ οι δύο κάτω έχουν ως χαρακτηριστικό την περισσότερο συμπαγή κατασκευή τους.



**Σχ. 5.3γ.**

Διάφορα είδη εναλλακτών θερμότητας.

Α) Κέλυφος και αυλοί αντιρροής. Β) Κέλυφος και αυλοί διασταυρούμενης ροής. Γ) Εναλλάκτης διαφραγμάτων. Δ) Περιοδικός τύπος εναλλάκτη.

#### Ειδικότερα:

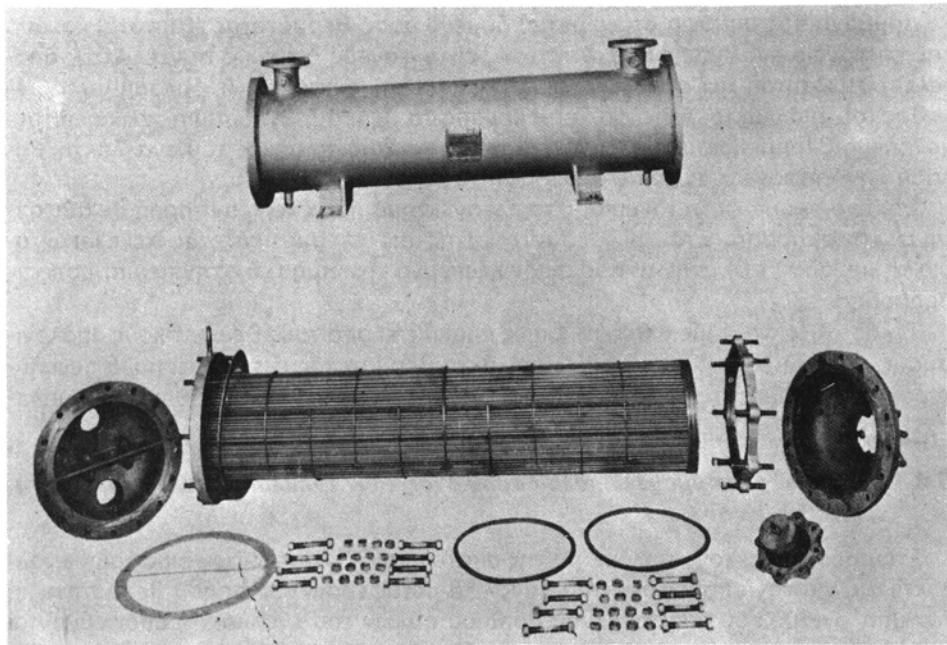
Ο «Α» είναι ο απλός τύπος εναλλάκτη πολλών αυλών και διαδρομών.

Ο «Β» είναι ο τύπος εναλλάκτη διασταυρουμένων ροών των δύο ρευστών.

Ο «Γ» παρουσιάζει τα βασικά χαρακτηριστικά εναλλάκτη επιπέδων και κυματοειδών διαφραγμάτων. Ο τύπος αυτός έχει επικρατήσει στις εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων και κυρίως στους αναγεννητήρες. Οι χώροι που σημειώνονται με δύο τελείες καταλαμβάνονται από το ένα ρευστό και οι υπόλοιποι από το άλλο.

Ο «Δ» είναι εναλλάκτης «περιοδικού τύπου» όπως λέγεται. Αποτελείται από ένα κυλινδρικό τύμπανο, το οποίο κινείται περιστρεφόμενο μέσω βοηθητικού άξονα από την ίδια τη μηχανή. Ο «πυρήνας» των επιφανειών εναλλαγής θερμότητας, κατά την περιστροφή του απορροφά ή μεταδίδει θερμότητα, αναλόγως της επαφής του με το θερμό ή το ψυχρό ρευστό. Σε σχέση με τους άλλους εναλλάκτες παρουσιάζει το πλεονέκτημα της μικρής πτώσεως πιέσεως, ενώ έχει το μειονέκτημα ότι απαιτεί συνεχή περιστροφή (απώλεια ισχύος) και κακή στεγανότητα.

Στο σχήμα 5.3δ φαίνεται ένας εναλλάκτης κλασικού τύπου, όπως εμφανίζεται εξωτερικά και όπως είναι μετά την εξάρμοση των κυριοτέρων τμημάτων του.



**Σχ. 5.3δ.**  
Εναλλάκτης θερμότητας σε εξάρμοση.

#### 5.4 Θερμοδυναμική συμπεριφορά εναλλακτών και αναγεννητήρων θερμότητας.

Όπως σε όλους τους μηχανισμούς υπεισέρχεται η έννοια του βαθμού αποδόσεως, έτσι και στους εναλλάκτες και τους αναγεννητήρες είναι πρακτικά αδύνατο να επιτευχθεί πλήρης ανάκτηση θερμότητας.

**Συντελεστής αποτελεσματικότητας «α»** ενός εναλλάκτη ή αναγεννητήρα θερμότητας λέγεται **το ποσοστό** της αλλαγής θερμοκρασιών που συμβαίνει στον εναλλάκτη σε σχέση με τη θεωρητικά δυνατή αλλαγή θερμοκρασιών.

Ο συντελεστής αποτελεσματικότητας δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha = \frac{C_H (T_{hi} - T_{ho})}{C_{min} (T_{hi} - T_{co})} = \frac{C_c (T_{co} - T_{ci})}{C_{min} (T_{hi} - T_{ci})} \quad (5.2)$$

όπου:  $C_H$  = γινόμενο ( $W_1 \times C_1$ ) του θερμότερου ρευστού ( $W_1$  = ρευστό στη μονάδα του χρόνου και  $C_1$  = ειδική θερμότητα),

$C_c$  = το γινόμενο ( $W_2 \times C_2$ ) του ψυχρότερου ρευστού,

$C_{min}$  = το σχετικά μικρότερο μεταξύ των  $C_H$  και  $C_c$ ,

$C_{max}$  = το σχετικά μεγαλύτερο μεταξύ των  $C_H$  και  $C_c$ ,

$T_{hi}$  = θερμοκρασία εισόδου θερμού ρευστού,

$T_{ho}$  = θερμοκρασία εξόδου θερμού ρευστού,

$T_{ci}$  = θερμοκρασία εισόδου ψυχρού ρευστού και

$T_{co}$  = θερμοκρασία εξόδου ψυχρού ρευστού.

Λαμβάνοντας υπ' όψη ότι το μεταδιδόμενο ποσό θερμότητας εξαρτάται και από την επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας A, είναι φανερό ότι και ο συντελεστής αποτελεσματικότητας «α» συνδέεται άμεσα και με την επιφάνεια A, δηλαδή με το μέγεθος του εναλλάκτη. Αυτό φαίνεται και από το σχήμα 5.2γ, όπου η τελικά επιτυγχανόμενη θερμοκρασιακή αλλαγή εξαρτάται και από το μήκος του εναλλάκτη, δηλαδή την επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας.

Στο ίδιο σχήμα φαίνεται επίσης το πλεονέκτημα που έχει η αντιρροή σε σύγκριση με την ομορροή. Έτσι, ενώ ο συντελεστής αποτελεσματικότητας «α» έχει ως όριο τη μονάδα (1,0) στην αντιρροή, δεν ξεπερνά την τιμή 0,5 στην περίπτωση της ομορροής.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι, όπως προκύπτει από τους θεωρητικούς υπολογισμούς, το πρώτο μισό τμήμα του εναλλάκτη θερμότητας μεταφέρει πολύ μεγαλύτερο ποσό θερμότητας από το δεύτερο μισό (το υπόλοιπο), συνήθως υπερδιπλάσιο.

#### **5.4.1 Πρακτικές εφαρμογές υπολογισμού στοιχείων εναλλακτών και αναγεννητήρων θερμότητας.**

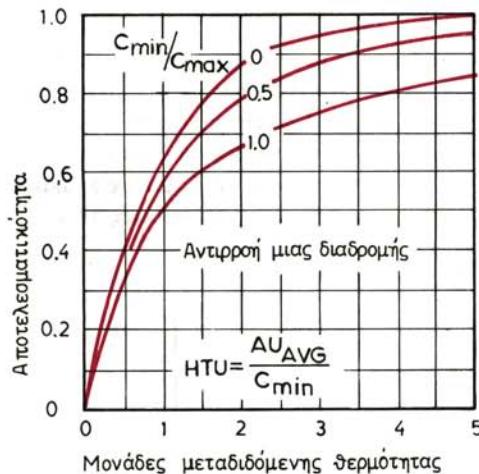
Στην πράξη, για τον υπολογισμό της αποτελεσματικότητας των διαφόρων εναλλακτών ή για τον υπολογισμό του συνολικά μεταφερόμενου ποσού θερμότητας ή τον υπολογισμό του απαιτούμενου αριθμού αυλών του εναλλάκτη, αποφεύγονται συνήθως οι εκτεταμένοι λεπτομερείς υπολογισμοί και αντί αυτών χρησιμοποιούμε γραφικούς υπολογισμούς, όπως εξηγούνται στα επόμενα.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η σχέση μεταξύ επιφάνειας (A) και συντελεστή αποτελεσματικότητας. «α», για κάθε εναλλάκτη θερμότητας, μπορεί να εκφρασθεί με μίαν απλή σχέση, με τη βοήθεια του αδιάστατου μοναδιαίου συντελεστή μεταδόσεως θερμότητας (ΜΣΜΘ). Ο συντελεστής αυτός φανερώνει τις μονάδες μεταφερόμενης θερμότητας ανά μονάδα ροής και ισχύει η σχέση:

$$(ΜΣΜΘ) = \frac{AU}{C_{min}}$$

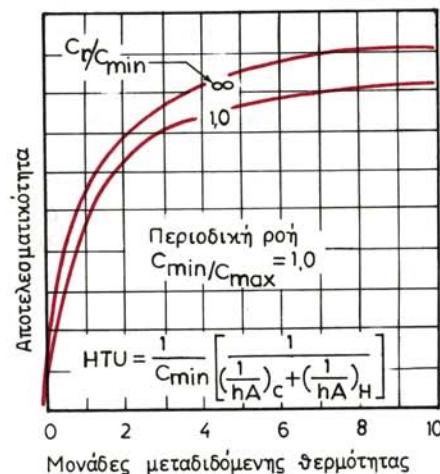
όπου όλοι οι όροι είναι όπως ορίσθηκαν προηγουμένως. Όλα αυτά φαίνονται στο σχήμα 5.4α για την περίπτωση εναλλάκτη θερμότητας αντιρροής.

Έτσι, όταν είναι γνωστή η αποτελεσματικότητα «α» και ο τύπος της ροής, από το σχήμα 5.4α υπολογίζομε το μοναδιαίο συντελεστή μεταδόσεως θερμότητας και από αυτόν και τη συνολικά μεταφερόμενη θερμότητα, επειδή τόσο η ροή όσο και τα άλλα στοιχεία είναι γνωστά ήδη από τη σχέση (5.2). Σημειώνεται ότι για την περίπτωση των αναγεννητήρων θερμότητας ισχύει, για την παράμετρο του σχήματος,  $C_{min}/C_{max} = 1,0$ . Στο σχήμα 5.4β φαίνεται η ανάλογη γραφική παράσταση για την περίπτωση του εναλλάκτη θερμότητας «περιοδικού» τύπου. Στην περίπτωση αυτή, ο (ΜΣΜΘ) ορίζεται διαφορετικά από ότι προηγουμένως, γιατί, όπως επειγήθηκε, δεν υφίσταται μόνιμος επιφάνεια ροής της θερμότητας στους τύπους αυτών των εναλλακτών. Επίσης, χρησιμοποιείται η παράμετρος  $C_r$  που ισούται με το γινόμενο της ταχύτητας περιστροφής επί την περιστρεφόμενη μάζα που εκτίθεται στά δύο ρευστά επί την ειδική θερμότητα της περιστρεφόμενης μάζας. Επειδή, όπως φαίνεται, η αποτελεσματικότητα «α» και ο (ΜΣΜΘ) αυξάνει για μεγαλύτερες τιμές του  $C_r$ , ο κατασκευαστής του εναλλάκτη μπορεί να αυξήσει για το σκοπό



Σχ. 5.4α.

Σχέση αποτελεσματικότητας και μεταδόσεως θερμότητας για εναλλάκτη αντιρροής.



Σχ. 5.4β.

Σχέση αποτελεσματικότητας και μεταδόσεως θερμότητας για εναλλάκτη «περιοδικού» τύπου.

αυτό τη μάζα του περιστρεφόμενου στοιχείου και την ταχύτητα περιστροφής του, οπότε βέβαια θα έχει να υπερνικήσει μεγαλύτερες αντιστάσεις ροής και συνεπώς και ένας συμβιβασμός των αντικρουομένων απαιτήσεων είναι αναγκαίος.

Ας εξετάσουμε τώρα, κατά το δυνατό λεπτομερώς, τη διαδικασία που ακολουθείται για τον υπολογισμό και τη σχεδίαση ενός εναλλάκτη. Υπενθυμίζομε τη σχέση (5.1), δηλαδή:

$$Q = UA_0 \text{ (ΛΜΘΔ)}$$

Για να υπολογισθεί επομένως το μεταδιδόμενο ποσό θερμότητας, πρέπει να υπολογισθούν και οι τρεις παράγοντες του δεξιού μέλους από τους οποίους εξαρτάται και κυρίως οι δύο πρώτοι, δηλαδή  $U$  και  $A_0$ . Ο υπολογισμός της λογαριθμικής μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς (ΛΜΘΔ) συνήθως δεν είναι δύσκολος (βλ. ορισμό στην παράγραφο 5.2).

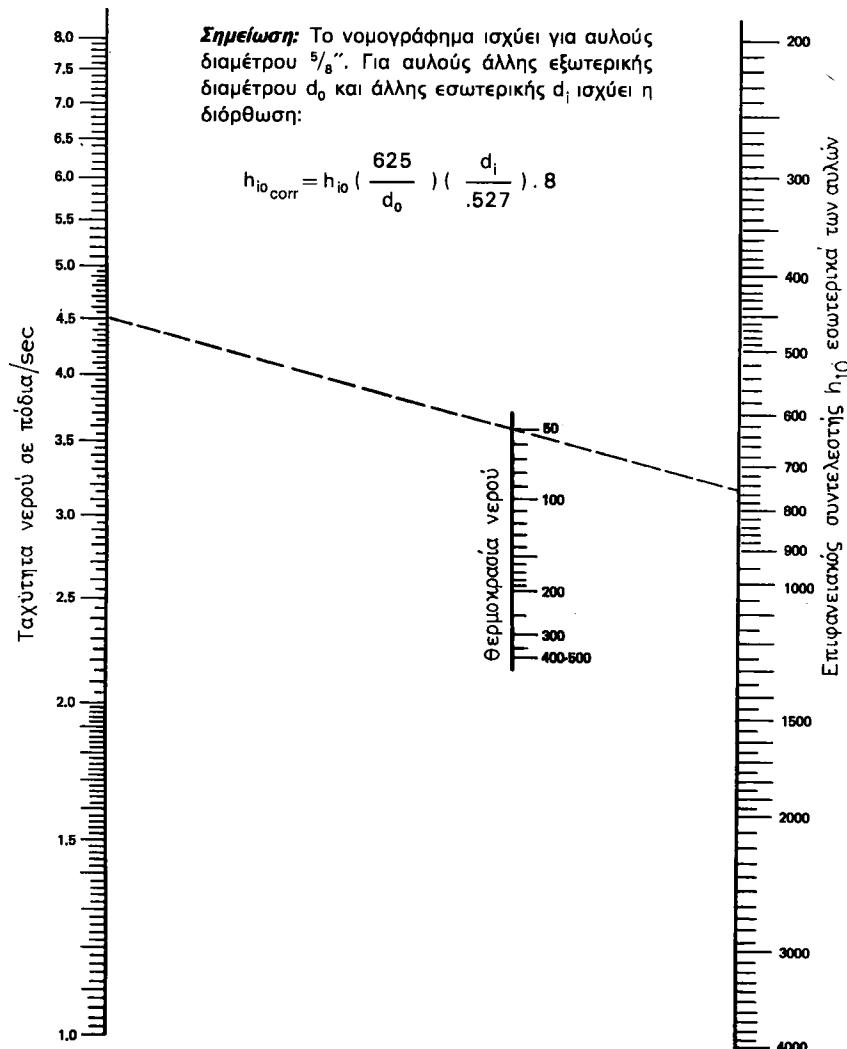
### α) Υπολογισμός ολικού συντελεστή μεταδόσεως θερμότητας (ΟΣΜΘ) $U$ .

Αυτός ισούται με:

$$U = \frac{1}{(1/h_0) + r_w + (1/h_{i0})}$$

όπου:  $h_0$ ,  $r_w$  και  $h_{i0}$  όπως ορίσθηκαν προηγουμένως. Άγνωστοι προς υπολογισμό, είναι οι επιφανειακοί συντελεστές μεταδόσεως  $h_0$  και  $h_{i0}$  για την εξωτερική και εσωτερική επιφάνεια διαχωρισμού των ρευστών αντίστοιχα. Οι συντελεστές αυτοί μπορούν να υπολογισθούν κατά δύο τρόπους, τον αναλυτικό και το γραφικό. Ο αναλυτικός τρόπος έγκειται στην επίλυση συστήματος εξισώσεων από τη λύση του οποίου ευρίσκονται και οι άγνωστοι  $h_0$  και  $h_{i0}$ . Ο γραφικός τρόπος (ή πιο σωστά

γραφοαναλυτικός) επιτρέπει τον απ' ευθείας προσδιορισμό των επιφανειακών συντελεστών  $h_0$  και  $h_{io}$  από νομογραφήματα όπως των σχημάτων 5.4γ και 5.4δ. Τα νομογραφήματα αυτά αφορούν βασικά ένα συγκεκριμένο τύπο εναλλάκτη (διάμετρος εσωτερική - εξωτερική διάταξη αυλών), ενώ για διαφορετικά στοιχεία γίνεται διόρθωση των ευρισκομένων αποτελεσμάτων. Έτσι, σε συνάρτηση δεδομένων του προβλήματος ή εύκολα προσδιορίζομένων παραμέτρων, όπως θερμοκρασία νερού, ταχύτητα, διάμετρος αυλών, ευρίσκονται απ' ευθείας οι τιμές των  $h_{io}$  και  $h_0$  για το συγκεκριμένο πρόβλημα.

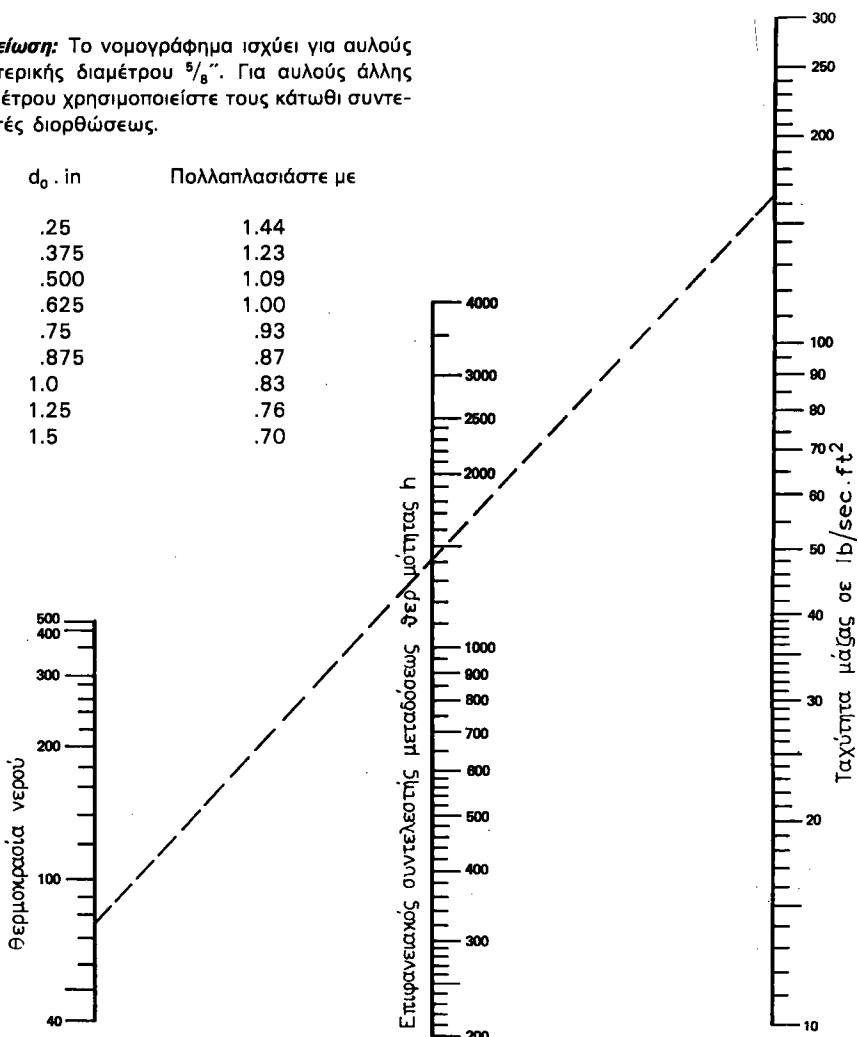


**Σχ. 5.4γ.**

Νομογράφημα υπολογισμού επιφανειακού συντελεστή μεταδόσεως θερμότητας εσωτερικώς των αυλών.

**Σημείωση:** Το νομογράφημα ισχύει για αυλούς εξωτερικής διαμέτρου  $\frac{5}{8}$ ". Για αυλούς άλλης διαμέτρου χρησιμοποιείστε τους κάτωθι συντελεστές διορθώσεως.

| $d_0$ , in | Πολλαπλασιάστε με |
|------------|-------------------|
| .25        | 1.44              |
| .375       | 1.23              |
| .500       | 1.09              |
| .625       | 1.00              |
| .75        | .93               |
| .875       | .87               |
| 1.0        | .83               |
| 1.25       | .76               |
| 1.5        | .70               |



**Σχ. 5.46.**

Νομογράφημα υπολογισμού επιφανειακού συντελεστή μεταδόσεως θερμότητας εξωτερικώς των αυλών.

Παράλληλα, υπολογίζεται η αντίσταση του υλικού των αυλών  $r_w$  από τη σχέση:

$$r_w = \frac{d_0 \log_e \left( \frac{d_0}{d_i} \right)}{2k}$$

όπου:  $d_0$  = εξωτερική διάμετρος αυλού,

$d_i$  = εσωτερική διάμετρος αυλού καί

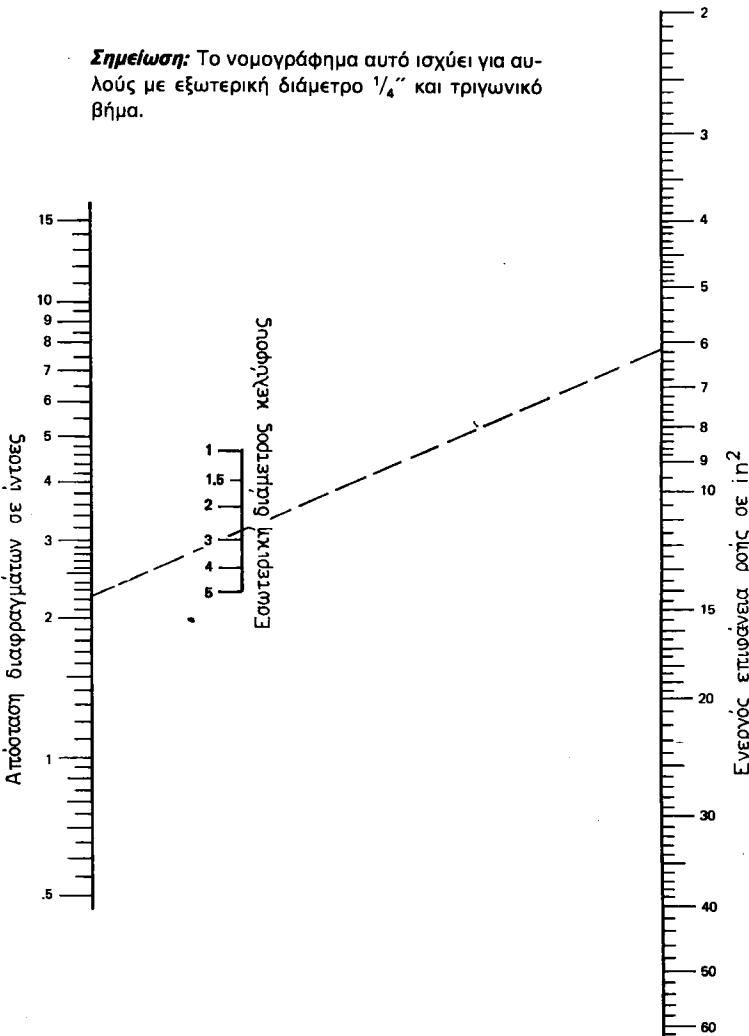
$k$  = συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού κατασκευής.

Επειδή το υλικό κατασκευής αυλών του συνόλου σχεδόν των εναλλακτών είναι το εμπορικά ονομαζόμενο κράμα μετάλλων Ναυαρχείου (Admiralty metal), για το

οποίο  $k = 70 \text{ BTU}/\text{hr.ft.}^{\circ}\text{F}$ , δλες οι συνιστώσες του ολικού συντελεστή μεταδόσεως θερμότητας (ΟΣΜΘ)  $U$  είναι γνωστές και συνεπώς υπολογίζεται η τιμή του.

### β) Υπολογισμός της επιφάνειας μεταδόσεως θερμότητας $A_0$ .

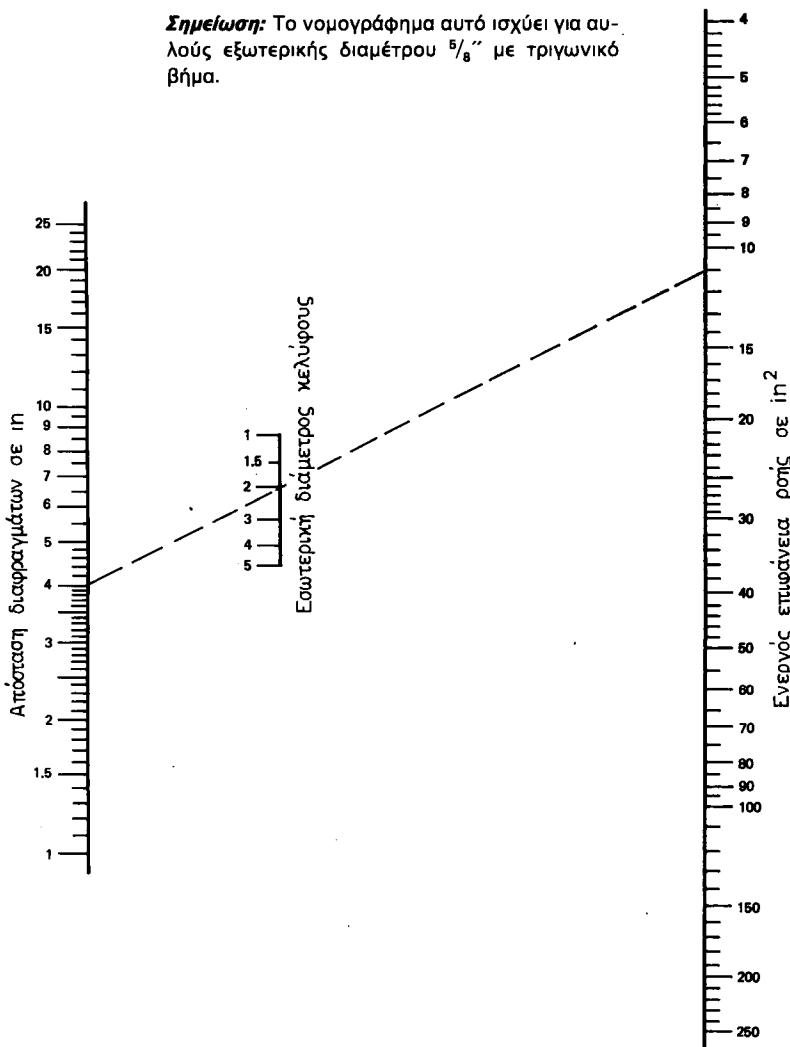
Για τον ακριβή υπολογισμό της πραγματικής ενέργού επιφάνειας μεταδόσεως θερμότητας  $A_0$ , απαιτείται υπολογισμός από τα γεωμετρικά και ιδιαίτερα κατασκευαστικά στοιχεία κάθε εναλλάκτη. Για απλούστευση δύμας μπορούν να χρησιμοποιηθούν νομογραφήματα τα οποία δίνουν την ενέργο όπιση, αν ληφθούν υπ' όψη οι διαμέτροι των αυλών, η μεταξύ τους απόσταση, η απόσταση των διαφραγμάτων κλπ. Τέτοια νομογραφήματα είναι αυτά των σχημάτων 5.4ε και



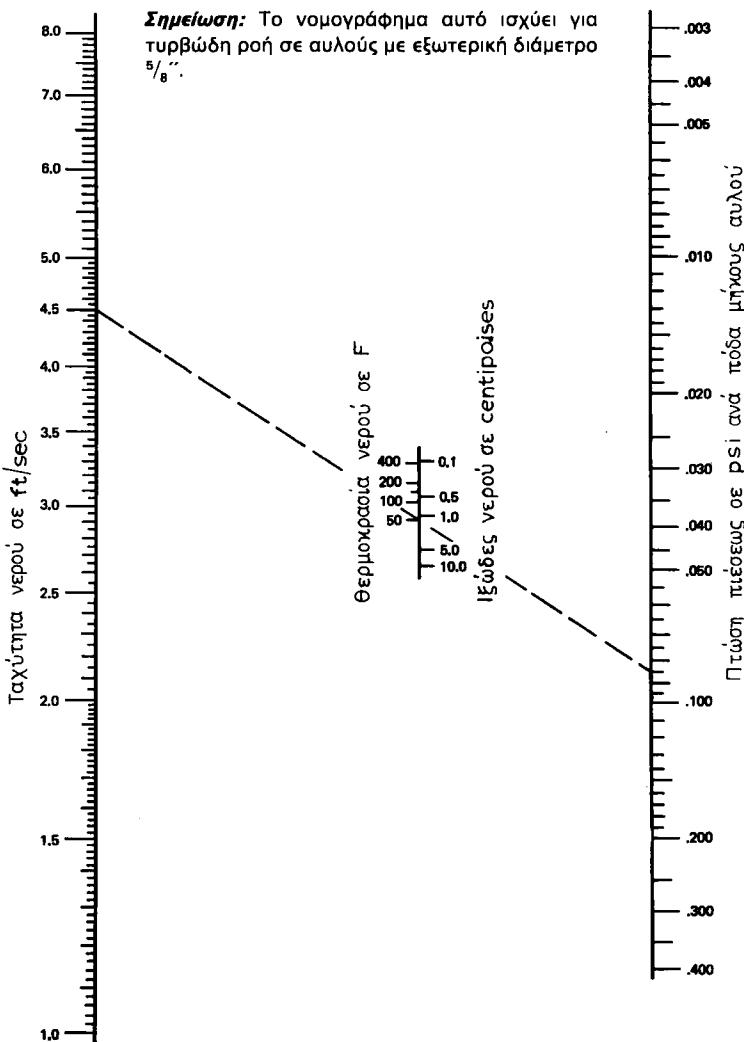
**Σχ. 5.4ε.**  
Ενέργος επιφάνεια ροής εναλλάκτη θερμότητας.

5.4στ., τα οποία καλύπτουν όλη την περιοχή των συνήθως χρησιμοποιουμένων διαμέτρων και βήματος αυλών σε ναυτικούς εναλλάκτες θερμότητας. Αν τα στοιχεία των αυλών ενός εναλλάκτη δεν περιέχονται στην περιοχή αυτή, τότε τα αποτελέσματα έχουν συγκριτική μόνο αξία. Τέλος, από το νομογράφημα του σχήματος 5.4ζ υπολογίζεται η πτώση πιέσεως στους εναλλάκτες, σε συνάρτηση με την ταχύτητα και το ίξωδες του ρευστού.

**Σημείωση:** Το νομογράφημα αυτό ισχύει για αυλούς εξωτερικής διαμέτρου  $\frac{5}{8}$ " με τριγωνικό βήμα.



**Σχ. 5.4στ.**  
Ενεργός επιφάνεια ροής εναλλάκτη θερμότητας.

**Σχ. 5.4ζ.**

Υπολογισμός πτώσεως πιέσεως σε εναλλάκτες θερμότητας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

### Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΣΕ ΝΑΥΤΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΠΡΟΩΣΕΩΣ

#### 6.1 Γενικά.

Στα προηγούμενα εξετάσθηκε ο αεριοστρόβιλος και τα επί μέρους τμήματα από τα οποία αποτελείται κατά τρόπο ώστε τα αντίστοιχα κεφάλαια να αφορούν κατά βάση το σύνολο των αεριοστροβίλων, ανεξάρτητα δηλαδή από τη χρήση ή την προέλευσή τους, ως μηχανών π.χ. αεροπλάνων, σιδηροδρόμων, ηλεκτροπαραγωγών εργοστασίων, μεγάλων αντλητικών συγκροτημάτων κλπ. Σημειώνονταν βέβαια οι διαφοροποιήσεις των διαφόρων ειδών αεριοστροβίλων και κυρίως αυτών της ναυτικής χρήσεως, δεν είχε όμως εξετασθεί η ιδιαίτερη συμπεριφορά του αεριοστροβίλου όταν χρησιμοποιείται ως μηχανή προώσεως σε ναυτικές εγκαταστάσεις σε σύγκριση τόσο με τους αεριοστροβίλους διαφορετικής χρήσεως, π.χ. των αεροπλάνων, όσο και ως προς τα λοιπά είδη μηχανών προώσεως, κυρίως μηχανές ντίζελ και ατμοστροβίλους. Και ενώ οι διαφορές του αεριοστροβίλου ως προς τις μηχανές αυτές είναι αποτέλεσμα διαφορετικών χαρακτηριστικών λειτουργίας των μηχανών, οι διαφορές του ναυτικού αεριοστροβίλου από τους υπόλοιπους είναι αποτέλεσμα των διαφορετικών χαρακτηριστικών της έλικας με την οποία αυτός συνεργάζεται για να παράγει αφέλιμο έργο, δηλαδή την κίνηση των πλοίων.

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετασθούν οι χαρακτηριστικές λειτουργίας των αεριοστροβίλων, των ελίκων και ιδιαίτερα του συνδυασμού έλικας - αεριοστροβίλου. Λέγοντας «χαρακτηριστικές λειτουργίας», εννοούμε τις θεμελιώδεις σχέσεις μεταξύ μιας σημαντικής παραμέτρου λειτουργίας (π.χ. ιπποδύναμη) και των ανεξαρτήτων μεταβλητών (π.χ. στροφές ή πίεση), που καθορίζουν την τιμή της. Η θεμελιώδης χαρακτηριστική λειτουργίας μιας μηχανής προώσεως είναι αυτή που εκφράζει τη σχέση στρεπτικής ροπής και στροφών λειτουργίας\* που παράγονται στον άξονά της, ενώ και οι υπόλοιπες χαρακτηριστικές, όπως η κατανάλωση καυσίμου, η προσαγόμενη ποσότητα αέρα και η απαγόμενη ποσότητα καυσαερίων, θερμοκρασίες και πιέσεις λειτουργίας και η μεταβολή δλων αυτών ανάλογα με τις στροφές και το φορτίο, ενδιαφέρουν τους μηχανικούς των πλοίων.

Άλλο σημείο ενδιαφέροντος είναι η επίδραση των συνθηκών περιβάλλοντος στις χαρακτηριστικές λειτουργίας της μηχανής, κυρίως λόγω των επιπτώσεων από τη μεταβολή της πυκνότητας του ατμοσφαιρικού αέρα.

Οι κυριότερες χαρακτηριστικές λειτουργίας μιας μηχανής καθώς και οι αναγ-

\* Υπενθυμίζεται ότι η ροπή επί τον αντίστοιχο αριθμό στροφών μας δίνει την ισχύ. Συνεπώς από τη σχέση ροπή - στροφές είναι γνωστή και η σχέση ισχύς - στροφές.

καίοι διορθωτικοί συντελεστές παρέχονται από τους κατασκευαστές, στα παρακάτω δε γίνεται αξιολόγησή τους.

## 6.2 Οι κυριότερες χαρακτηριστικές λειτουργίας των αεριοστροβίλων.

Μεταξύ των κυριοτέρων χαρακτηριστικών λειτουργίας που θα εξετασθούν περιλαμβάνονται:

- Στρεπτικής ροπής - αριθμού στροφών.
- Ισχύος - αριθμού στροφών.
- Ισχύος - Θερμοκρασίας - καταναλώσεως.
- Καμπύλες διορθώσεως.

### 6.2.1 Χαρακτηριστικές στρεπτικής ροπής - ισχύος - αριθμού στροφών.

Από τη στοιχειώδη ανάλυση στροβιλομηχανών που έγινε στο τρίτο κεφάλαιο, προέκυψε ότι, για το στρόβιλο δράσεως μιας βαθμίδας, η στρεπτική ροπή είναι γραμμική συνάρτηση του αριθμού στροφών και ότι η αριθμητική τιμή της είναι διπλάσια σε μηδενικό αριθμό στροφών απ' ό, τι στις στροφές που αντιστοιχούν στην καλύτερη «αξιοποίηση», δηλαδή στις στροφές ονομαστικής λειτουργίας. Ισχύει λοιπόν η σχέση:

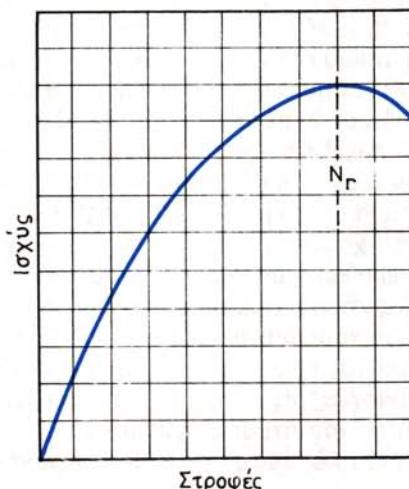
$$\frac{Q}{Q_r} = 2 - \frac{N}{N_r}$$

όπου:  $Q$  = ροπή,

$N$  = αριθμός στροφών και

$r$  = δείκτης που αφορά συνθήκες ονομαστικής λειτουργίας.

Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της προηγούμενης σχέσεως επί  $N/N_r$ ,



Σχ. 6.2α.

Καμπύλη ισχύος - στροφών αεριοστροβίλου.

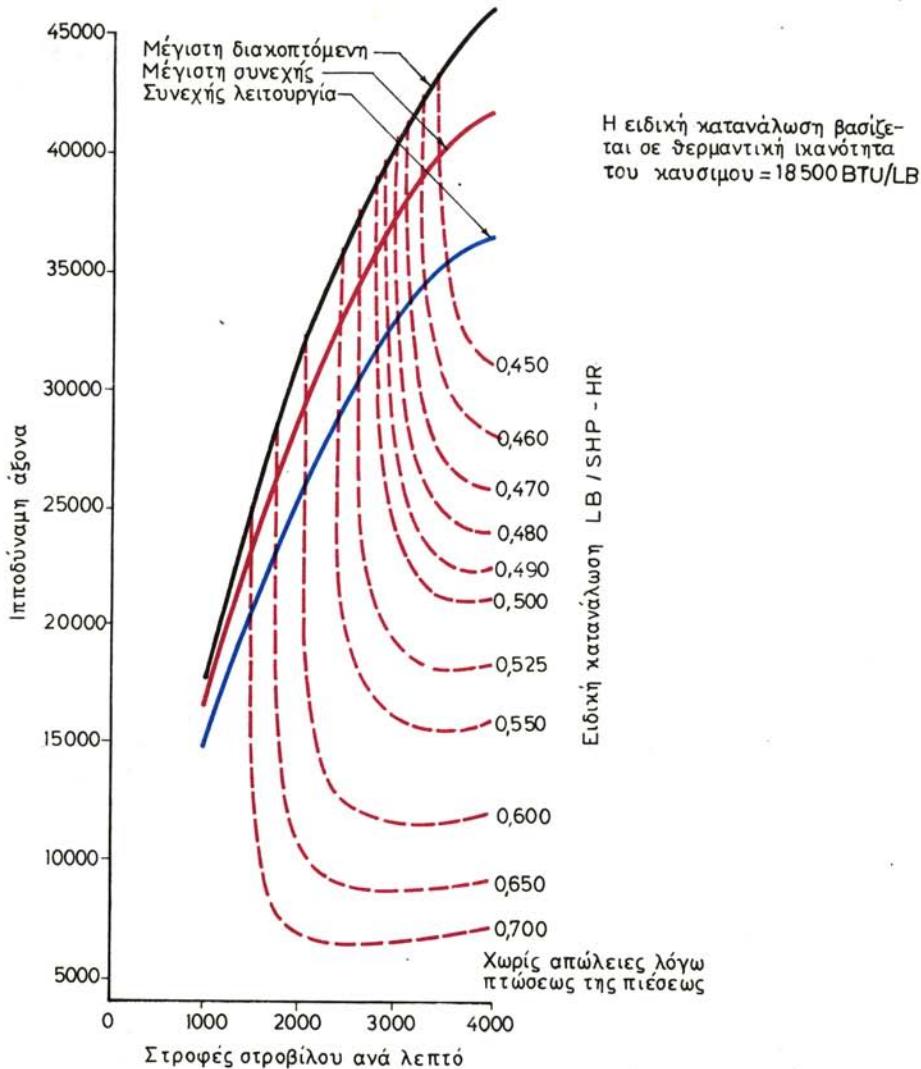
καταλήγομε στη σχέση ισχύος - αριθμού στροφών, δηλαδή:

$$\frac{P}{P_r} = \frac{N}{N_r} [2 - \frac{N}{N_r}]$$

όπου  $P$  = ισχύς.

Η γραφική παράσταση της σχέσεως φαίνεται στο σχήμα 6.2α σαν μια παραβολή.

Στο σχήμα 6.2β παρουσιάζονται οι καμπύλες ισχύος - στροφών ενός στροβίλου για τρία διαφορετικά επίπεδα λειτουργίας. Και οι καμπύλες αυτές έχουν παραβολική μορφή, αν και οι κορυφές τους βρίσκονται δεξιότερα μέσα στο σχήμα. Από τις καμπύλες ισχύος του σχήματος 6.2β μπορούν εύκολα να κατασκευασθούν (ή να



**Σχ. 6.2β.**  
Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας αεριοστροβίλου.

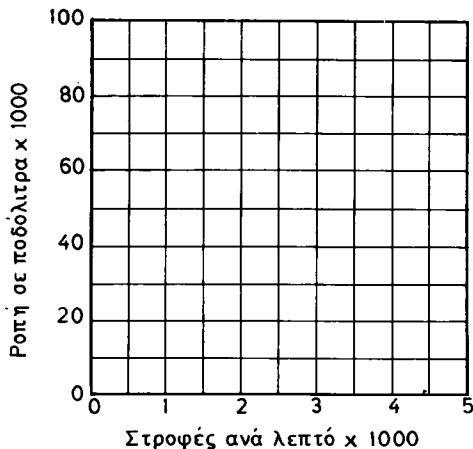
υπολογισθούν) οι αντίστοιχες καμπύλες ροπής από τη σχέση:

$$Q = 5252 \frac{P}{N}$$

όπου οι μονάδες δίνονται σε αγγλοσαξωνικό σύστημα.

Αυτό έγινε στο σχήμα 6.2γ, το οποίο παρουσιάζει τις καμπύλες ροπής σε συνάρτηση με τον αριθμό στροφών. Όπως παρατηρούμε από το σχήμα 6.2γ έχομε:

- Οι καμπύλες είναι ευθείες γραμμές με έντονη αρνητική κλίση.
- Για λιγότερο από 1000 RPM οι καμπύλες παρουσιάζονται διακεκομμένες, γιατί, πρακτικά, ο στρόβιλος δεν μπορεί να λειτουργήσει με στροφές λιγότερες από τον αριθμό αυτό.
- Θεωρώντας ότι οι ονομαστικές στροφές λειτουργίας του στροβίλου είναι περίπου 4200, παρατηρούμε ότι η στρεπτική ροπή που αντιστοιχεί σε αυτές είναι το μισό αυτής που αντιστοιχεί σε μηδενικές στροφές, όπως προβλέπεται θεωρητικά.



**Σχ. 6.2γ.**  
Καμπύλη ροπής στροφών.

Επανερχόμενοι στο σχήμα 6.2β θα ασχοληθούμε με τα διαφορετικά επίπεδα λειτουργίας του αεριοστροβίλου ή με τις επιδόσεις των μηχανών αυτών.

Ως «επίδοση» (rating) της μηχανής συνήθως εννοούμε την παραγόμενη από αυτή ισχύ σε μια δεδομένη εφαρμογή καθώς και τον αντίστοιχο αριθμό στροφών όπου παράγεται η ισχύς αυτής.

Έτσι, για τον αεριοστρόβιλο του σχήματος 6.2β έχομε ότι μια επίδοσή του αντιστοιχεί σε ιπποδύναμη 35.500 HP στις 3600 RPM. Όλες οι παράμετροι λειτουργίας που αντιστοιχούν σε κάποια επίδοση, όπως ιπποδύναμη, στροφές, ροπή, θερμοκρασίες, πίεσεις κλπ. λέγονται **ονομαστικές**.

Τι σημαίνει τώρα η ύπαρξη τριών διαφορετικών επιπέδων λειτουργίας ή τριών διαφορετικών επιδόσεων με τις αντίστοιχες ονομαστικές τιμές τους.

Η ανώτερη από αυτές (μέγιστη διακοπόμενη στο σχήμα 6.2β) είναι η καμπύλη της μέγιστης δυνατότητας της μηχανής, ενώ οι άλλες δύο προέρχονται από μια

σχέση συμβιβασμού μεταξύ επιδόσεως της μηχανής και απαιτήσεως προς συντήρηση της, γιατί είναι φανερό ότι όσο χαμηλότερη είναι η επίδοση τόσο χαμηλότερες οι θερμοκρασίες και η αντίστοιχη καταπόνηση της μηχανής και συνεπώς χαμηλότερη και η απαίτηση συντηρήσεως\*.

Η καμπύλη μέγιστης συνεχούς ισχύος (*maximum continuous*) και η επίδοση στην οποία αντιστοιχεί, δηλαδή 40.400 HP στις 3600 RPM συνιστάται από τον κατασκευαστή για συνεχή χρήση με «παραδεκτό» μεσολαβούντα χρόνο μεταξύ διαδοχικών επισκευών. Ο «παραδεκτός» χρόνος, αν και ποσοτικά δύσκολα μπορεί να καθορισθεί, συνήθως ικανοποιεί τις απαιτήσεις τόσο του κατασκευαστή όσο και του χειριστή της μηχανής.

Η καμπύλη φυσιολογικής λειτουργίας (*normal*) αντιπροσωπεύει το συντηρητικό επίπεδο λειτουργίας που συνιστά ο κατασκευαστής για παρατεταμένη χρονική διάρκεια μεταξύ διαδοχικών επισκευών. Σημειώνεται επίσης ότι οι καμπύλες και τα επίπεδα λειτουργίας καθορίζονται για δεδομένες ατμοσφαιρικές συνθήκες και μηδενικές απώλειες πιέσεως στους οχετούς προσαγωγής αέρα και απαγωγής καυσαερίων. Στην πράξη βέβαια, τα ανωτέρω δεν είναι δυνατό να τηρηθούν εύκολα και συνεπώς πρέπει να αναμένεται μια υποβάθμιση των επιπέδων ενέργειας.

### **6.2.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες καταναλώσεων.**

Οι καμπύλες ειδικής καταναλώσεως παρουσιάζονται συνήθως σε μορφή όπως οι διακεκομένες καμπύλες του σχήματος 6.2β. Από τη θεώρησή τους προκύπτει ότι:

- Η ειδική κατανάλωση αυξάνει με την ελάττωση του φορτίου ή και του αριθμού στροφών (δεξιό μέρος των καμπυλών).
- Η ειδική κατανάλωση παραμένει σταθερή για δεδομένο αριθμό στροφών, και ανεξάρτητα από την ισχύ, όπως φαίνεται από το αριστερό τμήμα των καμπυλών όπου το κατακόρυφο τμήμα τους.

Για την αύξηση της ειδικής καταναλώσεως, όταν ελαττώνεται η ισχύς ή και ο αριθμός στροφών λειτουργίας, δύο είναι οι κύριοι παράγοντες: πρώτον η μεταβολή του λόγου ταχύτητας U/C<sub>1</sub>, των στροβιλομηχανών από τη βέλτιστη τιμή του U/C<sub>1</sub>, που έχει προβλεφθεί να αντιστοιχεί στη συνήθη ταχύτητα λειτουργίας και δεύτερο η ελάττωση του θερμικού βαθμού αποδόσεως του κύκλου λειτουργίας, λόγω χαμηλότερης θερμοκρασίας T<sub>3</sub> εισόδου καυσαερίων στο στρόβιλο\*\*.

Έτσι, αν η παραγόμενη ισχύς από το στρόβιλο ισχύος ελαπτωθεί, ενώ οι στροφές του παραμένουν σταθερές, π.χ. με τη μεταβολή της κλίσεως των πτερυγίων μιας έλικας μεταβλητού βήματος, η αλλαγή αυτή παριστάνεται στο σχήμα 6.2β σαν μια κατακόρυφος μεταβολή καταστάσεως. Για τον αεριοστρόβιλο, η ελάττωση της ισχύος συνεπάγεται μείωση του παρεχόμενου καυσίμου. Γι' αυτό, ο αεριογόνος στρόβιλος θα ελαπτώσει την ταχύτητά του, το λόγο καυσίμου - αέρα και τη θερμοκρασία των καυσαερίων. Η ελάττωση της θερμοκρασίας των καυσαερίων ελαττώνει την ταχύτητά τους και συνεπώς το λόγο ταχυτήτων U/C<sub>1</sub> του στροβίλου

\* Από πολλούς κατασκευαστές μηχανών θεωρείται ότι η σχέση μεταξύ επιδόσεως και απαιτήσεως προς συντήρηση, δηλαδή του χρόνου που μεσολαβεί μεταξύ επισκευών, είναι εκθετική.

\*\* Υπενθυμίζεται η σοβαρή επίπτωση στο θερμικό βαθμό αποδόσεως του κύκλου από τη μεταβολή της T<sub>3</sub>.

ισχύος. Εξαιτίας αυτής της αλληλουχίας παρουσιάζεται στις καμπύλες καταναλώσεως μια τιμή ελάχιστου, η οποία μετακινείται προς τα αριστερά καθώς η ισχύς ελαττώνεται.

Στο αριστερό τμήμα του ίδιου σχήματος, οι καμπύλες καταναλώσεως είναι κατακόρυφες. Άλλαγή δηλαδή της ισχύος με σταθερό αριθμό στροφών δεν συνεπάγεται αύξηση της καταναλώσεως. Το εκ πρώτης όψεως παράδοξο αυτό φαινόμενο, το να παράγομε δηλαδή περισσότερο έργο με την ίδια κατανάλωση καυσίμου, οφείλεται στο γεγονός ότι σε μερικό φορτίο της μηχανής (και όχι στην πλήρη ισχύ της) τόσο ο βαθμός αποδόσεως του θερμικού κύκλου δύο και ο βαθμός αξιοποίησεως (utilization) της στροβιλομηχανής ελαττώνονται και συνεπώς για δεδομένη ποσότητα καυσίμου παράγεται μικρότερη ισχύς.

Στην πράξη, για την αντιμετώπιση της αυξήσεως της ειδικής καταναλώσεως σε χαμηλά φορτία, εφαρμόζεται η διαδίκασία της «αλλαγής προφυσίων», μέθοδος που συνίσταται σε μεταβολή της επιφάνειας ροής με τη βοήθεια των προφυσίων. Δεδομένου ότι η μέθοδος σπανιότατα απαντάται σε ναυτικές εγκαταστάσεις\* δεν θα μας απασχολήσει παραπέρα.

Ιδιαίτερα επίσης ενδιαφέρει τους χειριστές και σχεδιαστές των εγκαταστάσεων αεριοστροβίλων η μεταβολή του συνόλου των χαρακτηριστικών λειτουργίας τους σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, δηλαδή η ισχύς, η θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων, το βάρος των παραγομένων καυσαερίων κλπ.

Είναι γνωστό ότι το βάρος των παραγομένων καυσαερίων και του προσαγόμενου καυσιγόνου αέρα διαφέρουν μόνο κατά το βάρος του καιόμενου καυσίμου και ότι και οι δύο ροές, αέρα και καυσαερίων, είναι περίπου ανάλογες με την ταχύτητα του συμπιεστή.

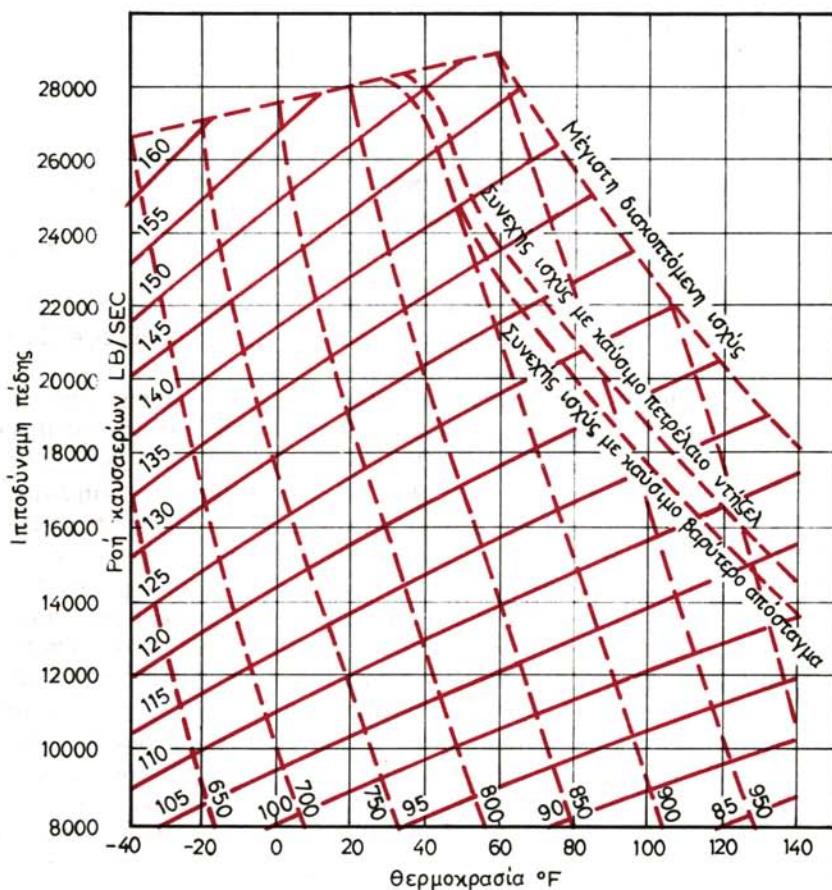
Επίσης, η θερμοκρασία εξαγωγής καυσαερίων  $T_4$  εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία  $T_3$  εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο ισχύος και από την αξιοποίηση της ενέργειας τους από το στρόβιλο. Η αξιοποίηση της ενέργειας των καυσαερίων είναι μεν συνάρτηση του φορτίου, συγχρόνως όμως επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Αναμενόμενο είναι ότι μια αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος θα παρουσιασθεί σαν αντίστοιχη αύξηση σε όλες τις θερμοκρασίες του κύκλου λειτουργίας. Όπως όμως διαπιστώνεται στην πράξη, η αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο είναι δυσανάλογα αυξημένη, πάντοτε βέβαια για την ίδια ισχύ. Η εξήγηση για τη δυσανάλογη αυτή αύξηση είναι ότι λόγω της μεγαλύτερης θερμοκρασίας περιβάλλοντος, ελαττώνεται η πυκνότητα του προσαγόμενου αέρα και, επειδή η ποσότητα του καυσίμου πάραμενει η ίδια, αυξάνει ο λόγος καυσίμου - αέρα και συνεπώς τα προϊόντα της καύσεως έχουν υψηλότερη θερμοκρασία.

Τα παραπάνω παρουσιάζονται και στο σχήμα 6.2δ, το οποίο αφορά αεριοστρόβιλο τύπου LM 2500 της General Electric. Οι παράμετροι λειτουργίας του σχήματος είναι:

- Ισχύς εξόδου.
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος.

\* Σε ναυτικές εγκαταστάσεις προώσεως, όταν το φορτίο ελαττώνεται (μικρότερη ταχύτητα του πλοίου), τότε μπορεί να ελαττώνεται και ο αριθμός των μηχανών που λειτουργούν, οπότε αυξάνει το αντίστοιχο φορτίο τους.



#### ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Πίεση ατμοσφαιρική

Τγρασία μηδέν

Χωρίς πτώση πιέσεως στους οχετούς

Ταχύτητα στροβίλου : 3600 RPM

#### Σχ. 6.26.

Σχέση ιπποδυνάμεως και θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

- Ροή καυσαερίων.
- Θερμοκρασία καυσαερίων.
- Οριακές καμπύλες ισχύος, αναλόγως του χρησιμοποιούμενου καυσίμου.

Όπως εύκολα διαπιστώνεται, με την αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος για σταθερά ισχύ εξόδου, ελαττώνεται η ροή των καυσαερίων και αυξάνει η θερμοκρασία τους κατά το διπλάσιο (περίπου) της αυξήσεως της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Έτσι, π.χ. για σταθερά ισχύ 18.000 HP και αρχική θερμοκρασία περιβάλλοντος 60°F, η ροή των καυσαερίων είναι 121 λίμπρες ανά δευτερόλεπτο και η θερμοκρασία εξαγωγής τους 880°F. Όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος αυξηθεί κατά 20°F, γίνει δηλαδή 80°F, τότε η ροή των καυσαερίων ελαττώνεται σε 117

λίμπρες ανά δευτερόλεπτο, ενώ η θερμοκρασία εξαγωγής τους γίνεται  $920^{\circ}\text{F}$ , αυξάνει δηλαδή κατά το διπλάσιο από ό,τι η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

### 6.2.3 Καμπύλες διορθώσεως.

Η ισχύς εξόδου ενός δεδομένου αεριοστροβίλου εξαρτάται βασικά από την πίεση και τη θερμοκρασία του αέρα στην είσοδο του συμπιεστή, από την πίεση εξαγωγής καυσαερίων, από τον τύπο του καυσίμου και άρα όλες οι καμπύλες επιδόσεων, όπως του σχήματος 6.2β, πρέπει να συνοδεύονται από επακριβή καθορισμό αυτών των στοιχείων.

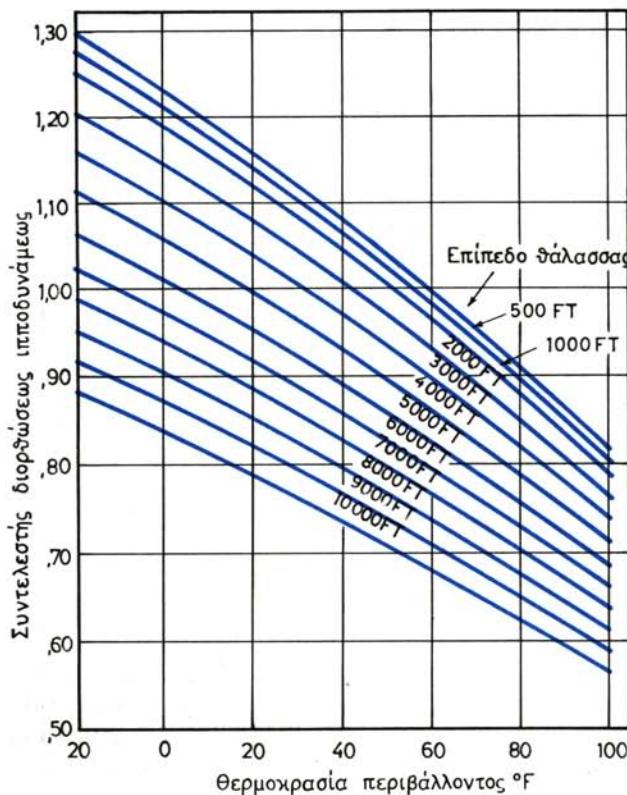
Στην πράξη βέβαια οι συνθήκες λειτουργίας των αεριοστροβίλων οπωσδήποτε διαφέρουν από τις συνθήκες για τις οποίες υπολογίσθηκαν οι καμπύλες επιδόσεων και συνεπώς χρειάζονται διόρθωση.

Το σχήμα 6.2δ αποτελεί ένα δείγμα των απαραιτήτων διορθώσεων για τη μηχανή LM 2500. Έχομε π.χ. μια συνεχή ισχύ  $24.000 \text{ HP}$  (περίπτωση καυσίμου diesel) για θερμοκρασία περιβάλλοντος  $59^{\circ}\text{F}$ . Όταν αυτή φθάσει τους  $100^{\circ}\text{F}$ , από την καμπύλη συνεχούς ισχύος έχομε ισχύ  $19.000 \text{ HP}$  και για την περίπτωση διακοπόμενης ισχύος  $23.000 \text{ HP}$ , πάντοτε βέβαια για τον ίδιο αριθμό στροφών, δηλαδή  $3600 \text{ RPM}$ . Τα παραπάνω σημαίνουν ότι εφόσον η θερμοκρασία περιβάλλοντος γίνει  $100^{\circ}\text{F}$  (περίπτωση θέρους), η μηχανή **οπωσδήποτε** δεν μπορεί να παράγει μεγαλύτερη ισχύ από  $23.000 \text{ HP}$  και αν ο χρόνος μεταξύ διαδοχικών επισκευών της θέλομε να μη ελαττωθεί πιο πολύ από το προβλεπόμενο για το επίπεδο λειτουργίας  $24.000 \text{ HP}$  στους  $59^{\circ}\text{F}$ , τότε πρέπει να ελαττωθεί η ισχύς στους  $19.000 \text{ HP}$ . Η πίεση περιβάλλοντος, ως εξαρτώμενη μόνο από το υψόμετρο του τόπου, δεν αποτελεί συνήθως παράγοντα διορθώσεως για αεριοστροβίλους ναυτικών εγκαταστάσεων, ενώ έχει πολύ μεγάλη σημασία για αεροπορικούς κινητήρες, δεδομένου ότι, για υψομετρική διαφορά  $10.000$  ποδιών, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.2ε και για την ίδια θερμοκρασία περιβάλλοντος, π.χ.  $20^{\circ}\text{F}$ , η ισχύς μεταβάλλεται κατά  $50\%$  περίπου.

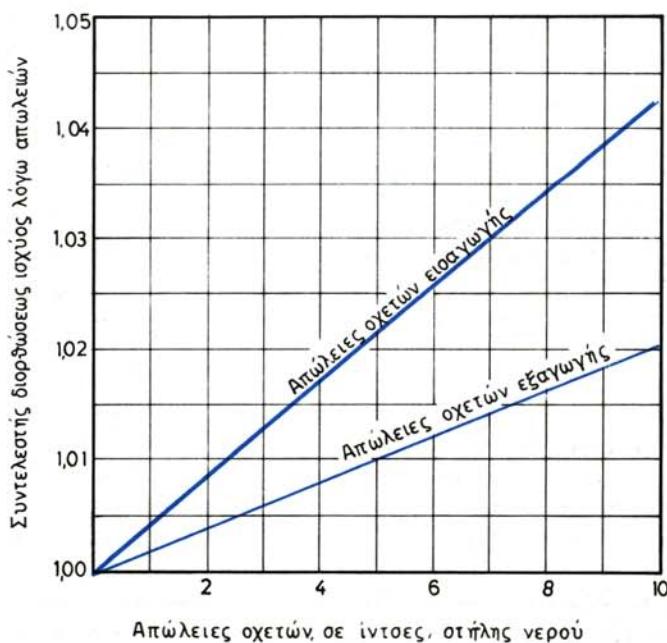
Η πίεση στους οχετούς προσαγωγής - απαγωγής αέρα και καυσαερίων επηρεάζεται σημαντικά από απώλειες (πτώση) κατά μήκος των αγωγών μέ επακόλουθο την απώλεια ισχύος. Η απώλεια ισχύος λόγω πτώσεως πιέσεως στους οχετούς εμφανίζεται υπό μορφή καμπυλών, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.2στ. Διευκρινίζεται ότι όλες οι καμπύλες επιδόσεων είναι υπολογισμένες για μηδενική πτώση πιέσεως στους αγωγούς, γιατί ο κατασκευαστής των μηχανών δεν μπορεί να γνωρίζει εκ των προτέρων τη χωροταξία, τις διαστάσεις και τις ταχύτητες ρευστών ώστε να μπορεί να συνυπολογίσει και την αναμενόμενη απώλεια ισχύος λόγω πτώσεως πιέσεως, η οποία είναι φανερό άλλωστε, διαφέρει και από εγκατάσταση σε εγκατάσταση προώσεως.

Η κατανάλωση καυσίμου μεταβάλλεται επίσης με τις συνθήκες λειτουργίας του περιβάλλοντος και των απωλειών (πτώσεων) πιέσεως στους αγωγούς. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στα σχήματα 6.2ζ και 6.2η τα οποία αφορούν τον αεριοστρόβιλο LM 2500 της GE. Το σχήμα 6.2ζ δίνει σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος τους παράγοντες διορθώσεως (correction factors) για την ειδική κατανάλωση, παραγόμενη ιπποδύναμη και αριθμό στροφών στροβίλων ισχύος.

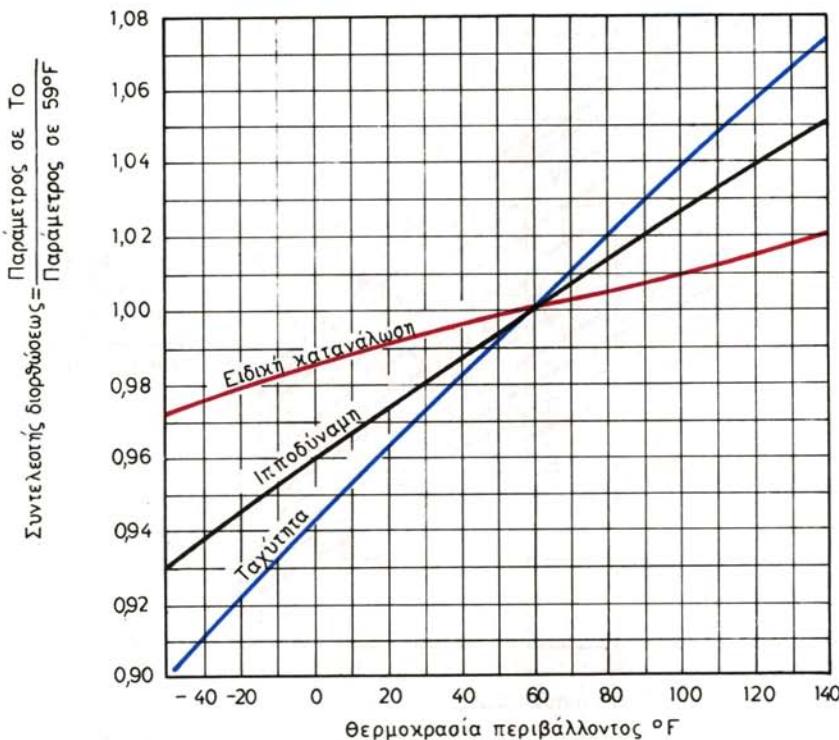
Ο τρόπος χρησιμοποίησεως του διαγράμματος του σχήματος 6.2ζ ή άλλου παράμοιου είναι ο ακόλουθος:



**Σχ. 6.2ε.**  
Επίδραση του υψομέτρου και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στις επιδόσεις της μηχανής.



**Σχ. 6.2στ.**  
Η απώλεια ισχύος λόγω πτώσεως πιέσεως στους αγωγούς.



Σχ. 6.2ζ.  
Διορθώσεις λόγω θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

α) Έστω ότι ζητείται να υπολογισθεί η ειδική κατανάλωση για θερμοκρασία περιβάλλοντος 100°F, ισχύ 20.000 HP και στροφές 3000 RPM.

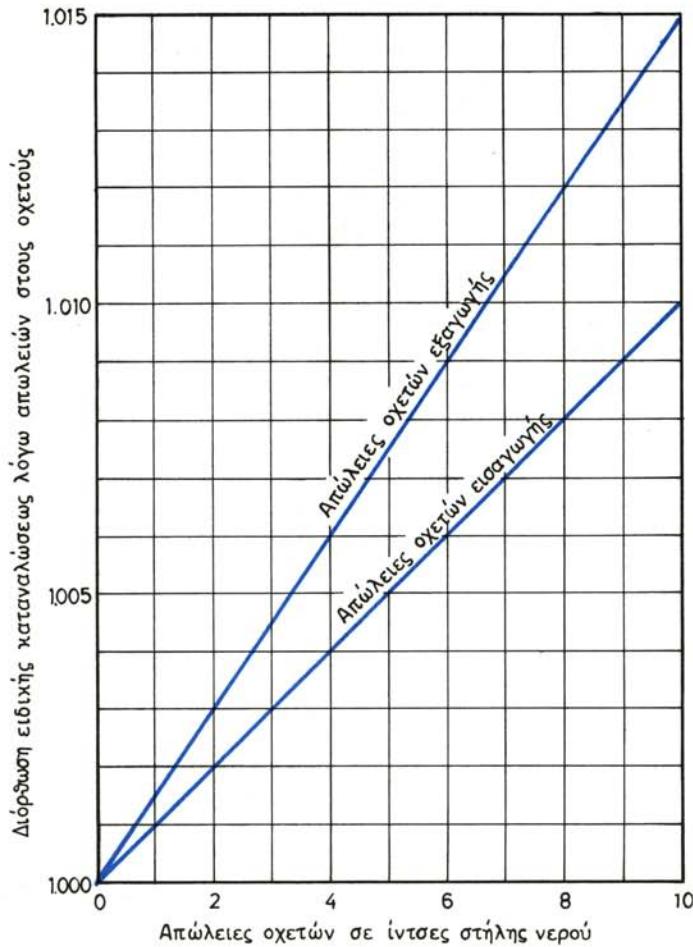
β) Από το σχήμα 6.2ζ προκύπτουν συντελεστές διορθώσεως για την ισχύ 1,026 και τις στροφές 1,038, οπότε το αντίστοιχο σημείο λειτουργίας του στροβίλου είναι:

$$P = 19.500 \left( \frac{20.000}{1,026} \right) \text{ HP} \quad \text{και} \quad N = 2890 \left( \frac{3000}{1,38} \right) \text{ RPM}$$

γ) Το σημείο αυτό της λειτουργίας χρησιμεύει ως είσοδος στο διάγραμμα επιδόσεων όπως του σχήματος 6.2β, οπότε βρίσκεται η ειδική κατανάλωση.

δ) Η τιμή που βρέθηκε έτσι διορθώνεται (πολλαπλασιάζεται) χρησιμοποιώντας το συντελεστή διορθώσεως του σχήματος 6.2ζ, δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση 1,01, οπότε πia η ειδική κατανάλωση που βρέθηκε αντιστοιχεί στις συνθήκες λειτουργίας που δόθηκαν αρχικά.

ε) Αν προσδιορίζεται και πτώση πιέσεως στους αγωγούς, τότε έχομε επί πλέον και νέο διορθωτικό παράγοντα της ειδικής καταναλώσεως, που λαμβάνεται από το σχήμα 6.2η.



Σχ. 6.2η.

Αύξηση της ειδικής καταναλώσεως λόγω πώσεως πιέσεως στους αγωγούς.

### 6.3 Χαρακτηριστικές λειτουργίας ελίκων.

Η πρόωση των πλοίων επιτυγχάνεται γενικά με μετατροπή της θερμικής ενέργειας που προέρχεται από την καύση καυσίμου σε ωφέλιμη ώση. Η μετατροπή αυτή συνήθως απαιτεί το συντονισμό των ακολούθων τριών ξεχωριστών συστημάτων:

#### **α) Μηχανής.**

Μετατρέπει τη θερμική ενέργεια (ΘΕ) σε μηχανικό έργο (ΜΕ) που χαρακτηρίζεται από τη στρεπτική ροπή και την ταχύτητα περιστροφής του άξονα της μηχανής.  
Είσοδος του συστήματος: ΚΑΥΣΙΜΟ. Έξοδος: ΡΟΠΗ.

#### **β) Συστήματος μεταδόσεως κινήσεως.**

Μεταδίδει το παραγόμενο (ΜΕ) εκεί όπου χρησιμοποιείται. Στην απλούστερη

μορφή του αποτελείται μόνο από ένα άξονα μεταδόσεως της κινήσεως, ενώ συνήθως περιλαμβάνει μειωτήρα, συμπλέκτη, συνδέσμους κλπ. Γενικά παραλαμβάνει (ΜΕ) από τη μηχανή και το μεταβιβάζει σε άλλο άξονα.

Είσοδος συστήματος: ΡΟΠΗ. Έξοδος: ΡΟΠΗ.

### γ) Πρωθητή.

Μετατρέπει το (ΜΕ) σε ιπποδύναμη (ισχύ) ώσεως ( $1 \Omega$ ) και στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μια ή περισσότερες έλικες.

Είσοδος του συστήματος: ΡΟΠΗ. Έξοδος: ΩΣΗ.

Ο βασικός αντικειμενικός σκοπός κατά τη σχεδίαση των εγκαταστάσεων προώσεως είναι η εξασφάλιση αρμονικής λειτουργίας των τριών παραπάνω συστημάτων κατά τέτοιον τρόπο, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη μετατροπή του καυσίμου σε ώση για όλες τις συνθήκες λειτουργίας. Όπως παρατηρούμε, το κοινό χαρακτηριστικό λειτουργίας και των τριών συστημάτων είναι η ΡΟΠΗ και συνεπώς η σχέση που συνδέει τη μηχανή και την έλικα είναι για το καθένα αυτή που εκφράζει τη σχέση μεταξύ στρεπτικής ροπής και ταχύτητας περιστροφής (στροφών). Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει αν είναι γνωστή η παραγόμενη από τη μηχανή και η απορροφόμενη από την έλικα ισχύς (αντί της ροπής) δεδομένης της σχέσεως:

$$P = \frac{2\pi QN}{33.000}$$

όπου:  $P$  = ιπποδύναμη σε ΗΡ,

$Q$  = ροπή σε λίμπρες  $\times$  πόδια και

$N$  = στροφές ανά λεπτό.

Στην πράξη, χρησιμοποιούνται το ίδιο συχνά είτε οι χαρακτηριστικές λειτουργίας (ιπποδυνάμεως - στροφών) είτε οι χαρακτηριστικές λειτουργίας (ροπής-στροφών), πάντοτε βέβαια τόσο για τη μηχανή όσο και την έλικα των ίδιων παραμέτρων.

Στα προηγούμενα, έχουμε ασχοληθεί διεξοδικά με τις χαρακτηριστικές λειτουργίας των μηχανών και ειδικότερα των αεριοστροβίλων, ενώ δεν έχει γίνει μνεία για τις χαρακτηριστικές των ελίκων\*.

Οι χαρακτηριστικές λειτουργίας των ελίκων παρουσιάζονται συνήθως υπό μορφή αδιάστατων συντελεστών, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν συστηματικές πειραματικές δοκιμές σε σειρές ελίκων. Υπάρχουν αρκετά είδη ομάδων τέτοιων συντελεστών, θα ασχοληθούμε δύμως με ένα είδος το οποίο περιλαμβάνει:

$$- \text{Το συντελεστή ροπής } K_Q = \frac{Q}{\rho D^5 n^2}$$

$$- \text{Το συντελεστή προχωρήσεως } J = \frac{V_A}{nD}$$

$$- \text{Το συντελεστή ώσεως } K_T = \frac{T}{\rho D^4 n^2}$$

\* Αυτό αποτελεί αντικείμενο άλλου μαθήματος τής Ναυπηγίας. Εδώ θα περιορισθούμε στα τελείως απαραίτητα για την ενιαία παρουσίαση του θέματος.

όπου:  $Q$  = ροπή,

$T$  = ώση,

$\rho$  = πυκνότητα νερού,

$D$  = διάμετρος έλικας,

$n$  = ταχύτητα περιστροφής σε στροφές ανά δευτερόλεπτο και

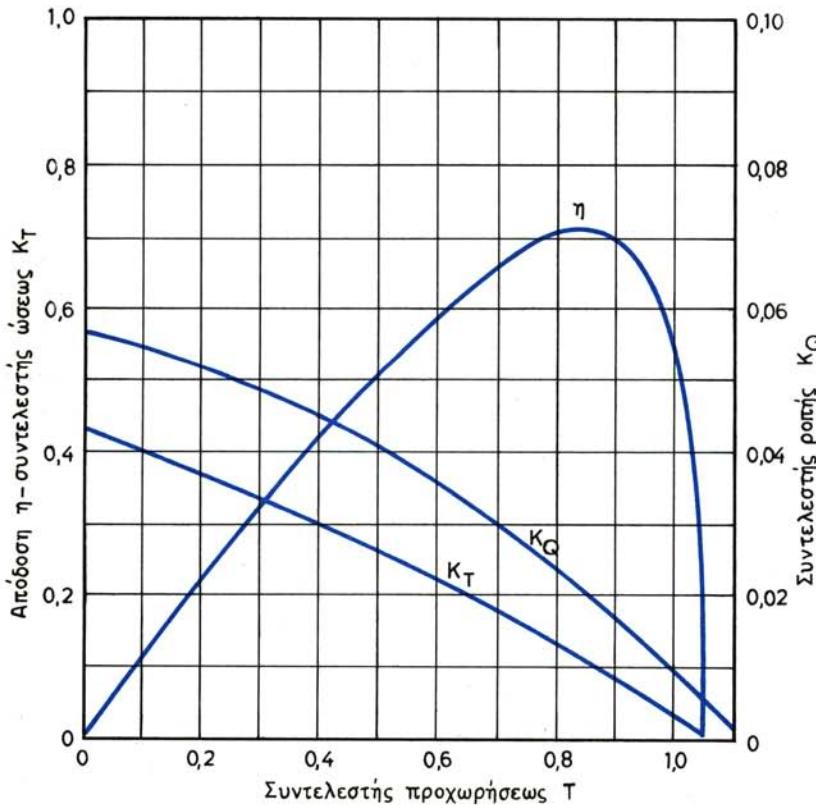
$V_A$  = ταχύτητα προχωρήσεως της έλικας.

Επισημαίνεται ότι οι μονάδες, ανεξάρτητα από το χρησιμοποιούμενο σύστημα, εκλέγονται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε οι τρεις συντελεστές  $K_Q$ ,  $K_T$  και  $J$  νά είναι αδιάστατοι αριθμοί και έτσι να έχουν τις ίδιες αριθμητικές τιμές πάντοτε (ανεξάρτητα από μονάδες).

Εκτός των ανωτέρω, χρησιμοποιείται και ο βαθμός αποδόσεως της έλικας, για **ελεύθερη ροή** όπως λέγεται, δηλαδή:

$$\eta_0 = \frac{JK_T}{2\pi K_Q}$$

Στο σχήμα 6.3α φαίνεται η μεταβολή των  $K_T$ ,  $K_Q$  και  $\eta_0$  σε συνάρτηση με το βαθμό προχωρήσεως  $J$  για μια τυπική έλικα τεσσάρων πτερυγίων και σταθερού βήματος.



Σχ. 6.3α.  
Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας έλικας.

Από τους παραπάνω αδιάστατους συντελεστές της έλικας μπορούν να βρεθούν οι χαρακτηριστικές ροπής-στροφών ή ισχύος-στροφών των ελίκων, αφού προηγουμένως ληφθεί υπόψη η αλληλοεπίδραση σκάφους-έλικας.

Η αλληλοεπίδραση αυτή εκφράζεται από το γνωστό νόμο τής έλικας, για τον οποίο ισχύουν οι εξής υποθέσεις:

α) Η αντίσταση κατά την πρόωση είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας του πλοίου.

β) Η παρεχόμενη από την έλικα ώση είναι επίσης ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας του πλοίου.

Με την προϋπόθεση ότι ισχύουν τα ανωτέρω, ο νόμος της έλικας συνοψίζεται στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η ταχύτητα του πλοίου είναι ανάλογη του αριθμού στροφών της έλικας.
- Η στρεπτική ροπή της έλικας είναι ανάλογος του τετραγώνου των στροφών.
- Η απορροφόμενη από την έλικα ισχύς είναι ανάλογος του κύβου των στροφών.

Ο νόμος της έλικας ισχύει πλήρως για τα λεγόμενα πλοία εκτοπίσματος\* με σχέση ταχύτητας μήκους  $V/\sqrt{L} \approx 1.0$ . Όσο δηλαδή ο λόγος αυξάνει, τόσο απομακρύνομαστε από την ισχύ του νόμου. Επίσης τα ανωτέρω δεν ισχύουν πλήρως στις εξής περιπτώσεις:

- Σε υδροπτέρυγα πλοία (hydrofoils).
- Σε αερόστρωμα (hovercrafts).
- Σε εξαιρετικώς ταχέα σκάφη.
- Σε περιπτώσεις ρυμουλκήσεως, κακοκαιρίας και ρυπαρής γάστρας.
- Κατά τη διάρκεια χειρισμών, όπως ΠΡΟΣΩ, ΚΡΑΤΕΙ, ΑΝΑΠΟΔΑ.

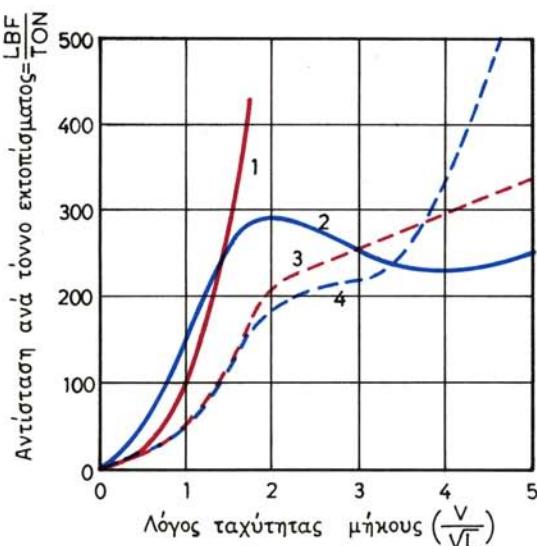
Στις ανωτέρω περιπτώσεις, η αντίσταση δεν αυξάνει, σύμφωνα με την προϋπόθεση που τέθηκε, ανάλογα προς το τετράγωνο της ταχύτητας, αλλά κατά διαφορετικό τρόπο. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 6.3β, όπου φαίνονται τυπικές καμπύλες αντιστάσεως για πλοία ειδικής κατασκευής, καθώς και στο σχήμα 6.3γ όπου φαίνονται οι καμπύλες ροπής, ώσεως και ιπποδυνάμεως για τους ίδιους τύπους πλοίων.

Με τον όρο **πλοία ειδικής κατασκευής** νοούνται κυρίως τα υδροπτέρυγα, τα αερόστρωμα, τα πλοία ολισθήσεως κλπ., τα οποία είναι συνήθως μικρού μεγέθους και σχετικά μεγάλης ταχύτητας.

Όπως προανεφέρθηκε, εκτός από τα πλοία ειδικής κατασκευής, ο νόμος της έλικας δεν ισχύει και για ορισμένα πλοία εκτοπίσματος στις περιπτώσεις ρυμουλκήσεως, κακοκαιρίας, ρυπάνσεως της γάστρας ή γενικότερα, όταν η αντίσταση στην κίνηση των πλοίων δεν είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας, αλλά ανάλογη κάποιου άλλου συντελεστή ή δυνάμεως. Στο σχήμα 6.3δ φαίνεται η μεταβολή της αντιστάσεως, της απαιτούμενης ισχύος και του αριθμού στροφών για τις ανωτέρω περιπτώσεις.

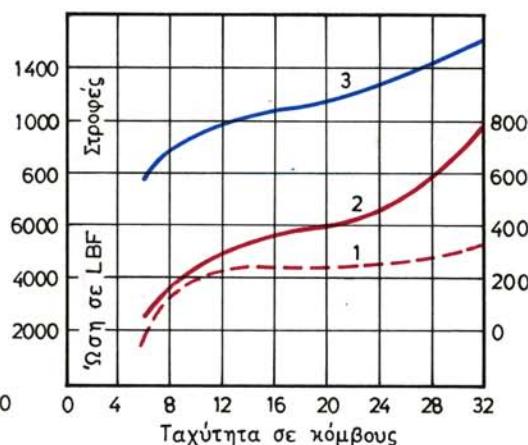
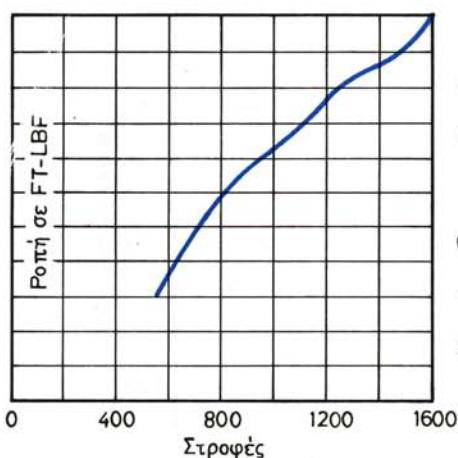
Επανερχόμενοι στο σχήμα 6.3α, υπενθυμίζομε ότι αυτό αφορά **μια** μόνο έλικα από μια οικογένεια παρομοίων ελίκων που έχουν τα ίδια βασικά χαρακτηριστικά. Αν όμως αλλάξει το βήμα της έλικας ή η διάμετρός της ή και τα δύο, τότε, για κάθε διαφορετική ομάδα τιμών, προκύπτουν και διαφορετικές αντίστοιχες καμπύλες των

\* Το σύνολο σχεδόν των εμπορικών πλοίων ανήκει στην κατηγορία των πλοίων εκτοπίσματος.



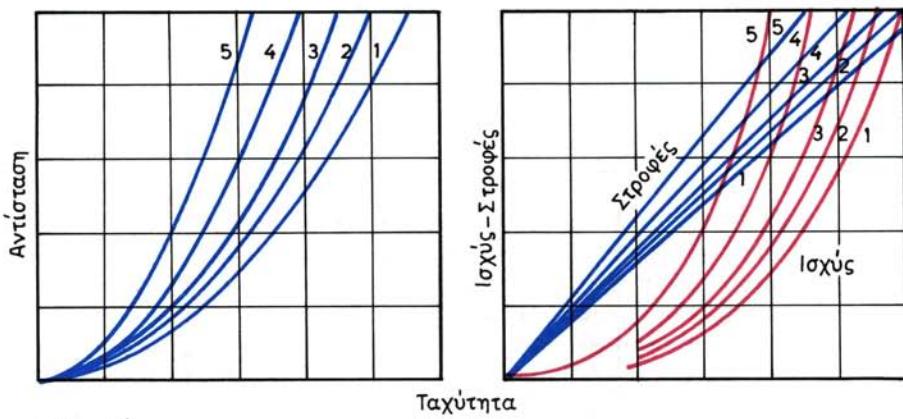
- 1: Πλοία εκτοπίσματος
- 2: Υδροπτέρυγα
- 3: Ολισθάκατοι
- 4: Ολισθάκατοι με στρογγυλεμένα πυθμένα

**Σχ. 6.3β.**  
Καμπύλες αντιστάσεως διαφόρων πλοίων.



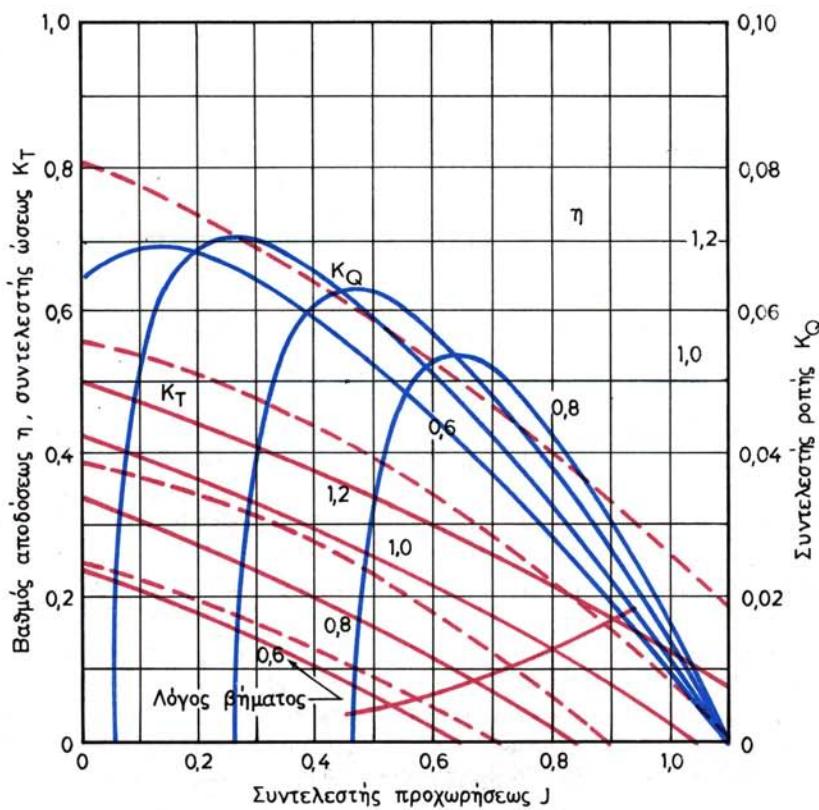
- 1: Ωση
- 2: SHP
- 3: Στροφές

**Σχ. 6.3γ.**  
Καμπύλες ροπής και ώσεως ενός πλοίου.



1.  $R = \alpha V^2$
2.  $R = 1,2 \alpha V^2$
3.  $R = 1,5 \alpha V^2$
4.  $R = 2,0 \alpha V^2$
5.  $R = 3,0 \alpha V^2$

Καμπύλες αντιστάσεως, ισχύος και στροφών.

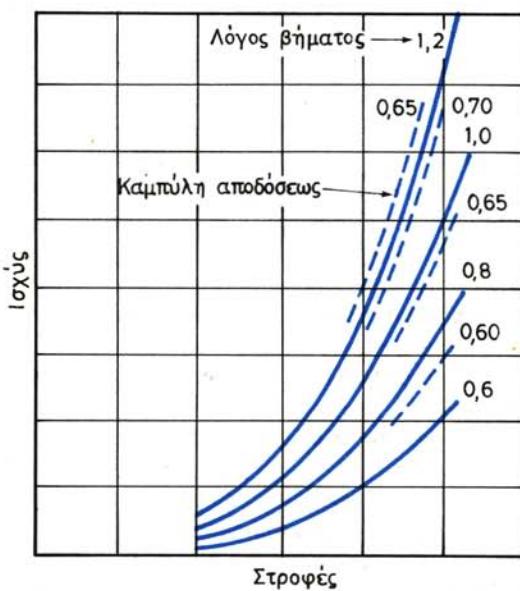


Σχ. 6.3ε.  
Διάγραμμα έλικας.

αδιάστατων συντελεστών  $k_T$ ,  $k_Q$  και  $n_0$ . Το σχήμα 6.3ε είναι χαρακτηριστικό της οικογένειας έλικων, μια από τις οποίες είναι αυτή του σχήματος 6.3α. Στις εγκαταστάσεις προώσεως με αεριοστροβίλους χρησιμοποιούνται, στις περισσότερες περιπτώσεις, έλικες μεταβαλλόμενου βήματος (controllable pitch propellers) και συνεπώς για κάθε τιμή του βήματος υπάρχουν και αντίστοιχες τιμές των  $k_T$ ,  $k_Q$  και  $n_0$ . δηλαδή **μία** έλικα μεταβλητού βήματος αντιπροσωπεύεται από διάγραμμα της μορφής του σχήματος 6.3ε (κατά προσέγγιση), ενώ **μία** σταθερού βήματος από διάγραμμα της μορφής του σχήματος 6.3α.

Από τα διαγράμματα αυτά και με τη βοήθεια του νόμου της έλικας, υπολογίζεται η απορροφόμενη από την έλικα ισχύς και προκύπτουν έτσι καμπύλες ισχύος-αριθμού στροφών για διάφορες τιμές του μεταβαλλόμενου βήματος και διαφορετικές τιμές του βαθμού αποδόσεως, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3στ.

Οι καμπύλες αυτές ισχύος-στροφών της **έλικας** μαζί με τις αντίστοιχες καμπύλες των **μηχανών** προώσεως αποτελούν το σημείο εκκίνησεως για την εξέταση των χαρακτηριστικών της κοινής λειτουργίας έλικας-αεριοστροβίλου, όπως εξετάζονται παρακάτω.



**Σχ. 6.3στ.**  
Καμπύλη ισχύος - στροφών.

#### 6.4 Συνεργασία έλικας και μηχανής προώσεως.

Λέγοντας συνεργασία έλικας και μηχανής προώσεως εννοούμε τη διαδικασία μετατροπής του καυσίμου σε ώστη κατά βέλτιστο τρόπο, προκειμένου για ολόκληρη την κοινή περιοχή λειτουργίας και των δύο.

Η αρχή εξοικονομήσεως της ενέργειας απαιτεί η παραγόμενη από τη μηχανή

ισχύς να απορροφάται καθ' ολοκληρία από την έλικα ή, κατά διαφορετικό τρόπο, η ροπή της μηχανής (λαμβανομένου βέβαια υπόψη τυχόν υπάρχοντος μειωτήρα, οπότε η ροπή της μηχανής πολλαπλασιάζεται επί το λόγο μειώσεως), να ισούται προς τη ροπή της έλικας. Επειδή οι χαρακτηριστικές λειτουργίας τόσο της μηχανής όσο και της έλικας παριστάνονται συνήθως γραφικά, η διαδικασία συνεργασίας περιλαμβάνει την εύρεση των κοινών σημείων λειτουργίας, δηλαδή σημείων όπου η ροπή, η ισχύς και οι στροφές των χαρακτηριστικών τους είναι ίδιες. Προσαρμόζονται στη συνέχεια οι παράμετροι λειτουργίας των μηχανών ή της έλικας, ώστε τα κοινά σημεία των χαρακτηριστικών να βρεθούν στις επιθυμητές θέσεις. Αν και τα ανωτέρω, εκ πρώτης όψεως ίσως, φαίνονται δυσνόητα, θα γίνει φανερή η σημασία τους με ορισμένα παραδείγματα που ακολουθούν.

Ας θεωρήσομε αρχικά την απλούστερη περίπτωση μιας κινητήριας μηχανής συνδεόμενης με μια έλικα (φορτίο) μ' ένα άξονα χωρίς παρεμβολή τριβέων ή άλλων συστημάτων απορροφήσεως ενέργειας. Προφανώς η μηχανή και η έλικα έχουν κοινή ταχύτητα περιστροφής, αυτήν του άξονα, επειδή εθεωρήθη ότι δεν υπάρχουν απώλειες ισχύος και επειδή η ροπή τους είναι η ίδια επίσης. Τόσο η μηχανή όσο και η έλικα έχουν κάθε μία τη δική τους χαρακτηριστική καμπύλη ροπής - αριθμού στροφών, δηλαδή τη γραφική παράσταση της σχέσεως μεταξύ του αριθμού στροφών και της ροπής που παράγουν ή απορροφούν σ' αυτή την ταχύτητα περιστροφής.

Αυτές οι δύο χαρακτηριστικές λειτουργίας σε άξονες ροπής-στροφών έχουν ένα σημείο τομής, όπου και οι δύο συντεταγμένες, δηλαδή ροπή και στροφές της μηχανής, είναι ίσες με τις αντίστοιχες της έλικας, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.4a.

Το σημείο τομής των δύο χαρακτηριστικών είναι και το σημείο λειτουργίας του συνδυασμού μηχανή-έλικα, γιατί αποτελεί σημείο ισορροπίας και μάλιστα είναι το μόνο σημείο σταθερής λειτουργίας.

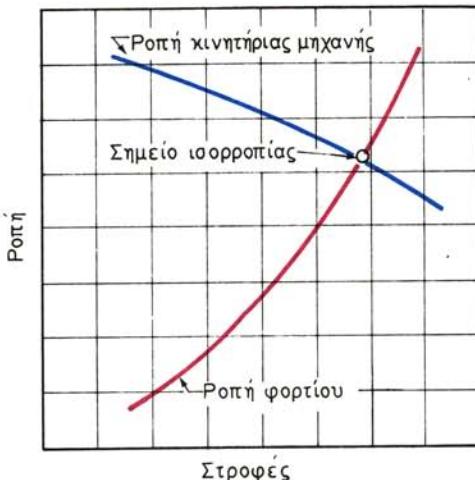
Πραγματικά, αν για οποιοδήποτε λόγο υποθέσομε ότι στιγμιαία αυξάνει η ταχύτητα πέρα από το σημείο ισορροπίας, τότε η **απαπούμενη** ροπή από το φορτίο, για να διατηρήσει αυτή την ταχύτητα, υπερβαίνει τη διατιθέμενη ροπή από τη μηχανή και έτσι το σύστημα επιβραδύνεται προς το σημείο ισορροπίας. Κατά ανάλογο τρόπο, αν στιγμιαία ελαπτωθεί η ταχύτητα, η διατιθέμενη από τη μηχανή ροπή θα υπερβεί την απαιτούμενη από το φορτίο και έτσι το σύστημα θα επιταχυνθεί προς το σημείο ισορροπίας.

Στην πράξη βέβαια, λόγω απωλειών στους τριβείς εδράσεως, η ροπή μεταξύ μηχανής και φορτίου είναι διαφορετική, καθώς επίσης και οι στροφές λόγω παρεμβολής του μειωτήρα. Το πρόβλημα μπορεί να γίνει ακόμη πιο σύνθετο αν οι κινητήριες μηχανές είναι περισσότερες της μιας και μάλιστα διαφορετικού τύπου, ή και τα φορτία περισσότερα, αν π.χ. από την κυρίως μηχανή παίρνει κίνηση και μια ηλεκτρογεννήτρια ή αντλία.

#### **6.4.1 Περίπτωση πολλών κινητηρίων μηχανών και διαφορετικών φορτίων.**

Επειδή στις εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων ουδέποτε υπάρχει μια μόνο κινητήρια μηχανή και ένα φορτίο, όπως στην περίπτωση του σχήματος 6.4a, γι' αυτό θα εξετάσομε με ένα παράδειγμα πώς στις σύνθετες αυτές περιπτώσεις βρίσκομε το σημείο συνεργασίας προωστήριας εγκαταστάσεως και έλικας.

Η γενική ιδέα είναι να «συγκεντρώνονται» όλα τα φορτία κατά τέτοιο τρόπο, ώ-



Σχ. 6.4a.

Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας φορτίου και μηχανής.

στε οι επί μέρους χαρακτηριστικές λειτουργίας τους να αντιπροσωπεύονται από μια ισοδύναμη χαρακτηριστική λειτουργίας, ενώ παράλληλα το ίδιο θα γίνεται για τις διάφορες κινητήριες μηχανές και να καταλήγομε τελικά σε μια ισοδύναμη χαρακτηριστική λειτουργίας γι' αυτές.

Σαν παράδειγμα ας θεωρήσουμε την εγκατάσταση προώσεως ενός πλοίου που έχει ως κινητήριες μηχανές μια μηχανή Diesel και ένα αεριοστρόβιλο, οι οποίες, μέσω ενός κοινού μειωτήρα μεταδίδουν κίνηση σε μια έλικα. Από το μειωτήρα παίρνει κίνηση και μια ηλεκτρογεννήτρια. Ζητείται να βρεθεί ο αριθμός στροφών λειτουργίας της έλικας για δεδομένες συνθήκες λειτουργίας των κινητηρίων μηχανών και της γεννήτριας. Θεωρούνται γνωστές οι χαρακτηριστικές λειτουργίας στροφών ροπής για την έλικα, την ηλεκτρογεννήτρια, τη μηχανή Diesel και τον αεριοστρόβιλο, καθώς και οι απώλειες ισχύος στο μειωτήρα. Επίσης, οι λόγοι μειώσεως στροφών για τη μηχανή Diesel, τον αεριοστρόβιλο και τη γεννήτρια σε σχέση προς τις στροφές της έλικας είναι αντίστοιχα  $r_d : 1$ ,  $r_{gt} : 1$  και  $r_p : 1$ .

Η διαδικασία για την εύρεση του αριθμού στροφών λειτουργίας της έλικας κλιμακώνεται ως ακολούθως:

α) Στη χαρακτηριστική λειτουργίας ροπής-στροφών της μηχανής Diesel μεταβάλλομε τις κλίμακες των συντεταγμένων, πολλαπλασιάζοντας την κλίμακα των ροπών με  $r_d$  και διαιρώντας την κλίμακα στροφών διά  $r_d$ .

β) Επαναλαμβάνομε το ίδιο για τη χαρακτηριστική λειτουργίας του αεριοστρόβιλου χρησιμοποιώντας αντίστοιχα το λόγο μειώσεως  $r_{gt}$ .

γ) Επειδή η αρχή εξοικονόμησεως ενέργειας επιβάλλει ώστε η ολική ροπή να ισούται με το άθροισμα της ροπής της μηχανής Diesel και του αεριοστροβίλου και επειδή με τις προηγούμενες διαιρέσεις οι αντίστοιχες ροπές ανήχθησαν σε κοινή βάση, μπορούμε να τις προσθέσουμε και να πάρομε την ολική ροπή των κινητηρίων μηχανών.

δ) Διαιρούμε την απώλεια ισχύος στο μειωτήρα διά του αριθμού στροφών, ώστε να βρεθεί η απώλεια ροπής.

ε) Την απώλεια ροπής που βρήκαμε, αφαιρούμε από την ολική ροπή των κινητηρίων μηχανών που βρέθηκε στο (γ) και έχομε έτσι την καθαρή ροπή που προέρχεται από Diesel, αεριοστρόβιλο και απώλειες μειωτήρα και η οποία προφανώς είναι η **κινητήρια** ροπή.

στ) Ανάλογα με τα προηγούμενα, εργαζόμαστε και για τα φορτία, αλλάζοντας τις κλίμακες συντεταγμένων των χαρακτηριστικών της γεννήτριας, διαιρώντας τις στροφές και πολλαπλασιάζοντας τη ροπή με  $r_p$ .

ζ) Από την αρχή εξοικονομήσεως ενέργειας, συνάγεται ότι η ροπή της έλικας και η ροπή της γεννήτριας αποτελούν την ολική ροπή του φορτίου, οπότε, προσθέτοντας τις ήδη σε κοινή κλίμακα ανηγμένες ροπές έχομε τη χαρακτηριστική λειτουργίας ροπής-στροφών του ολικού φορτίου.

η) Είναι φανερό ότι το πρόβλημα έχει αναχθεί στην εύρεση του κοινού σημείου λειτουργίας μιας κινητήριας μηχανής και ενός φορτίου, δηλαδή στην εύρεση του σημείου τομής δύο καμπυλών, όπως του σχήματος 6.4a.

Θα πρέπει να διευκρινισθεί ότι στο ανωτέρω παράδειγμα, αντί της χαρακτηριστικής καμπύλης ροπής-αριθμού στροφών που χρησιμοποιήθηκε για όλες τις μηχανές και την έλικα, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί χαρακτηριστική λειτουργίας ισχύος-αριθμού στροφών κατά εντελώς ανάλογο τρόπο.

#### **6.4.2 Το Θεμελιώδες πρόβλημα.**

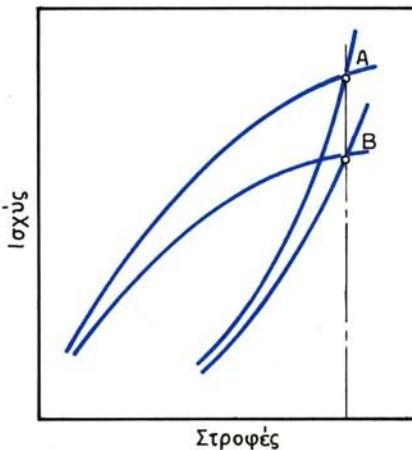
Όπως είναι γνωστό, για την κίνηση ενός πλοίου απαιτείται μία ισχύς ώσεως, ώστε το πλοίο να μπορεί να φθάσει την ταχύτητα για την οποία σχεδιάσθηκε. Η ισχύς αυτή αναπτύσσεται από την έλικα με το ελάχιστο θεωρητικά έργο εισόδου, δηλαδή το μέγιστο δυνατό βαθμό αποδόσεως, και προέρχεται από κινητήρια μηχανή που λειτουργεί σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας (δηλαδή με τον προβλεπόμενο αριθμό στροφών και θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο), ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη σχέση συντηρήσεως της εγκαταστάσεως\*. Εφόσον διατίθεται και ο κατάλληλος μειωτήρας στροφών, τότε τόσο η μηχανή δύσι και η έλικα μπορούν να λειτουργούν στον επιθυμητό για την περίπτωση αριθμό στροφών, οπότε η μεταξύ τους συσχέτιση είναι τέλεια και δεν υφίσταται κανένα πρόβλημα.

Στο σχήμα 6.4β και σε άξονες ισχύος (όχι ροπής) αριθμού στροφών παρουσιάζεται μια κατάσταση όπως η προαναφερθείσα, δηλαδή η καμπύλη της μηχανής αντιπροσωπεύει την καμπύλη ονομαστικής λειτουργίας της (π.χ. τη συνεχούς ισχύος) και η καμπύλη της έλικας αντιπροσωπεύει την έλικα μέγιστης δυνατής αποδόσεως. Έτσι, το σημείο Α της τομής τους καθορίζει τις συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή την απαιτούμενη ισχύ για να κινηθεί το πλοίο με την επιθυμητή του ταχύτητα. Η κατά τον προαναφερθέντα ιδεώδη τρόπο συσχέτιση έλικας και μηχανής διαταράσσεται στην πράξη από πολλούς παράγοντες, με αποτέλεσμα το σημείο Α να θεωρείται μία ιδεατή κατάσταση και όχι απολύτως ρεαλιστική.

Έτσι, τα συνηθέστερα σχετικά προβλήματα που αντιμετωπίζει ο σχεδιαστής της εγκαταστάσεως προώσεως είναι:

α) Ο περιορισμένος αριθμός των υπαρχόντων αεριοστροβίλων, ώστε να μη

\* Υπενθυμίζονται οι σχέσεις μεταξύ συνθηκών λειτουργίας του αεριοστροβίλου και της απαιτούμενης συντηρήσεως του.



Σχ. 6.4β.

Καμπύλες ισχύος - στροφών έλικας και μηχανής.

διατίθεται η ακριβώς απαιτούμενη ιπποδύναμη, π.χ. 23.000 HP οπότε κατ' ανάγκη χρησιμοποιείται αεριοστρόβιλος μεγαλύτερης ισχύος, π.χ. 25.000 HP.

β) Ο επίσης περιορισμένος αριθμός τυποποιημένων μειωτήρων στροφών, ώστε να μη μπορεί να επιτευχθεί ο ακριβώς απαιτούμενος λόγος μειώσεως στροφών αεριοστρόβιλου-έλικας.

γ) Η δυσανάλογη αύξηση του κόστους των μειωτήρων καθώς αυξάνει ο λόγος μειώσεως.

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών εξευρίσκονται συνήθως συμβιβαστικές λύσεις μεταξύ των διαφόρων εναλλακτικών λύσεων που υπάρχουν.

Έτσι, σε ό,τι αφορά τη διαθεσιμότητα μηχανών κατάλληλης ισχύος, μεταβάλλομε τη θεωρούμενη ως συνεχή ισχύ της μηχανής είτε **επί πλέον** είτε **επί έλαπτον**, αποδεχόμενοι τις συνέπειες. Αν λοιπόν η μηχανή εργάζεται σε κατά τι υψηλότερο φορτίο από το προβλεπόμενο, τότε η συνέπεια είναι η ελάττωση του χρόνου μεταξύ επιθεωρήσεως και του χρόνου ζωής της μηχανής, ενώ αντίθετα, αν εργάζεται σε φορτίο χαμηλότερο των δυνατοτήτων της, τότε ο βαθμός αποδόσεώς της ελαττώνεται και γίνεται άσκοπη χρησιμοποίηση μεγαλύτερου κεφαλαίου.

Αν στο σχήμα 6.4β υποθέσουμε ότι απαιτείται η ισχύς του σημείου B αντί της ισχύος του σημείου A, τότε, με μείωση του βήματος της έλικας, η χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας της διέρχεται από το B, το οποίο, συγχρόνως, με έλεγχο της μηχανής (π.χ. ρυθμιστή στροφών), ρυθμίζεται ώστε να αποτελεί και το σημείο ονομαστικής λειτουργίας της. Συνεπώς το B αντί του A είναι το νέο σημείο ισορροπίας του συστήματος αεριοστρόβιλος-έλικα.

Από το σχήμα όμως 6.2β, προκύπτει ότι στην περίπτωση αυτή αναμένεται μεγαλύτερη ειδική κατανάλωση καυσίμου, που είναι η συνέπεια της αδυναμίας επιλογής μηχανής συγκεκριμένης ιπποδυνάμεως.

Συμβιβαστική λύση υιοθετείται επίσης και στην περίπτωση αδυναμίας επιλογής μειωτήρα που να έχει τον ακριβή λόγο μειώσεως στροφών.

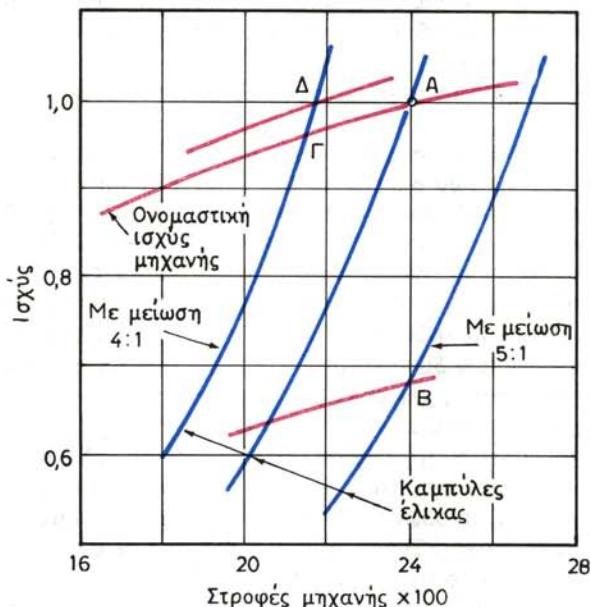
Ας υποτεθεί ότι η ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας της μηχανής είναι 2400

RPM, ενώ της έλικας με τη μεγαλύτερη απόδοση 540 RPM, όταν αναπτύσσει την απαιτούμενη ισχύ ώστες, και ότι οι διατίθέμενοι μειωτήρες έχουν λόγους μειώσεως 2:1, 3:1, 4:1 και 5:1. Στο σχήμα 6.4γ και σε άξονες ισχύος-στροφών παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες ονομαστικής λειτουργίας της μηχανής και της έλικας μόνο για τους λόγους μειώσεως 4:1 και 5:1 που περικλείουν και την επιθυμητή λύση\*.

Όπως φαίνεται από το σχήμα 6.4γ, κανένας από τους παραπάνω δύο λόγους μειώσεως δεν επιτρέπει στη μηχανή να αναπτύξει την πλήρη ισχύ της στις ονομαστικές στροφές λειτουργίας, δηλαδή να λειτουργήσει στο σημείο A. Έτσι, αν χρησιμοποιηθεί ο μειωτήρας 5:1, τότε η μηχανή θα φθάσει στις στροφές ονομαστικής λειτουργίας της πριν φθάσει την ισχύ της (σημείο B), ενώ, αν χρησιμοποιηθεί ο λόγος 4:1, η μηχανή θα φθάσει στα όρια της επιτρεπόμενης θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο πριν φθάσει τις απαιτούμενες στροφές για ν' αναπτύξει την ονομαστική ισχύ (σημείο Γ).

Φαίνεται κατ' αρχήν ότι μεταξύ των δύο μειωτήρων ο 4:1 είναι προτιμότερος, γιατί η διαφορά ισχύος μεταξύ των σημείων A και Γ είναι μικρότερη από ό,τι μεταξύ των σημείων A και B, επί πλέον δε είναι και φθηνότερος.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι το βασικό πρόβλημα ευρέσεως του κοινού σημείου λειτουργίας μηχανής προώσεως και έλικας\*\* συνίσταται στη μετακίνηση των αντιστοίχων χαρακτηριστικών λειτουργίας στο επίπεδο ισχύος-στροφών κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το σημείο ισορροπίας της κοινής λειτουργίας να



**Σχ. 6.4γ.**  
Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας έλικας και μηχανής.

\* Αν και παραπάνω εξετάζονται για την περίπτωση των αεριστροβίλων, όμως, αν τροποποιηθούν ανάλογα **μόνο** οι χαρακτηριστικές λειτουργίας των κυρίων μηχανών, ισχύουν για όλα τα είδη των μηχανών προώσεως.

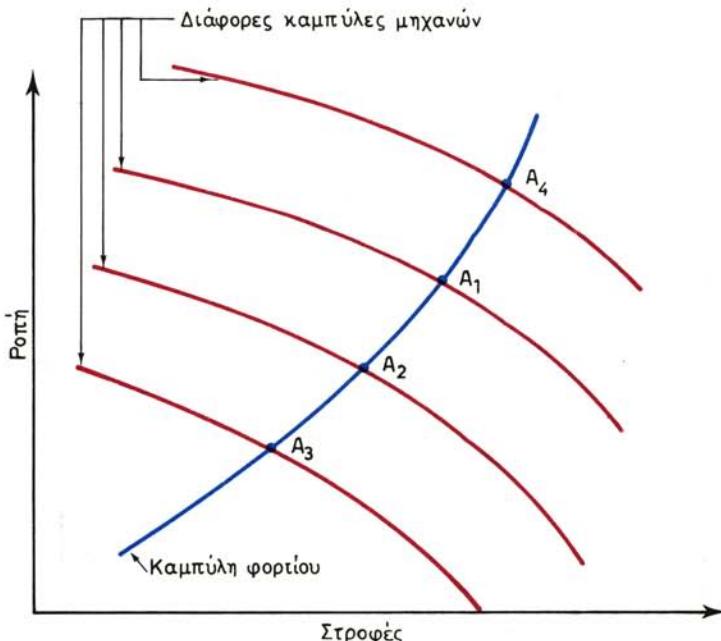
\*\* Είναι φανερό ότι η επιθυμητή λύση είναι μειωτήρας με λόγο μειώσεως  $2400/540 = 4,44$ .

βρεθεί στη βέλτιστη θέση.

Η μετακίνηση της καμπύλης της έλικας επιτυγχάνεται συνήθως είτε με μεταβολή του λόγου μειώσεως (διαφορετικός μειωτήρας) είτε με μεταβολή του βήματος της έλικας, ενώ η μετακίνηση της χαρακτηριστικής της μηχανής επιτυγχάνεται με μεταβολή του αριθμού στροφών λειτουργίας ή της ποσότητας του εγχεόμενου καυσίμου. Βέβαια, κάθε μετακίνηση έχει, εκτός των αμέσων συνεπειών της, και ορισμένες έμμεσες, όπως π.χ. μεταβολή του βαθμού αποδόσεως της έλικας, της ειδικής καταναλώσεως, κόστους, απαιτούμενου χρόνου μεταξύ επιθεωρήσεων, χρόνου ζωής λειτουργίας κλπ. Όλες αυτές οι άμεσες και έμμεσες συνέπειες συνεκτιμώνται και ανάλογα με τη βαρύτητα της κάθε μιας στο αποτέλεσμα, επιλέγεται τελικά το επιθυμητό σημείο λειτουργίας.

Υπάρχουν επίσης ορισμένα ιδιαίτερα σημεία που χρειάζονται διευκρίνιση ή και συμπλήρωση. Έτσι δεν πρέπει να μας διαφεύγει τό γεγονός ότι οι χαρακτηριστικές λειτουργίας τόσο της μηχανής όσο κυρίως της έλικας μεταβάλλονται αναπόφευκτα με την πάροδο του χρόνου. Η αντίσταση του πλοίου π.χ. αυξάνει είτε λόγω διαβρώσεως των επιφανειών του, είτε λόγω ρυπάνσεως του από τους μικροοργανισμούς της θάλασσας, με αποτέλεσμα να απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός στροφών **για δεδομένη πποδύναμη**. Θεωρώντας το σχήμα 6.4γ, αυτό παρουσιάζεται ως μετακίνηση της καμπύλης της έλικας προς τα αριστερά. Αν δηλαδή θεωρηθεί ως αρχική καμπύλη λειτουργίας η διερχόμενη από το σημείο A, αυτή έχει την τάση να αντικατασταθεί με την καμπύλη τη διερχόμενη από το σημείο Γ του σχήματος, μετά την αύξηση αντιστάσεως του πλοίου λόγω π.χ. ρυπάνσεως.

Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει η εξέταση του σχήματος 6.4δ ως προς το σημείο ισορροπίας ή σημείο σταθερής λειτουργίας όπως έχει ήδη αναφερθεί προη-

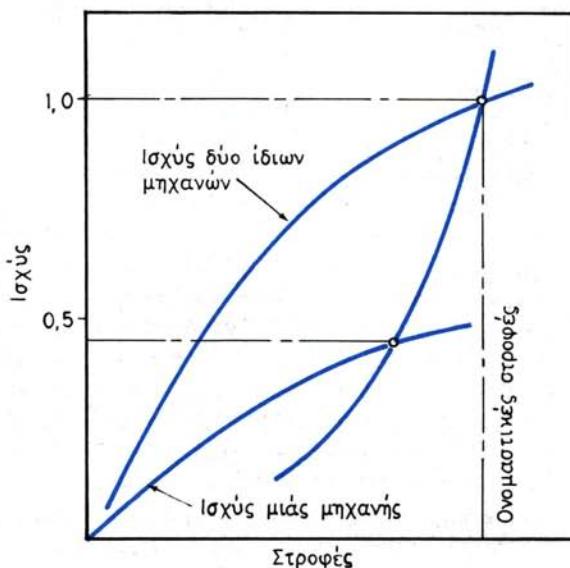


Σχ. 6.4δ.  
Διάφορα σημεία λειτουργίας μηχανής και έλικας.

γουμένως (βλ. σχήμα 6.4a). Υπάρχει ένα μόνο σημείο ισορροπίας κοινής λειτουργίας ενός αεριοστροβίλου και της έλικας, ενώ είναι γνωστό ότι τα κινούμενα με αεριοστροβίλους πλοία έχουν δυνατότητα μεταβολής και διατηρήσεως οποιασδήποτε ταχύτητας\*, εντός των ορίων βέβαια των δυνατοτήτων των μηχανών και της εγκαταστάσεως προώσεως. Τι συμβαίνει δηλαδή στις περιπτώσεις διατηρήσεως χαμηλής ταχύτητας; Είναι η ισορροπία τότε στιγμιαία και ασταθής; Η απάντηση στα ερωτήματα αυτά είναι σχεδόν προφανής από τη θεώρηση του σχήματος 6.4d. Έτσι διατηρηση χαμηλής ταχύτητας με έλικα σταθερού βήματος συνεπάγεται περιορισμό της ποσότητας του παρεχόμενου καυσίμου, με αποτέλεσμα η χαρακτηριστική της μηχανής να είναι μια νέα καμπύλη που αντιπροσωπεύει τη συμπεριφορά της, όταν μειώνεται η ποσότητα του καυσίμου. Δεν πρόκειται επομένως περί παραβιάσεως των όσων αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η καμπύλη δηλαδή της έλικας τέμνει την αντίστοιχη της μηχανής σε ένα σημείο, το μοναδικό κοινό σημείο ισορροπίας, αλλά η μηχανή αντιπροσωπεύεται πια από διαφορετικές καμπύλες, ανάλογα με την ποσότητα του παρεχόμενου καυσίμου.

Ενδιαφέρουσα είναι και η περίπτωση πολλών κινητηρίων μηχανών για παροχή ισχύος στην εγκατάσταση προώσεως. Διακρίνομε δύο περιπτώσεις: είτε δηλαδή οι κινητήριες μηχανές να εργάζονται συγχρόνως ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη ταχύτητα είτε ξεχωριστά, δηλαδή η μια να χρησιμοποιείται μέχρι ορισμένη χαμηλή ταχύτητα και η άλλη στις περιπτώσεις που την ταχύτητα αυτή θέλομε να την υπερβούμε. Στην τελευταία αυτή περίπτωση η μηχανή που λειτουργεί μόνη εργάζεται περίπου στην ονομαστική της ισχύ και αποφεύγεται έτσι η μειωμένη απόδοσή της λόγω λειτουργίας της υπό μερικό φορτίο.

Με περισσότερες μηχανές σε λειτουργία, η συνολική ισχύς και ροπή είναι το άθροισμα των επί μέρους ισχύων και ροπών των μηχανών, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.4e για την περίπτωση της ισχύος δύο μηχανών.



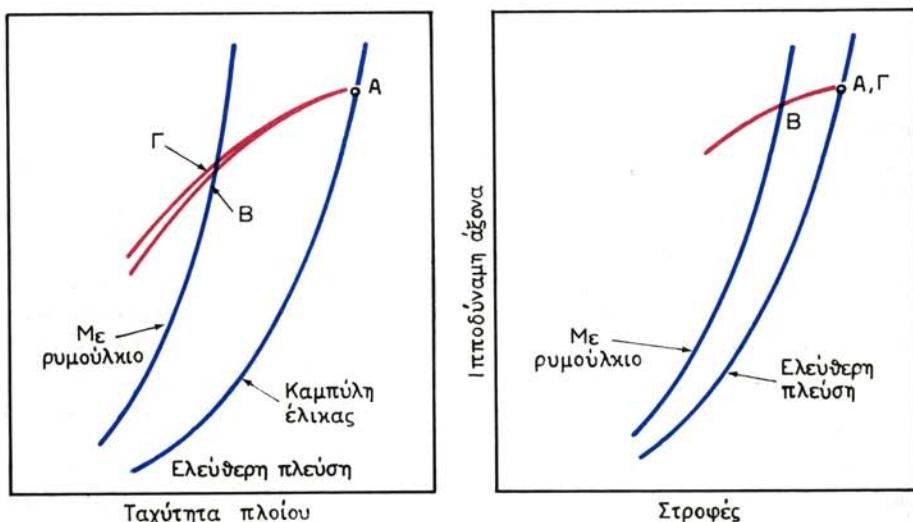
Σχ. 6.4e.

Σημείο ισορροπίας κατά τη λειτουργία μιας ή δύο ομοίων μηχανών.

\* Δεν υφίσταται δηλαδή ανάλογο φαινόμενο όπως με τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, οι οποίοι έχουν μία ή λίγες διακεκριμένες ταχύτητες περιστροφής.

Το σημαντικότερο συμπέρασμα που προκύπτει από το σχήμα είναι ότι, αν και οι δύο μηχανές είναι ακριβώς οι ίδιες, όταν λειτουργεί μόνη της οποιαδήποτε από τις δύο, η παρεχόμενη ισχύς είναι μικρότερη από το ήμισυ που παρέχουν και οι δύο, όταν εργάζονται συγχρόνως. Όπως φαίνεται, η καμπύλη του φορτίου είναι τέτοια, ώστε μόνη της μια μηχανή δεν μπορεί να φθάσει την ονομαστική της ταχύτητα (στροφές) και συνεπώς και την ονομαστική της ισχύ. Τέλος, ιδιαίτερη περίπτωση αποτελεί η ρυμούλκηση ενός πλοίου από ένα άλλο.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.4στ., κατά τη ρυμούλκηση πολλαπλασιάζεται η αντίσταση κατά την κίνηση του πλοίου και συνεπώς και η απαιτούμενη ιπποδύναμη από ό,τι θα ήταν χωρίς ρυμούλκιο, με αποτέλεσμα η καμπύλη της έλικας να μετακινείται προς τ' αριστερά, δηλαδή το σημείο κοινής λειτουργίας μηχανής προώσεως-έλικας να μετακινείται από το Α στο Γ.



Σχ. 6.4στ.

Καμπύλες αντιστάσεως κατά τη ρυμούλκηση.

## 6.5 Σύνθετα κυκλώματα εγκαταστάσεων προώσεως.

Τα μεγάλα πλεονεκτήματα των αεριοστροβίλων, και κυρίως το μικρό τους βάρος και το συμπαγές της κατασκευής τους, κίνησαν πολύ νωρίς το ενδιαφέρον των σχεδιαστών εγκαταστάσεων προώσεως. Ιδιαίτερα πολλά αναμένονταν από τους αεριοστροβίλους για τις περιπτώσεις πλοίων με απαιτήσεις μικρής ή μέσης ταχύτητας επί μεγάλο ποσοστό του χρόνου που ταξιδεύουν, ενώ αντίθετα για πολύ μικρό ποσοστό του συνολικού χρόνου ταξιδεύουν υπό μεγάλη ταχύτητα. Η εγκατάσταση προώσεως όμως θα πρέπει να παρέχει αρκετή ισχύ, ώστε να ικανοποιείται η απαίτηση μέγιστης ταχύτητας έστω και για το μικρό ποσοστό του χρόνου που απαιτείται, με αποτέλεσμα να γίνεται μία εγκατάσταση με πολύ μικρό συντελεστή χρησιμοποιήσεως\*, η οποία λειτουργεί πιο πολύ υπό μερικό φορτίο και με χαμηλό βαθ-

\* Συντελεστής χρησιμοποιήσεως είναι το ποσοστό της αξιοποιούμενης ισχύος μιας μηχανής ανά 24ωρο λειτουργίας της.

μό αποδόσεως και να γίνεται έτσι άσκοπος επένδυση όγκου, βάρους και χρημάτων.

Το πρόβλημα αντιμετωπίσθηκε με τη χρησιμοποίηση δύο διαφορετικών ειδών μηχανών πρώσεως, από τις οποίες το ένα είδος χρησιμοποιείται για τις συνήθεις ταχύτητες ρουτίνας, ενώ το άλλο μόνο για τις μεγαλύτερες ταχύτητες, οι οποίες αντιπροσωπεύουν μικρό ποσοστό του φάσματος λειτουργίας του πλοίου.

Προτάθηκαν λοιπόν κατά καιρούς οι ακόλουθοι συνδυασμοί:

α) COSAG (Combined Steam and Gas) δηλαδή συνδυασμός ατμοστροβίλου *και* αεριοστροβίλου.

β) CODAG (Combined Diesel and Gas), δηλαδή συνδυασμός μηχανής Diesel *και* αεριοστροβίλου.

γ) COGAG (Combined Gas and Gas), δηλαδή συνδυασμός αεριοστροβίλου *και* αεριοστροβίλου.

δ) CODOG (Combined Diesel or Gas) δηλαδή λειτουργίας μηχανής Diesel *ή* αεριοστροβίλου.

ε) COGOG (Combined Gas or Gas), δηλαδή λειτουργίας δύο διαφορετικών ειδών αεριοστροβίλων.

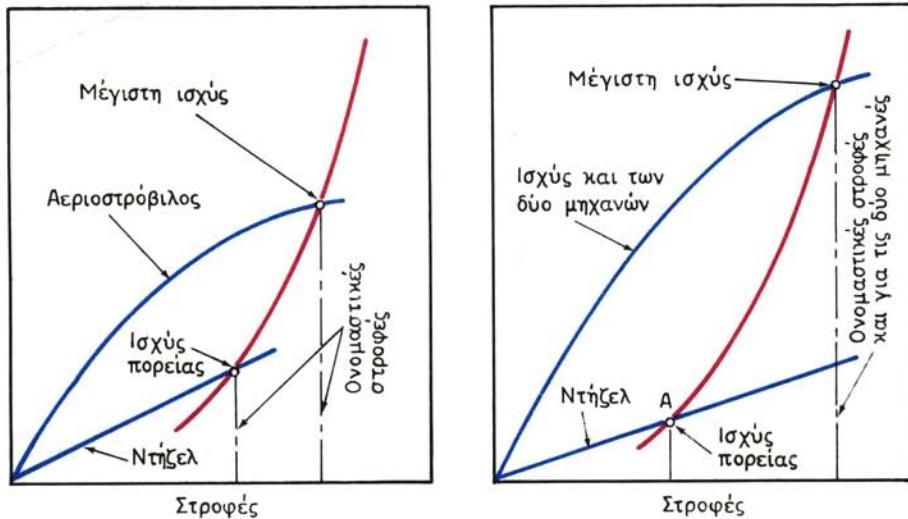
Το κύκλωμα ατμοστροβίλου-αεριοστροβίλου (COSAG) χρησιμοποιήθηκε στα πρώτα στάδια εφαρμογής των συνθέτων κυκλωμάτων, γιατί κατά την εποχή εκείνη θεωρούσαν ότι ο ατμοστρόβιλος είχε καλύτερη απόδοση, αξιοπιστία και ευχέρεια αναποδίσεως σε σχέση προς τον αεριοστρόβιλο. Έτσι, σε ταχύτητες που απαιτούσαν μέχρι και το ήμισυ της διατιθέμενης συνολικής ισχύος, δηλαδή περίπου το 80% της μέγιστης ταχύτητας του πλοίου, εχρησιμοποιείτο αποκλειστικά ο ατμοστρόβιλος, ενώ η χρήση του αεριοστροβίλου περιορίζόταν σε υψηλότερες ταχύτητες. Κατά τον τρόπο αυτό, η χαμηλή απόδοση και αξιοπιστία του αεριοστροβίλου δεν αποτελούσε κρίσιμο παράγοντα, συγχρόνως δε επιτυγχανόταν μείωση του βάρους της εγκαταστάσεως προώσεως.

Σήμερα βέβαια, τα θεωρούμενα στο παρελθόν ως πλεονεκτήματα του ατμοστροβίλου έχουν υποβαθμισθεί, γιατί και ο βαθμός αποδόσεως του αεριοστροβίλου έχει βελτιωθεί σημαντικά και η αξιοπιστία του αεριοστροβίλου έχει αυξηθεί. Τέλος, σε περίπτωση βλάβης, η επαναλειτουργία του συστήματος προώσεως με αντικατάσταση είναι θέμα λίγων ωρών.

Η προτίμηση λοιπόν των κατασκευαστών έχει απομακρυνθεί από τα συστήματα COSAG και κατά τα τελευταία χρόνια κανένα τέτοιο σύστημα δεν τοποθετήθηκε σε νέες κατασκευές. Η χρήση της μηχανής Diesel στα σύνθετα κυκλώματα εγκαταστάσεως είναι ευρύτατη και κυρίως όπου απαιτούνται σχετικά χαμηλές ισχείς ρουτίνας τις οποίες η Diesel εύκολα (χωρίς δηλαδή μεγάλο βάρος και όγκο) μπορεί να αποδώσει. Εξάλλου ο υψηλότερος βαθμός αποδόσεως της σε σύγκριση με τον αεριοστρόβιλο καθιστά οικονομικότερη τη λειτουργία του συστήματος προώσεως. Χρησιμοποιείται σε λειτουργία είτε σε συνδυασμό με τον αεριοστρόβιλο (σύστημα CODAG) είτε εναλλακτικά προς αυτόν (σύστημα CODOG), όπως φαίνεται στο σχήμα 6.5.

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα CODOG, η μηχανή Diesel και ο αεριοστρόβιλος δεν μπορούν να λειτουργούν συγχρόνως, αφού το κάθε είδος μηχανής λειτουργεί στη μέγιστη ισχύ και στροφές του. Αυτό είναι βέβαια μειονέκτημα, γιατί δεν μπορούμε να εκμεταλλευθούμε το σύνολο της εγκαταστημένης ισχύος.

Αντίθετα, στην περίπτωση της κοινής λειτουργίας Diesel και αεριοστροβίλου



**Σχ. 6.5.**  
Καμπύλες λειτουργίας συστήματος CODOG και CODAG.

(CODAG), η συνολικά εγκαταστημένη ισχύς αξιοποιείται πλήρως. Στην περίπτωση όμως αυτή, σε χαμηλές ταχύτητες, η μηχανή Diesel λειτουργεί μόνη της σε μικρότερο φορτίο και αριθμό στροφών από τις ονομαστικές τιμές της (σημείο A), με χαμηλότερο βαθμό αποδόσεως καί σχετικά αντιοικονομικά.

Η αριγής χρησιμοποίηση αεριοστροβίλων σε σύνθετα κυκλώματα εφαρμόζεται στις περιπτώσεις που οι απαιτήσεις ισχύος ρουτίνας είναι αρκετά αυξημένες, ώστε η χρησιμοποίηση μηχανών Diesel να είναι ασύμφορη. Διακρίνομε πάλι δύο περιπτώσεις:

α) Τη συνδυασμένη λειτουργία (COGAG). Κατ' αυτή, μέχρι μια ορισμένη ταχύτητα, χρησιμοποιούνται ορισμένοι μόνον από τους εγκαταστημένους αεριοστροβίλους και πιο πάνω από αυτήν και οι υπόλοιποι.

β) Την ξεχωριστή λειτουργία (COGOG). Κατ' αυτή, μέχρι μια ορισμένη ταχύτητα, χρησιμοποιείται ο αεριοστρόβιλος μικρής ισχύος, ενώ για μεγαλύτερες ταχύτητες αυτός αντικαθίσταται από το μεγαλύτερο αεριοστρόβιλο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

### ΚΑΥΣΙΜΑ ΚΑΙ ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ ΣΕ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ

#### 7.1 Γενικά.

Όπως σε όλους τους τύπους ναυτικών μηχανών προώσεως, έτσι και στους αεριοστροβίλους τα χρησιμοποιούμενα καύσιμα είναι υγρά, προερχόμενα από απόσταξη πετρελαίου. Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται οι ιδιότητες των διαφόρων ειδών καυσίμων, η επίδραση των ιδιοτήτων τους στους αεριοστροβίλους και τα επί πλοίου συστήματα καυσίμου, τα οποία χρειάζονται μέχρι να φθάσει το καύσιμο από τη δεξαμενή αποθηκεύσεως του στη μηχανή. Εξετάζεται επίσης ιδιάτερα το χρησιμοποιούμενο ως καύσιμο υγροποιημένο αέριο στην ποσότητα που αναπόφευκτα εξαερώνεται καθημερινά (φαινόμενο boil-off).

Τα καύσιμα έχουν πολλές ιδιότητες, αλλά οι σημαντικότερες για το συντηρητή και χειριστή των μηχανών είναι δύο: το **ιξώδες** και η **περιεκτικότητά** του σε **ξένες ύλες**. Το **ιξώδες** έχει ιδιάτερη σημασία προκειμένου για την άντληση και την έγχυση του καυσίμου, από αυτό δε διακρίνονται τα καύσιμα σε **βαρέα** (όσα έχουν υψηλό ιξώδες σε συνήθεις θερμοκρασίες) και σε **ελαφρά** (όσα έχουν χαμηλό ιξώδες).

Η περιεκτικότητα σε **ξένες ύλες** επιδρά στις μηχανές, γιατί αυτές φράσσουν τα φίλτρα και τους καυστήρες, δημιουργούν εναποτιθέμενα κατάλοιπα καύσεως και επιταχύνουν τη διάβρωση των τμημάτων της μηχανής, με τα οποία έρχονται σε επαφή.

Οι παραπάνω ιδιότητες είναι επιδεκτικές βελτιώσεως. Το ιξώδες ελαττώνεται με θέρμανση, η δε περιεκτικότητα σε **ξένες ύλες** ελαττώνεται είτε με τη βοήθεια φίλτρων είτε με χημικά πρόσθετα.

Από όλες τις θερμικές μηχανές ο αεριοστρόβιλος έχει τις περισσότερο αυξημένες απαιτήσεις από τα καύσιμά του, κυρίως λόγω των υψηλών θερμικών και μηχανικών καταπονήσεων που υφίστανται τα τμήματά του από τη συνεχή έκθεσή του στα θερμά προϊόντα της καύσεως, που λόγω της υψηλής τους θερμοκρασίας ελαττώνουν το όριο αντοχής των υλικών κατασκευής.

Τα προϊόντα του πετρελαίου που χρησιμοποιούνται σε ναυτικές γενικά εγκαταστάσεις είναι είτε **μεσαία αποστάγματα** είτε **κατάλοιπα**. Οι όροι αναφέρονται στη διαδικασία διυλίσεως των καυσίμων από την αποστακτική στήλη. Έτσι, τα προϊόντα που εξάγονται εξ ολοκλήρου από τη στήλη, ανάλογα με το σημείο βρασμού τους, λέγονται αποστάγματα (distillate), ενώ εκείνα που παραμένουν στη στήλη, επειδή έχουν υψηλότερο σημείο βρασμού, είναι τα κατάλοιπα. Μεσαίο χαρακτηρίζεται το απόσταγμα που η θερμοκρασία εξαγωγής του βρίσκεται στο μέσο των ορίων λειτουργίας της στήλης αποστάξεως.

Δύο μεσαία αποστάγματα που χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε μηχανές Diesel,

είναι τα φερόμενα με τις εμπορικές ονομασίες marine gas oil και marine diesel oil. Το πρώτο ως ελαφρύτερο χρησιμοποιείται σε ταχύστροφες, ενώ το δεύτερο είναι κατάλληλο για μεσόστροφες μηχανές χωρίς προθέρμανση.

Κατάλοιπο είναι το γνωστό ως «bunker C» υψηλού ίξωδους καύσιμο το οποίο χρησιμοποιείται σε λέβητες εμπορικών πλοίων ή ακόμα και σε βραδύστροφες Diesel αφού προθερμανθεί. Από την ανάμιξη αποσταγμάτων και καταλοίπων προκύπτουν τα λεγόμενα **ενδιάμεσα** (intermediates) καύσιμα που είναι φθηνότερα από τα αποστάγματα και συγχρόνως κατάλληλα για χρήση και σε μεσόστροφες ή βραδύστροφες μηχανές Diesel. Τα καύσιμα αυτά χαρακτηρίζονται από το ίξωδες που έχουν σε θερμοκρασία 100°F. Έτσι π.χ. το ενδιάμεσο καύσιμο 15 έχει ίξωδες 1500 της κλίμακας Redwood στους 100°F και ονομάζεται intermediate 1500.

Στο πολεμικό ναυτικό χρησιμοποιούνται το **ειδικό καύσιμο λεβήτων** (navy special) για ατμολέβητες και το **καύσιμο Diesel** (navy diesel) για τις αντίστοιχες μηχανές. Το πρώτο είναι αντίστοιχο του intermediate 400 και το δεύτερο του marine diesel oil.

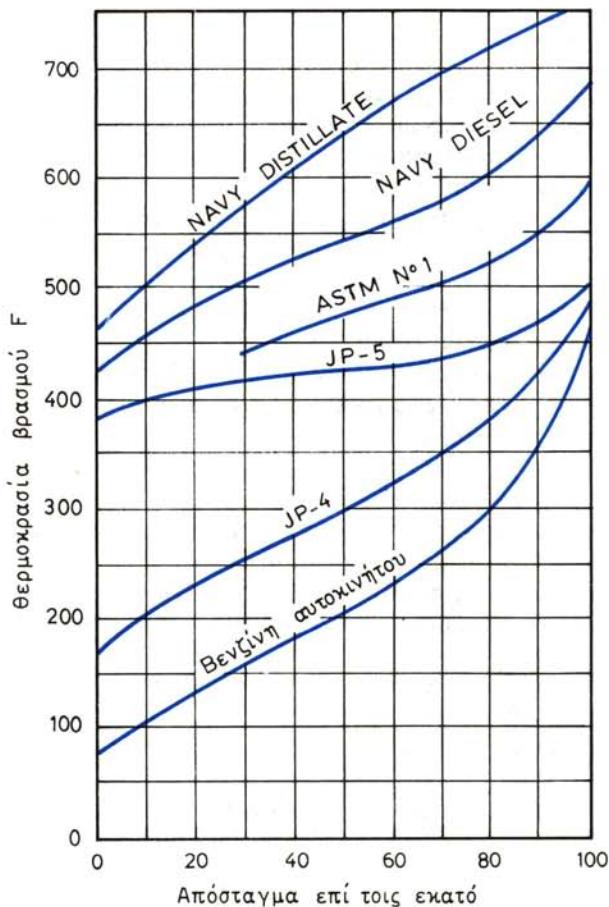
Στους αεριοστροβίλους «αεροπορικής προελεύσεως» και σχεδόν σε όλα τα είδη αεριοστροβίλων που χρησιμοποιούνται σε ναυτικές εγκαταστάσεις, χρησιμοποιούνται αποκλειστικά αποστάγματα με ιδιαίτερες απαιτήσεις, που τα συνήθη προϊόντα της αποστακτικής στήλης δεν μπορούν να ικανοποιήσουν, και κυρίως ελαφρά αποστάγματα φερόμενα με τις εμπορικές ονομασίες JP-4 και JP-5 (jet propellant).

Το JP-5 έχει χαμηλότερο ίξωδες από το marine gas oil και αντίστοιχει περίπου με κηροζίνη, ενώ το JP-4 είναι ακόμη ελαφρύτερο και, από πλευράς ίξωδους, βρίσκεται μεταξύ κηροζίνης και κοινής βενζίνης αυτοκινήτου. Ευρύτερη χρήση σε ναυτικές εγκαταστάσεις έχει το JP-5.

Στο σχήμα 7.1α παρέχεται μία γενική ιδέα της σχέσεως μεταξύ των παραπάνω ειδών καυσίμου. Ειδικότερα παρουσιάζονται οι καμπύλες αποστάξεως, που δείχνουν την περιοχή των θερμοκρασιών στις οποίες εξέρχονται από την αποστακτική στήλη του αργού πετρελαίου τά διάφορα καύσιμα. Βασικά, οι καμπύλες καθορίζουν τα κυριότερα χαρακτηριστικά των διαφόρων ειδών καυσίμου, αν και πολλά από αυτά εξαρτώνται από την πηγή προελεύσεως του αργού πετρελαίου (π.χ. παραφινικοί ή αλειφατικοί υδρογονάνθρακες), από τον τρόπο αντλήσεως, μεταφοράς και αποθήκευσέως του κλπ.

Στο σχήμα 7.1β, φαίνεται η κατάταξη των καυσίμων σε άξονες συντεταγμένων θερμοκρασίας και κινηματικού ίξωδους. Η κατάταξη με αυτό τον τρόπο έχει ιδιαίτερη σημασία, γιατί η τιμή του καυσίμου είναι αντίστροφη συνάρτηση του ίξωδους του, δηλαδή καύσιμο μεγαλύτερου ίξωδους είναι γενικά φθηνότερο. Αν και για οικονομικούς λόγους είναι επιθυμητό να χρησιμοποιούνται βαρέα καύσιμα, αυτό δεν επιτυγχάνεται κυρίως λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας των βαρέων καυσίμων σε ανεπιθύμητες και επιβλαβείς ζένες προσμίξεις, επειδή στα βαρέα καύσιμα παραμένει το σύνολο σχεδόν των προσμίξεων που υπάρχουν στο αντίστοιχο αργό πετρέλαιο.

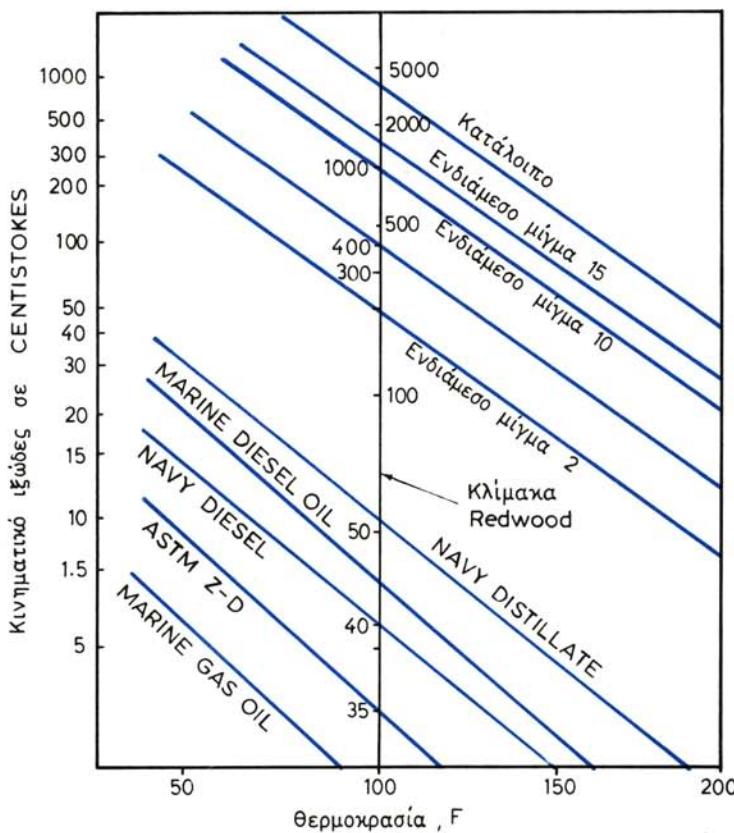
Υπάρχουν βέβαια αεριοστρόβιλοι βαριάς κυρίως βιομηχανικής χρήσεως, στους οποίους είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και κατάλοιπα ώς καύσιμα, αφού προηγουμένως υποστούν ορισμένες διεργασίες, όπως προθέρμανση, διέλευση μέσα από σύστημα πολλαπλών φίλτρων κλπ.



**Σχ. 7.1α.**  
Καμπύλες αποστάξεως διαφόρων καυσίμων.

Επίσης, για να αντιμετωπισθεί η πτωχή ποιότητα των βαρέων καυσίμων, ξανασχεδιάζονται οι καυστήρες για υψηλότερες τιμές ιξώδους και μεγαλύτερα μήκη φλόγας, προστατεύονται τα πτερύγια και τα λοιπά εξαρτήματα και χρησιμοποιούνται υλικά κατασκευής που μπορούν να αντιμετωπίσουν την υψηλή διαβρωτική ικανότητα που συνήθως παρουσιάζουν οι ξένες ύλες. Επειδή, όπως είναι φανερό, τα παραπάνω συνεπάγονται έξοδα, είναι αμφίβολο κατά πόσο είναι τελικά οικονομικά συμφέρουσα η χρησιμοποίηση καταλοίπων σε αεριοστροβίλους.

Ως εναλλακτική λύση διαφαίνεται ίσως η χρησιμοποίηση των λεγομένων **βαρέων αποσταγμάτων** (heavy distillates) που είναι υψηλότερου ιξώδους από ότι το marine diesel oil, αλλά δεν περιέχει τις ξένες προσμίξεις που συναντώνται στα ενδιάμεσα καύσιμα. Η χρησιμοποίηση των βαρέων αποσταγμάτων βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο.



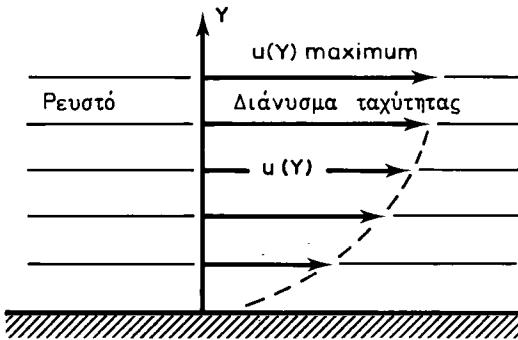
**Σχ. 7.1β.**  
Σχέση Ιξώδους και θερμοκρασίας.

## 7.2 Ιδιότητες καυσίμων.

Μέ τόν όρο «ιδιότητες καυσίμων» εννοούμε τόσο τις φυσικοχημικές ιδιότητες των ίδιων των καυσίμων όσο και τις αντίστοιχες ιδιότητες των ξένων υλών και προσμίξεων που εμπειριέχονται σ' αυτά, μέσα στα πλαίσια βέβαια των επιδράσεών τους στη λειτουργία και τη συντήρηση των αεριοστροβίλων.

### 7.2.1 Φυσικοχημικές ιδιότητες καυσίμων.

Όπως ήδη προαναφέρθηκε, η σπουδαιότερη ιδιότητα των καυσίμων για το μηχανικό είναι το ιξώδες τους, δηλαδή η αντίσταση στη ροή τους. Πρέπει από την αρχή να αντιδιασταλεί το ιξώδες από το ειδικό βάρος, γιατί δεν έχουν μεταξύ τους καμιά σχέση. Το πετρέλαιο λεβήτων π.χ. είναι ειδικά ελαφρύτερο από το νερό, ενώ είναι γνωστό ότι παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη αντίσταση ροής, εφ' όσον και τα δύο βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στο σχήμα 7.2 παρουσιάζεται η μεταβολή της ταχύτητας, κατά την έννοια του βάθους, ενός ρευστού που κινείται σε σχέση με μια ακίνητη επιφάνεια. Έτσι, ενώ η ταχύτητα είναι  $u(y) = 0$



Σχ. 7.2.  
Ορισμός του ιξώδους.

για τα μέρια του ρευστού που ευρίσκονται σε επαφή με την επιφάνεια αυτή, στην ελεύθερη επιφάνεια του είναι  $u(y) = \text{maximum}$ .

Η διατμητική δύναμη «ρ» ανά μονάδα επιφάνειας μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων του ρευστού είναι ανάλογη με τη μεταβολή της ταχύτητας κατά την έννοια του βάθους  $du(y)/dy$  και συνδέεται με αυτήν με τη σχέση:

$$\rho = \mu \frac{du(y)}{dy}$$

όπου η σταθερά της αναλογίας «μ», **εξ ορισμού** ονομάζεται ιξώδες του ρευστού. Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι το ιξώδες έχει μονάδες δυνάμεως επί χρόνο ανά επιφάνεια  $[F] \times [T] [L]^2$  ή τις ισοδύναμες, μάζα ανά χρόνο επί μήκος  $[M]/[T] [L]$ .

Η μονάδα μετρήσεως συνεπώς του ιξώδους στο σύστημα C.G.S. είναι το poise (1 γραμμάριο ανά εκατοστό-δευτερόλεπτο) και συνήθως το εκατοστό του centipoise = 0,01 poise.

Αν το ιξώδες ενός ρευστού διαιρεθεί με την αντίστοιχη πυκνότητα, τότε προκύπτει το λεγόμενο **κινηματικό ιξώδες**, μονάδα μετρήσεως του οποίου στο σύστημα C.G.S. είναι το stoke και κυρίως το εκατοστό του centistoke = 0,01 stoke.

Στις πρακτικές εφαρμογές, το ιξώδες μετράται με τα λεγόμενα **ιξαδόμετρα ροής**, δοχεία από τα οποία ορισμένη ποσότητα **υγρού** αφήνεται να εκρεύσει από οπή τυποποιημένων διαστάσεων. Επειδή ο απαιτούμενος για την εκροή χρόνος εξαρτάται μόνο από το κινηματικό ιξώδες του υγρού, το κινηματικό ιξώδες εκφράζεται απ' ευθείας σε δευτερόλεπτα.

Υπάρχουν διαφόρων ειδών ιξαδόμετρα σε χρήση, για τα καύσιμα όμως χρησιμοποιούνται κυρίως τα τύπου Saybolt ή SSU (Saybolt Seconds Universal) και τα τύπου Redwood.

Σχέσεις μετατροπής από τις παραπάνω μονάδες σε centistokes είναι οι:

$$\text{Redwood: } C_s = 0,26(R) - \frac{172}{R}$$

$$\text{SSU: } C_s = 0,22(SSU) - \frac{180}{(SSU)}$$

Το υψηλό ιξώδες των καυσίμων, εκτός του ότι δημιουργεί προβλήματα αντλήσεως, καθιστά δυσχερή και την έγχυση-διάσπασή του, ώστε να εξασφαλισθεί ικανοποιητική καύση. Έτσι, τιμή του κινηματικού ιξώδους γύρω στα 15 centistokes θεωρείται ως όριο για την επίτευξη εγχύσεως, ενώ η ακριβής βέβαια τιμή εξαρτάται και από το είδος του καυστήρα. Κατά ευτυχή σύμπτωση, το ιξώδες των καυσίμων εξαρτάται από τη θερμοκρασία τους και ελαττώνεται εύκολα, ώστε με μέτρια προθέρμανσή τους, το ιξώδες τους λαμβάνει πρακτικά αποδεκτές τιμές. Εξ άλλου δεν είναι επιθυμητή η χρησιμοποίηση καυσίμων πολύ χαμηλού ιξώδους, όταν το δίκτυο λειτουργίας είναι σχεδιασμένο για υψηλότερο ιξώδες γιατί σημειώνονται διαρροές από ενώσεις στεγανότητας και συγχρόνως δεν εξασφαλίζεται η λίπανση των τριβέων που το υψηλότερου ιξώδους καύσιμο παρέχει κατά τη διέλευσή του από τις αντλίες του δικτύου.

Άλλη σημαντική ιδιότητα των καυσίμων είναι η **θερμοκρασία αποστάξεως**. Στην πράξη, ως θερμοκρασίες αποστάξεως καθορίζονται εκείνες, όπου το 10%, το 90% και το 100% (σημείο τερματισμού) του αργού πετρελαίου έχουν εξέλθει από την αποστακτική στήλη, δηλαδή έχουν διυλισθεί. Αν και οι θερμοκρασίες αυτές δεν είναι άμεσου ενδιαφέροντος για τη μηχανή, είναι όμως ενδεικτικές των προσμίξεων που ενυπάρχουν στα αποστάγματα και συνεπώς εμμέσως καθορίζουν τις ιδιότητες των προϊόντων. Ιδιαίτερα συνδέονται με τις θερμοκρασίες αποστάξεως οι ιδιότητες καύσεως. Έτσι, χαμηλή θερμοκρασία 10% φανερώνει την ύπαρξη πτητικών προσμίξεων που καθιστούν το καύσιμο ευανάφλεκτο, ενώ υψηλή 90% ή 100% δείχνει μεγάλη περιεκτικότητα σε βραδέως καιόμενα συστατικά τα οποία χρειάζονται καυστήρες ειδικής σχεδιασμού για να μη δημιουργηθούν, εξ αιτίας τους, ανεπιθύμητα φαινόμενα όπως έξοδος φλόγας από το θάλαμο, υψηλές τοπικές θερμοκρασίες κλπ.

Το **σημείο αναφλέξεως** (flash point) είναι μία άλλη ιδιότητα που χρησιμοποιείται ως κριτήριο ασφαλείας, γιατί είναι η θερμοκρασία εκείνη, όπου το καύσιμο αναφλέγεται στιγμιαία, αλλά δεν συνεχίζει την καύση του όταν απομακρυνθεί η πηγή τής φλόγας. Για λόγους αποφυγής αναφλέξεως από τυχαίους σπινθήρες καθορίζεται μιά ελάχιστη θερμοκρασία πού πρέπει να έχει το υπ'όψη καύσιμο, η οποία π.χ. για το καύσιμο naph diesel oil είναι 140°F.

Οι **σημείο ροής** (pour point) ενός καυσίμου καθορίζεται η θερμοκρασία εκείνη όπου μόλις αρχίζει η ροή του και συνεπώς σχετίζεται με τη δυνατότητα αντλήσεως και μεταφοράς του υπό ψυχρές κλιματολογικές συνθήκες. Είναι φανερό ότι σχετίζεται άμεσα με το ιξώδες.

Το **σημείο νεφώσεως** (cloud point) είναι επίσης μιά ιδιότητα των καυσίμων που σχετίζεται με τη συμπεριφορά τους σε χαμηλές θερμοκρασίες, γιατί είναι η θερμοκρασία εκείνη στην οποία στερεοποιούνται (πήζουν) οι προσμίξεις των κηρωδών υδρογονανθράκων που υπάρχουν στο καύσιμο. Συνέπεια αυτού είναι η έμφραξη φίλτρων, καυστήρων, η δημιουργία βλαβών σε αντλίες κλπ., ανεπιθύμητες επιπτώσεις που συνήθως αντιμετωπίζονται με θέρμανση.

Το **παραμένον εξανθράκωμα** (carbon residue) επί τοις εκατό είναι η ιδιότητα του καυσίμου που σχετίζεται με τη δημιουργία εξανθρακωμάτων κατά την καύση. Συνήθως, για τα καύσιμα των αεριοστροβίλων έχει πολύ χαμηλές τιμές.

Τέλος, τα χρησιμοποιούμενα καύσιμα στους αεριοστροβίλους πρέπει να έχουν υψηλή αντοχή σε μεγάλες θερμοκρασίες, ώστε να αποφεύγεται η διάσπασή τους όταν εγχέονται στις περιοχές υψηλών θερμοκρασιών που συνήθως επικρατούν στους θαλάμους καύσεως.

### 7.2.2 Ιδιότητες των προσμίξεων των καυσίμων.

Λέγοντας προσμίξεις των καυσίμων εννοούμε τόσο τα στοιχεία ή τις χημικές ενώσεις που ενυπάρχουν σε μικρές ποσότητες στο αργό πετρέλαιο, όσο και τα εκ των υστέρων εισερχόμενα στο καύσιμο, κατά τη μεταφορά και αποθήκευσή του, όπως το νερό ή οι σκουριές.

Στην πρώτη κατηγορία, σ' αυτά δηλαδή που ενυπάρχουν ήδη στο αργό πετρέλαιο, περιλαμβάνονται άνω των δέκα (10) στοιχείων. Από αυτά, ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη χρήση του καυσίμου στους αεριοστροβίλους παρουσιάζουν μόνο το θείο (θειάφι) και το βανάδιο. Τα υπόλοιπα στοιχεία, κυρίως μεταλλικά, όπως ασβέστιο, νάτριο, μόλυβδος, χαλκός κλπ. παρουσιάζουν ενδιαφέρον μόνο εφ' όσον υπάρχουν σε μεγάλες σχετικά ποσότητες. Το θείο είναι το τρίτο κατά σειρά ποσότητας στοιχείο που υπάρχει στο αργό πετρέλαιο, μετά τον άνθρακα και το υδρογόνο. Βέβαια, η μεγαλύτερη ποσότητά του παραμένει στα κατάλοιπα της αποστακτικής στήλης, αλλά μικρές ποσότητες περιέχονται και στα αποστάγματα. Έχει διαπιστωθεί ότι σε εγκαταστάσεις ατμοστροβίλων και μηχανών Diesel, το θείο έχει καταστρεπτικές ιδιότητες, κυρίως όπου υπάρχουν συσκευές ανακτήσεως ή εναλλαγής θερμότητας, όπως οικονομητήρες, λέβητες καυσαερίων κλπ. Αυτό συμβαίνει γιατί μία ποσότητα καυσαερίων συμπυκνώνεται και, εφ' όσον αυτή προέρχεται από καύσιμο υψηλής περιεκτικότητας σε θείο, το συμπύκνωμα είναι θειικό οξύ ( $H_2SO_4$ ), το οποίο διαβρώνει γρήγορα και σε μεγάλο βαθμό τις μεταλλικές επιφάνειες με τις οποίες έρχεται σε επαφή. Τα ίδια ακριβώς φαινόμενα συμβαίνουν με τις αντίστοιχες συσκευές των αεριοστροβίλων και ο μόνος τρόπος αποφυγής των δυσμενών συνεπειών είναι να διατηρούνται οι θερμοκρασίες λειτουργίας πάνω από το σημείο συμπυκνώσεως, δηλαδή πάνω από 250°F.

Το θείο είναι επίσης η κυριότερη αιτία μιας «εν θερμώ διαβρώσεως» (σε υψηλές δηλαδή θερμοκρασίες) που ονομάζεται **θειίκωση**. Επειδή είναι πρακτικά αδύνατη και οικονομικά ασύμφορη η πλήρης αφαίρεση του θείου από το πετρέλαιο\*, για να αντιμετωπισθεί το φαινόμενο της θειικώσεως στους αεριοστροβίλους, τα εκτεθειμένα σε προσβολή τμήματα της κατασκευής είτε επενδύονται με κατάλληλα υλικά είτε κατασκευάζονται από υλικά που αντιμετωπίζουν ικανοποιητικά τη διάβρωση. Συγχρόνως, οι κατασκευαστές των διαφόρων αεριοστροβίλων προδιαγράφουν τη μέγιστη επιτρεπόμενη περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο που μπορεί να χρησιμοποιείται ασφαλώς και συνήθως η περιεκτικότητα αυτή είναι κάτω του 0,5%.

Εκτός του θείου, σοβαρά προβλήματα δημιουργεί και η ύπαρξη στο καύσιμο του βαναδίου, γιατί σχηματίζει κατά τη διαδικασία της καύσεως την εντελώς ανεπιθύμητη ένωση με το νάτριο και το οξυγόνο. Η χημική αυτή ένωση παραμένει σε υγρή μορφή στις θερμοκρασίες που επικρατούν κατά τη λειτουργία του αεριοστροβίλου, οπότε επικάθονται κυρίως επάνω στα πτερύγια του στροβίλου με σοβαρές διαβρωτικές επιπτώσεις.

Οι προδιαγραφές λοιπόν των καυσίμων καθορίζουν τη μέγιστη επιτρεπόμενη ποσότητα σε περιεκτικότητα βαναδίου, παρόλο ότι δίστανται οι απόψεις επάνω στο ζήτημα αυτό. Έτσι, οι μεν κατασκευαστές συνιστούν πάρα πολύ μικρή περιε-

\* Όλα τα πετρέλαια προδιαγράφονται με ένα μέγιστο όριο περιεκτικότητας σε θείο. Έτσι π.χ. το navy diesel oil περιέχει θείο μέχρι 1%.

κτικότητα σε βανάδιο, που να μην υπερβαίνει τα 0,2 ppm (μέρη ανά εκατομμύριο), ενώ οι χειριστές των μηχανών φθάνουν μέχρι 0,5 ppm. Στην τελευταία βέβαια αυτή περίπτωση, χρησιμοποιούν χημικά πρόσθετα, κυρίως με βάση το μαγνήσιο, τα οποία αντιδρούν με το βανάδιο και εξουδετερώνουν πολύ τη δράση του.

Άλλη ξένη πρόσμιξη που υπάρχει στο καύσιμο είναι το νερό, το οποίο, αν και σε μικρές ποσότητες δεν είναι αυτό το ίδιο επιβλαβές, όμως όταν προέρχεται από τη θάλασσα, περιέχει ξένες ύλες, όπως νάτριο, κάλιο και ασβέστιο πού δρούν διαβρωτικά. Εκτός αυτού, το νερό ευνοεί την καλλιέργεια μικροοργανισμών, οι οποίοι, αναπτυσσόμενοι μέσα στα δίκτυα πετρελαίου, τα φράσσουν, εμποδίζουν τη ροή και ελαττώνουν συγχρόνως την αποτελεσματικότητα των φίλτρων να συγκρατήσουν ξένες ύλες. Το πρόβλημα αυτό παρουσιάζεται έντονο, κυρίως όταν το πετρέλαιο έχει παραμείνει αποθηκευμένο και αδιακίνητο για αρκετό χρονικό διάστημα, αντιμετωπίζονται δε συνήθως με χημικά πρόσθετα, τα οποία εξουδετερώνουν τη βιολογική, όπως λέγεται, ρύπανση.

Ανάλογο φαινόμενο με αντίστοιχες επιπτώσεις και παρόμοια αντιμετώπιση είναι το οφειλόμενο στις στερεές ουσίες, όπως σκουριές, μεταλλικά οξείδια από τις δεξαμενές, τις σωληνώσεις κλπ.

### 7.3 Προδιαγραφές καυσίμων.

Ο καθορισμός της κατηγορίας, στην οποία ανήκει κάθε καύσιμο, εξαρτάται από τις προδιαγραφές τις οποίες αυτό ικανοποιεί. Λέγοντας προδιαγραφές εννοούμε ένα αριθμό ορίων (άνω ή κάτω) μέσα στα οποία μεταβάλλεται κάθε σημαντική ιδιότητα του εξεταζόμενου καυσίμου.

Το αρέσως επόμενο ερώτημα που ανακύπτει είναι ποιός και πως καθορίζει τις προδιαγραφές για τα καύσιμα και συγκεκριμένα για τα χρησιμοποιούμενα στούς αεριοστροβίλους. Η απάντηση είναι ότι οποιοσδήποτε μπορεί να καθορίσει προδιαγραφές, αλλά ιδιαίτερη σημασία έχουν δυό παράγοντες:

α) Πώς, δηλαδή με βάση ποια κριτήρια γίνονται οι προδιαγραφές.

β) Κατά πόσο οι προδιαγραφές γίνονται αποδεκτές από όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη, δηλαδή κατασκευαστές μηχανών, χειριστές, βιομηχανίες καυσίμων κλπ.

Με βάση τα παραπάνω, έχουν επικρατήσει διεθνώς δύο οργανισμοί, των οπίων οι προδιαγραφές καυσίμων θεωρούνται ως οδηγίες - κατευθύνσεις για όλους τους ενδιαφερόμενους. Είναι η Αμερικανική Ένωση Ελέγχου και Υλικών (ASTM) και το Αμερικανικό Ναυτικό (USN).

Οι προδιαγραφές καυσίμων αεριοστροβίλων της ASTM περιλαμβάνουν τέσσερα είδη καυσίμων, χαρακτηριζόμενα ως 1 - GT, 2 - GT, 3 - GT και 4 - GT, τα οποία αναπτύσσονται πλήρως στον πίνακα 7.3.1 ενώ στον πίνακα 7.3.2 περιλαμβάνονται οι προδιαγραφές του ίδιου οργανισμού για τα καύσιμα μηχανών Diesel, δηλαδή τα 1 - D, 2 - D και 3 - D.

Από τους πίνακες αυτούς προκύπτουν τα εξής ενδιαφέροντα σημεία:

α) Τα καύσιμα για μηχανές Diesel και αεριοστροβίλους υπ' αριθμ. 1 και 2 (δηλαδή 1 - GT/1 - D και 2 - GT/ 2 - D) είναι ακριβώς τα ίδια, με τη μόνη διαφορά ότι προκειμένου για καύσιμα αεριοστροβίλων καθορίζεται και ένα δριο περιεκτικότητας σε βανάδιο.

β) Τα καύσιμα των προδιαγραφών GT - 3 και GT - 4 είναι τα ίδια, με μόνη διαφορά υψηλότερο δριο περιεκτικότητας σε βανάδιο για το δεύτερο.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.3.1.**  
**Προδιαγραφές καυσίμων αεριοστροβίλων ASTM D2880-71.**

|           |   | Σημείο<br>εναύσεως<br>°F (°C)<br>MIN | Σημείο<br>ροής<br>°F (°C)<br>MAX | Ποσοστό κατά<br>όγκο, ύδατος<br>και κατακα-<br>θίσεων<br>MAX | Υπόλειμμα άν-<br>θρακα επί<br>10% ποσοστό<br>MAX |
|-----------|---|--------------------------------------|----------------------------------|--|--|
| No 1 - GT | Πτητικό απόσταγμα για αεριο-<br>στροβίλους που απαιτούν καύ-<br>σιμο με πιο καθαρή καύση αυ-<br>τής του No 2 - GT                             | 100<br>(38)                          | 0<br>(-18)                       | 0,05   | 0,15   |
| No 2 - GT | Απόσταγμα καυσίμου χαμη-<br>λής περιεκτικότητας σε τέφρα<br>μέσης πτητικότητας κατάλληλο<br>για αεριοστροβίλους που<br>δεν απαιτούν No 1 - GT | 100<br>(38)                          | 20<br>(-7)                       | 0,05   | 0,35   |
| No 3 - GT | Καύσιμο χαμηλής πτητικότητας,<br>χαμηλής περιεκτικότητας<br>σε τέφρα, που μπορεί να πε-<br>ριέχει υπολείμματα                                 | 130<br>(5A)                          | —                                | 1,0  | —  |
| No 4 - GT | Καύσιμο χαμηλής πτητικότη-<br>τας, που περιέχει υπολείμματα<br>και έχει υψηλή περιεκτι-<br>κότητα σε βανάδιο από όση το<br>No 3 - GT          | 150<br>(66)                          | —                                | 1,0  | —  |

|           |   | Βαρύτητα<br>βαθμοί API<br>MIN | Βανάδιο<br>μέρη ανά<br>εκατομ.<br>κατά βάρος<br>MAX | Νάτριο συν κάλιο<br>(Na + K) μέρη<br>ανά εκατομ.<br>κατά βάρος<br>MAX |
|-----------|---|-------------------------------|---|---|
| No 1 - GT | Πτητικό απόσταγμα για αεριο-<br>στροβίλους που απαιτούν καύ-<br>σιμο με πιο καθαρή καύση αυ-<br>τής του No 2 - GT                             | 35                            | 2   | 5   |
| No 2 - GT | Απόσταγμα καυσίμου χαμη-<br>λής περιεκτικότητας σε τέφρα<br>μέσης πτητικότητας κατάλληλο<br>για αεριοστροβίλους που<br>δεν απαιτούν No 1 - GT | 30                            | 2   | 5   |
| No 3 - GT | Καύσιμο χαμηλής πτητικότητας,<br>χαμηλής περιεκτικότητας<br>σε τέφρα, που μπορεί να πε-<br>ριέχει υπολείμματα                                 | —                             | 2   | 5   |
| No 4 - GT | Καύσιμο χαμηλής πτητικότη-<br>τας, που περιέχει υπολείμματα<br>και έχει υψηλή περιεκτι-<br>κότητα σε βανάδιο από όση το<br>No 3 - GT          | —                             | 500   | 10  |

| Ποσοστό<br>τέφρας<br>κατά βάρος<br>MAX | Θερμοκρασίες αποστάξεως |              | Ιξώδες Saybolt               |                         |     | Κινηματικό      |     | Ιξώδες, cSt<br>σε 122°F (50°C) |
|--|-------------------------|--------------|------------------------------|-------------------------|-----|-----------------|-----|--------------------------------|
|  | °F<br>(°C)              | Σημείο 90%   | Universal σε 100°F<br>(38°C) | Furd σε<br>122°F (50°C) | MAX | σε 100°F (38°C) |     |                                |
|  | MIN                     | MAX          | MIN                          | MAX                     | MAX | MIN             | MAX |                                |
| 0,01                                   | —                       | 550<br>(288) | —                            | (34,4)                  | —   | 1,4             | 2,5 | —                              |
| 0,01                                   | 540<br>(282)            | 640<br>(338) | (32,6)                       | (40,2)                  | —   | 2,0             | 4,3 | —                              |
| 0,03                                   | —                       | —            | 45                           | —                       | 300 | (5,8)           | —   | (638)                          |
| —                                      | —                       | —            | 45                           | —                       | 300 | (5,8)           | —   | (638)                          |

| Ασβέστιο<br>μέρη ανά εκατ.<br>κατά βάρος | Μόλυβδος (Pb)<br>μέρη ανά εκατ.<br>κατά βάρος | Λόγος Μαγνησίου<br>προς Βανάδιο<br>(Mg/V) | Ποσοστό<br>βάρους<br>θείου |
|--|---|---|----------------------------|
| MAX                                      | MAX   | MIN MAX                                   | MAX                        |
| 5  | 5   | — —                                       | 0,5                        |
| 10                                       | 5   | — —                                       | 0,5                        |
| 10                                       | 5   | — —                                       |                            |
| 10                                       | 5   | 3,0 3,5                                   |                            |

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.3.2.**  
**Προδιαγραφές καυσίμου Diesel ASTM D975-68.**

| Είδος Καυσίμου  | Σημείο εναύσεως βαθμοί F (°C) MIN | Σημείο ροής °F (°C) MAX   | Ποσοστό κατά δύκο νερού και κατακαθίσεων MAX | Υπόλειμμα άνθρακα επί 10% ποσοστό MAX |
|---|-----------------------------------|---|--|---------------------------------------|
| No 1 - D Πτητικό καύσιμο από απόσταξη για μηχανές, υφιστάμενες συχνές αλλαγές ταχύτητας και φορτίου | 100<br>(37,8)                     | Για λειτουργία σε ψυχρές καιρικές συνθήκες το σημείο ροής πρέπει να ορίζεται 10°F(5,6°C) κάτω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στην οποία θα λειτουργήσει η μηχανή εκτός αν υπάρχει σύστημα θερμάνσεως του καυσίμου | Ίχνη   | 0,15                                  |
| No 2 - D Καύσιμο από απόσταξη χαμηλότερης πτητικότητας για μηχανές βιομηχανικές και βαριών οχημάτων | 125<br>(51,7)                     |   | 0,05   | 0,35                                  |
| No 4 - D Καύσιμο για μηχανές αργόστροφες και μεσόστροφες  | 130<br>(54,4)                     |   | 0,5  |                                       |

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.3.3.**  
**Διάφορες ιδιότητες από προδιαγραφές καυσίμων ναυτικού.**

| ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ                                 | Aviation JP-5<br>MIL - T - 5624 G | NAVY DIESEL<br>MIL - F - 16884 | NAVY DISTILLATE<br>MIL - F - 24397 |
|---|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Ιξώδες, CS<br>Διάλιση, °F, MAX            | 16,5 MAX σε -30F                  | 2,1 ÷ 6,0 σε 100°F             | 10,0 MAX σε 100°F                  |
| 10%                                       | 400                               | —                              | 500                                |
| 50%                                       | —                                 | —                              | 644                                |
| 90%                                       | —                                 | 675                            | 740                                |
| 95%                                       | —                                 | —                              | 765                                |
| Τελικό σημείο                             | 550                               | 725                            | —                                  |
| Σημείο εναύσεως, MIN, °F                  | 140                               | 140                            | 150                                |
| Σημείο ροής, °F, MAX                      | 0                                 | —                              | 25                                 |
| Υπόλειμμα άνθρακα, MAX, %                 | —                                 | 0,2                            | 0,4                                |
| Τέφρα, MAX, %                             | —                                 | 0,0005                         | 0,01                               |
| Θείο, MAX, % κατά βάρος                   | 0,4                               | 1,00                           | 1,30                               |
| Βανάδιο, MAX, μέρη ανά εκατομ. κατά βάρος | —                                 | —                              | 0,5                                |

γ) Οι υπ' αριθμ. 1 και 2 κατηγορίες είναι καύσιμα μεσαίων αποσταγμάτων, ενώ οι αριθμ. 3 και 4 ενδιάμεσα καύσιμα.

δ) Τέλος, το πιο σημαντικό και άξιο εμφάσεως σημείο είναι ότι ένα καύσιμο είναι δυνατό να ικανοποιεί περισσότερες από μια προδιαγραφές, είτε λόγω συμπτώσεώς τους είτε λόγω επικαλύψεως, όπως π.χ. ένα καύσιμο μπορεί να θεωρηθεί είτε ως 2 - D είτε ως 2 - GT καί συγχρόνως να πωληθεί ως navy diesel oil, επειδή οι αντίστοιχες προδιαγραφές του USN δεν αλληλοαποκλείουν τις προδιαγραφές της ASTM. Αυτό όμως δεν σημαίνει πως **δύλα** τα καύσιμα που ικανοποιούν την προδιαγραφή ASTM 2 ικανοποιούν συγχρόνως και την αντίστοιχη προδιαγραφή του USN, γιατί ορισμένα από τα δύλα των παραπάνω προδιαγραφών είναι διαφορετικά.

Οι προδιαγραφές του USN ονομάζονται Milspcs και στον πίνακα 7.3.3 παρουσιάζονται.

σιάζονται οι βασικές ιδιότητες των καυσίμων για αεριοστροβίλους με βάση τις προδιαγραφές αυτές.

| Ποσοστό τέφρας κατά βάρος | Θερμοκρασίες αποστάξεως °F (°C), Σημείο 90% |             | Ιξύδες σε 100°F (37,8°C) Κινηματικό, cSt (Seybolt Universal, sec) |            | Ποσοστό θείου κατά βάρος | Διάθρωση χαλκού | Αριθμός κετανίου |
|---------------------------|---|-------------|---|------------|--------------------------|-----------------|------------------|
|                           | MAX   | MIN         | MAX   | MIN        |                          |                 |                  |
| 0,01                      | —   | 550 (287,8) | 1,4   | 2,5 (34,4) | 0,50                     | No 3            | 40               |
| 0,01                      | 540 (282,2)                                 | 640 (338)   | 2,0 (32,6)  | 4,3 (40,1) | 0,50                     | No 3            | 40               |
| 0,10                      | —   | —           | 5,8 (45)  | 26,4 (125) | 2,0                      | —               | 30               |

Όπως προαναφέρθηκε, και ορισμένοι από τους κατασκευαστές μηχανών προδιαγράφουν τις απαιτήσεις που έχουν από τα καύσιμα, ώστε να εξασφαλίζεται ασφαλής και οικονομική λειτουργία των μηχανών τους. Συνήθως οι κατασκευαστές των μηχανών καθορίζουν τις προδιαγραφές οργανισμών που αποδέχονται, συμπληρούμενες από επιπλέον ειδικές απαιτήσεις.

Ένα παράδειγμα που αφορά τον αεριοστρόβιλο LM 2500 της General Electric είναι ο πίνακας 7.3.4. Όπως φαίνεται στον πίνακα αυτό, η περιεκτικότητα σε βανάδιο είναι η ίδια που προβλέπεται για το καύσιμο navy distillate, αλλά πιο αυστηρή από την προδιαγραφή των καυσίμων ASTM ή του navy diesel, επειδή η προδιαγραφή MIL - F - 16884 δεν μνημονεύει καθόλου το βανάδιο. Συνεπώς τα καύσιμα που ικανοποιούν τις προδιαγραφές ASTM ή navy diesel *μπορεί* να είναι αποδεκτά εφ' όσον ικανοποιούν την επί πλέον απαίτηση.

#### ΠΙΝΑΚΑΣ 7.3.4.

##### Προδιαγραφές καυσίμων για τον αεριοστρόβιλο LM 2500 της General Electric.

1) Καύσιμα που ικανοποιούν τις παρακάτω προδιαγραφές γίνονται αποδεκτά για χρήση στους αεριοστροβίλους LM 2500 υπό την προϋπόθεση της ικανοποίησεως συγχρόνως και των επιπλέον κριτήριων της περιπτώσεως 2 του πίνακα αυτού.

| Αριθμός προδιαγραφής   | Ονομασία  |
|--|---|
| ML - I - 5624<br>ASTM D.975-68<br>ASTM D.1655-69<br>MIL - F - 24397<br>MIL - F 16884<br>VV - F - 800A<br>ASTM D2880 - 71 | JP4 και JP5<br>Diesel fuel oil 1 - D και 2 - D<br>Καύσιμα στροβίλων<br>Navy distillate<br>Marine diesel<br>Diesel, DF - A, DF - 1, DF - 2<br>Καύσιμα αεριοστροβίλων<br>1 - GT, 2 - GT, 3 - GT |

2) Επί πλέον κριτήρια:

- α) Το καύσιμο θα αποτελείται από αμιγείς ενώσεις υδρογονανθράκων.
- β) Η χρησιμοποίηση προσθέτων θα γίνεται μόνο κατόπιν αδείας του κατασκευαστή.

γ) Το ιξώδες του καυσίμου, ακριβώς πριν από την είσοδό του στον αεριοστρόβιλο, θα είναι 60 Centistokes ή λιγότερο για την εκκίνηση και μέχρι 12c st κατά τη λειτουργία.

δ) Το καύσιμο στην είσοδο του αεριοστροβίλου και σε θερμοκρασία 70° δεν πρέπει να περιέχει περισσότερο από 40 ppm νερού.

ε) Το καύσιμο στην είσοδο του αεριοστροβίλου δεν πρέπει να περιέχει πάνω από 10 g στερεών ουσιών ανά 1000 γαλλόνια καυσίμου.

στ) Τα παρακάτω όρια περιεκτικότητας ξένων ουσιών πρέπει να ικανοποιούνται.

|                               | ΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΜΕ ΕΠΕΝΔΥΜΕΝΑ ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΚΑΙ ΟΧΕΤΟΥΣ | ΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΧΩΡΙΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗ |
|-------------------------------|--|--------------------------|
| Τέφρα επί % maximum           | 0,01 (100 ppm)                               | 0,01 (100 ppm)           |
| Θείο επί % maximum            | 1,3  | 1,3                      |
| Βανάδιο ppm maximum           | 0,5  | 0,5                      |
| Νάτριο+κάλιο+μόλυβδος ppm max | 2,0  | 1,0                      |
| Ασβέστιο ppm max              | 2,0  | 1,0                      |
| Υδρογόνο επί % minimum        | 12,0   | 12,3                     |

#### 7.4 Συστήματα καυσίμου.

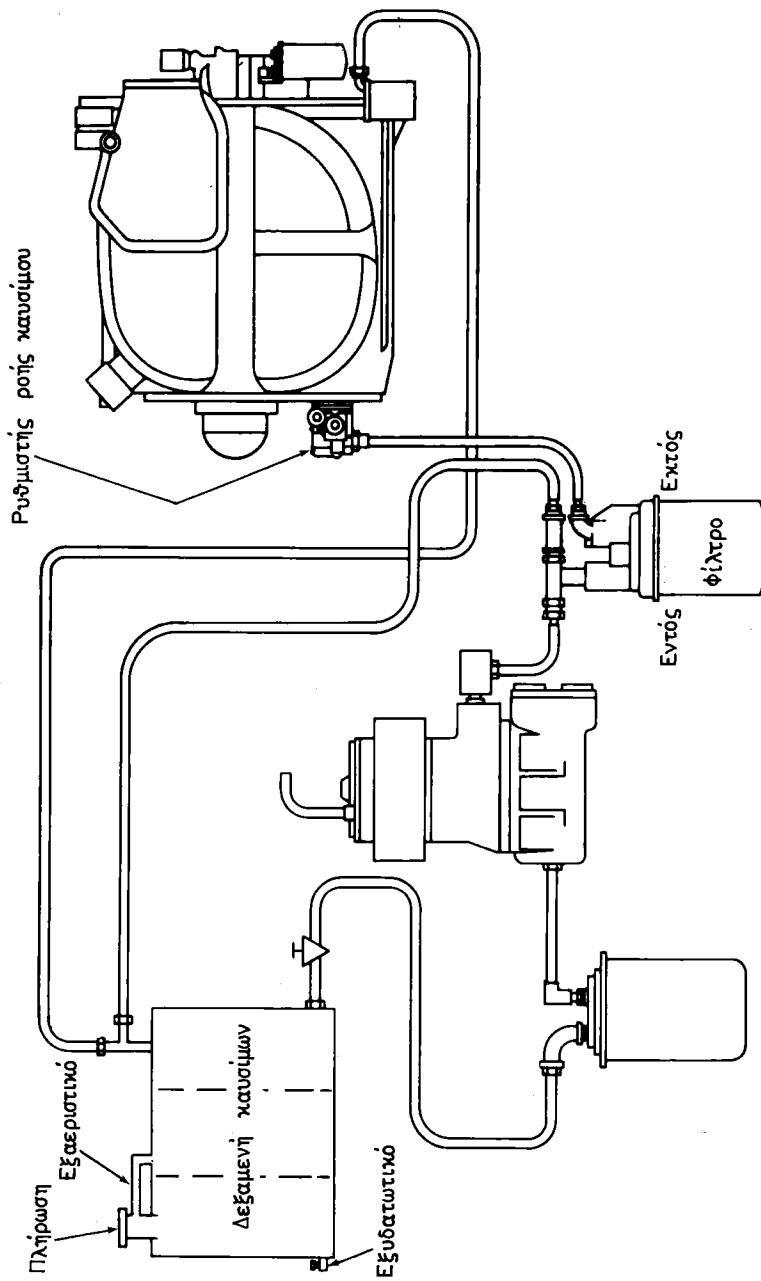
Λέγοντας «συστήματα» εννοούμε το σύνολο συσκευών, δεξαμενών, μηχανημάτων, δικτύων και εξαρτημάτων που έχουν σχεδιασθεί και κατασκευασθεί έτσι, ώστε να προσδίνουν στη μηχανή την απαιτούμενη ποσότητα καυσίμου σε κανονική πίεση και στο βαθμό καθαριότητας που χρειάζεται.

Τα παραπάνω αποτελούν απαίτηση για όλα τά είδη μηχανών με μεγαλύτερη έμφαση στην καθαριότητα, προκειμένου για αεριοστροβίλους, όπως τουλάχιστον έχει καταδείξει η εμπειρία που έχει αποκτηθεί από τις πρώτες κιόλας εφαρμογές των μηχανών του τύπου αυτού σε ναυτικές εγκαταστάσεις προώσεως.

Ο βαθμός καθαριότητας εξαρτάται πρώτα - πρώτα από τον τύπο του ίδιου του καυσίμου. Έτσι ένα καύσιμο εγγενώς ρυπαρό, όπως είναι τα κατάλοιπα, χρειάζεται ειδική διαδικασία για να φθάσει σε κάποιο ανεκτό επίπεδο καθαριότητας, όπου ένα καύσιμο αποστάζεως θα φθάσει με τη βοήθεια απλών φίλτρων.

Από την άλλη μεριά, η πολυπλοκότητα των συστημάτων καυσίμου εξαρτάται από το μέγεθος και τη χρήση του πλοίου. Σε ένα μικρό σκάφος αναψυχής, μία μόνη δεξαμενή είναι αρκετή για την απαίτηση παροχής. Η μικρή αυτή δεξαμενή αποτελεί ανεξάρτητη κατασκευή του ανθεκτικού τμήματος του πλοίου, δεν έχει εσωτερικές ενισχύσεις και δεν έρχεται σε επαφή με το ψυχρό θαλασσινό νερό (που θα ερχόταν, αν αποτελούσε τμήμα της κατασκευής του πλοίου, π.χ. αν ήταν στα διπύθμενα). Αποτέλεσμα όλων των προηγουμένων είναι ότι η απλή αυτή δεξαμενή μπορεί εύκολα να καθαρισθεί, δεν έχει θύλακες συγκεντρώσεως καταλοίπων και δεν διατρέχει κίνδυνο συμπυκνώσεως του περιεχομένου της αφού δεν έρχεται σε επαφή με τη θάλασσα. Επί πλέον δε γεμίζεται απ' ευθείας από κάποια αντλία και όχι μέσω πετρελαιοφόρου ή φορτηγίδας.

Στο σχήμα 7.4α φαίνεται ένα τέτοιο σύστημα καυσίμου, αποτελούμενο βασικά από μια απλή δεξαμενή, μια βοηθητική αντλία και φίλτρα. Αντίθετα, το σύστημα καυσίμου ενός πλοίου είναι πολυπλοκότερο, γιατί, επί πλέον, το καύσιμο υπόκειται σε μόλυνση, τόσο κατά την παράδοση όσο και κατά την αποθήκευσή του στο πλοίο, για τους ακριβώς αντίθετους λόγους που αναφέρθηκαν για την περίπτωση



**Σχ. 7.4α.**  
Σύστημα καυσίμου εγκαταστάσεως αεριστροβίλου.

του σκάφους αναψυχής. Ειδικότερα:

α) Οι δεξαμενές δεν μπορούν να καθαρισθούν εύκολα και λόγω μεγέθους και λόγω θέσεως και λόγω πληθώρας εσωτερικών ενισχύσεων.

β) Το καύσιμο υπόκειται σε συμπύκνωση λόγω της γειτνιάσεως του με τη θάλασσα.

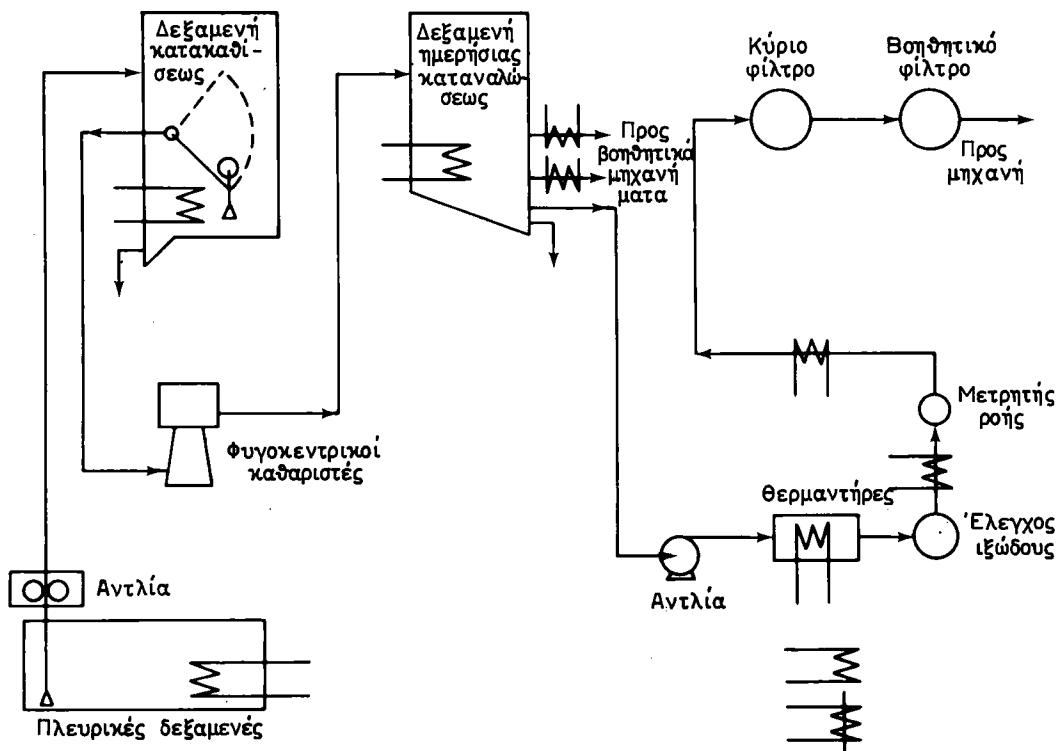
γ) Το γέμισμα των δεξαμενών γίνεται συνήθως μέσω κάποιας φορτηγίδας, πράγμα που προσθέτει έτσι ένα άλλο βήμα πιθανής ρυπάνσεως.

Βασική αρχή είναι ότι από το σύστημα καυσίμου απαιτείται να αντιμετωπισθεί η προσθήκη νερού και καταλοίπων που έγινε στο καύσιμο.

Στα σχήματα 7.4β και 7.4γ παρουσιάζονται χαρακτηριστικά διαγράμματα δύο συστημάτων καυσίμου από πλοία κινούμενα με αεριοστροβίλους. Και τα δύο συστήματα είναι κατασκευασμένα για μεσαία έως βαρέα αποστάγματα καυσίμου και όχι για κατάλοιπα και επομένως μπορούν να αφαιρέσουν μόνο τα στοιχεία εκείνα που υπεισήλθαν κατά τη διακίνηση και την αποθήκευση του καυσίμου.

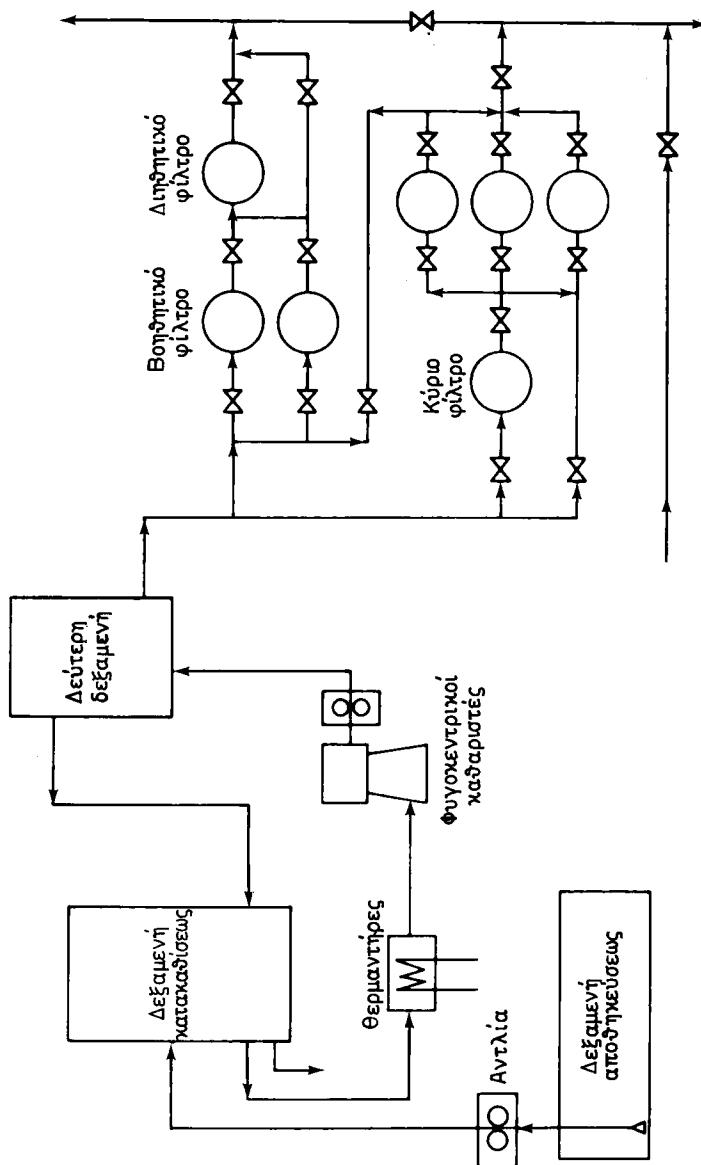
Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι:

α) Το καύσιμο, πριν φθάσει στη μηχανή από τις διάφορες δεξαμενές αποθηκεύσεως\*, διέρχεται από τη λεγόμενη **δεξαμενή κατακαθίσεως** (settling tank), όπου με τη βαρύτητα αποχωρίζεται από αυτό το νερό και τα στερεά κατάλοιπα.



**Σχ. 7.4β.**  
Σύστημα καυσίμου εγκαταστάσεως αεριοστροβίλου.

\* Για λόγους απλοποίησεως των διαγραμμάτων εμφανίζεται μόνο μια δεξαμενή αποθηκεύσεως.



Σχ. 7.4γ.  
Σύστημα καυσίμου εγκαταστάσεως αεροστροβίλου.

β) Στη συνέχεια το καύσιμο φυγοκεντρίζεται για να επιτευχθεί πληρέστερος καθαρισμός του.

γ) Προβλέπεται να εκτελείται προθέρμανση, η οποία διευκολύνει την άντληση των καυσίμων μεγάλου ιξώδους και τη διαδικασία αποχωρισμού του από τις ξένες ύλες.

δ) Προβλέπεται η ύπαρξη μιας δεξαμενής ημερήσιας καταναλώσεως (day tank) που περιέχει το καύσιμο που καθαρίστηκε έτοιμο να προσδοθεί στη μηχανή. Τόσο η δεξαμενή όσο και οι σωληνώσεις του καυσίμου από αυτή μέχρι τη μηχανή είναι από ανοξείδωτο χάλυβα.

ε) Υπάρχουν δύο στάδια φίλτρων μεταξύ της δεξαμενής ημερήσιας καταναλώσεως και της μηχανής.

Στην περίπτωση του σχήματος 7.4γ υπάρχει ένα διπλό φίλτρο, αποτελούμενο από δύο σε σειρά στοιχεία (coalescer). Το πρώτο από τα στοιχεία αυτά αποτελείται από ίνες γιαλιού (ή παρεμφερές υλικό), στις οποίες συγκρατείται το μεγαλύτερο ποσοστό του νερού υπό μορφή σταγόνων συγκεντρωμένων στον πυθμένα του φίλτρου. Το δεύτερο στοιχείο συμπληρώνει το έργο του πρώτου με την απορρόφηση της υγρασίας που διέφυγε στην υπό μορφή στυποχάρτου γόμωσή του. Έτσι το καύσιμο απαλλάσσεται πρακτικά πλήρως από το νερό που περιέχει.

Υπάρχει αρκετός αριθμός φίλτρων ή συστημάτων απαλλαγής του καυσίμου από τις ξένες ύλες και σε τέτοια αλληλουχία, ώστε να εξασφαλίζεται η λειτουργία κάθε στοιχείου από τα αμέσως προηγούμενά του. Η φυγοκέντριση π.χ. είναι μια διαδικασία υψηλής αποδόσεως που δεν διατρέχει κίνδυνο εμφράξεως, αλλά δεν μπορεί να αφαιρέσει το περιεχόμενο νερό όπως τα φίλτρα γομώσεως.

Συμπερασματικά, η αφαίρεση των ξένων υλών και του νερού γίνεται με διαδοχικές προσεγγίσεις, μέχρις ότου επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

#### **7.4.1 Υλικά δεξαμενών και δικτύων καυσίμων.**

Ένα χαρακτηριστικό σύστημα καυσίμου αποτελείται από δύο ξεχωριστά μεταξύ τους τμήματα, δηλαδή από τις δεξαμενές, δίκτυα και εξαρτήματά τους πριν από τη δεξαμενή ημερήσιας καταναλώσεως και από τα αντίστοιχα που ακολουθούν μετά από τη δεξαμενή, σε σχέση πάντοτε με τη φορά ροής του καυσίμου από το σημείο παραλαβής του επάνω στο πλοίο μέχρι και τη μηχανή.

Η διάκριση μεταξύ των δύο τμημάτων αφορά το υλικό κατασκευής τους, γιατί το πριν από τη δεξαμενή κατασκευαζόταν συνήθως από κοινό χάλυβα και το μετά από αυτήν από ανοξείδωτο. Η διαφοροποίηση αυτή γινόταν για να αποφευχθεί η δημιουργία οξειδώσεως (σκουριάς) και επικαθίσεων, που αναπόφευκτα πια\* θα οδεύσουν μέσω του καυσίμου προς τη μηχανή.

Η λύση της από την αρχή κατασκευής ολόκληρου του δικτύου από ανοξείδωτο χάλυβα είναι, για συνήθη μεγέθη πλοίων, οικονομικά ασύμφορη λόγω της σημαντικής διαφοράς τιμών μεταξύ κοινού και ανοξείδωτου χάλυβα.

Έχουν βέβαια κατά καιρούς προταθεί και δοκιμασθεί και άλλες εναλλακτικές λύσεις αντί της χρησιμοποιήσεως του ανοξείδωτου χάλυβα, όπως:

\* Επειδή η δεξαμενή κατακαθίσεως, όπου οι σκουριές και οι επικαθίσεις αποχωρίζονται λόγω βαρύτητας, προηγείται της δεξαμενής ημερήσιας καταναλώσεως.

α) Επικάλυψη των εσωτερικών επιφανειών των δεξαμενών καυσίμου, κυρίως με εποξειδικές ρητίνες ή και χρώματα, ειδικά όπου αποθηκεύεται καύσιμο JP - 5.

β) Κατασκευή των δικτύων από κράμα χαλκού - νικελίου (copper - nickel) 70 - 30 ή Cu - Ni 90 - 10, με προτίμηση οπωσδήποτε του πρώτου, λόγω μικρότερης περιεκτικότητας σε χαλκό.

#### **7.4.2 Επεξεργασίες των καυσίμων.**

Αν και ο όρος «επεξεργασία» (treatment) του καυσίμου χρησιμοποιείται πολλές φορές για να δηλώσει το φίλτραρισμα, τη φυγοκέντριση ή την προθέρμανσή του, στην κυριολεξία αφορά τις πιο σύνθετες διεργασίες που γίνονται στα κατάλοιπα κάυσιμα. Μεταξύ των διεργασιών αυτών περιλαμβάνονται τρόποι και μέθοδοι αφαιρέσεως ή και εξουδετερώσεως των μεταλλικών στοιχείων ή ενώσεων που προκαλούν διάβρωση, καθώς και των καταλοίπων καύσεως στα «θερμά» μέρη της μηχανής.

Η αφαίρεση των μεταλλικών στοιχείων λέγεται **πλύση** τού καυσίμου, γιατί κατ' αυτή αναμιγνύεται πλήρως καθαρό νερό με το καύσιμο, ώστε να διαλυθούν οι διαλυτές ενώσεις. Αφαιρείται μετά το νερό με φυγοκέντριση, ενώ με χημικά πρόσθετα ελαττώνεται το επίπεδο αφρισμού. Με αυτό τον τρόπο αφαιρούνται από το καύσιμο τα άλατα νατρίου, καλίου και ασβεστίου, ενώ και τα μη διαλυτά απ' αυτά στο νερό, οπωσδήποτε ελαττώνονται με το πλύσιμο σε αποδεκτά επίπεδα.

Το βανάδιο, του οποίου οι δυσμενείς επιπτώσεις εξετάσθηκαν ήδη, δεν είναι διαλυτό στο νερό και συνεπώς δεν μπορεί να αφαιρεθεί με την πλύση. Εξουδετερώνεται με την προσθήκη ενώσεων μαγνησίου, οπότε η χημική ένωση που προκύπτει είναι διαλυτή στο καύσιμο.

Οι απαιτούμενες ποσότητες νερού, χημικών προσθέτων (για ελάττωση του αφρισμού) και μαγνησίου (για εξουδετέρωση του βαναδίου) καθορίζονται ως ακολούθως:

- Νερό πλύσεως: 5-10% του προς πλύση καυσίμου.
- Χημικά πρόσθετα (π.χ. Tretolite): 0,025% του καυσίμου.
- Μαγνήσιο:  $300 \pm 350\%$  του εκτιμόμενου βάρους του βαναδίου.

#### **Εφαρμογή.**

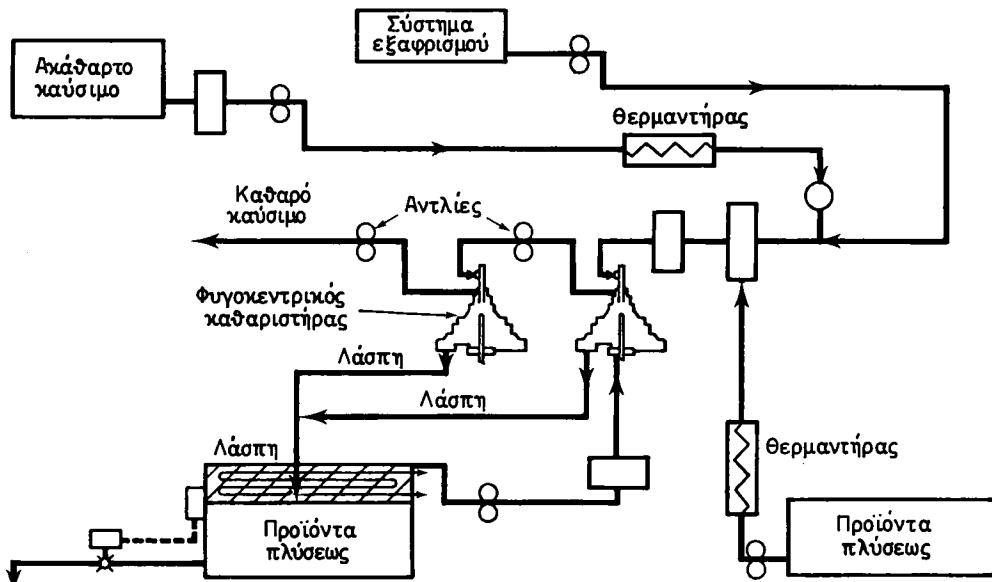
Να υπολογισθούν οι απαιτούμενες ποσότητες νερού, χημικών προσθέτων και μαγνησίου για την περίπτωση μηχανής αεριοστροβίλου ισχύος 20.000 HP, η οποία έχει ειδική κατανάλωση s.f.c. = 0,5 λίμπρες ανά ωριαίο λίππο και χρησιμοποιεί καύσιμο περιεκτικότητας σε βανάδιο 50 ppm.

α) Νερό πλύσεως:  $(20.000) \times (0,5) \times (0,10) = 1000$  λίμπρες ανά ώρα ή περίπου 2 γαλόνια ανά λεπτό.

β) Χημικά πρόσθετα:  $(20.000) \times (0,5) \times (0,00025) = 2,5$  λίμπρες ανά ώρα.

γ) Μαγνήσιο:  $(20.000) \times (0,5) \times (50) \times (10^{-6}) \times (3,5) \times (10,25) = 18$  λίμπρες ανά ώρα.

Στό σχήμα 7.4δ φαίνεται διαγραμματικά ένα σύστημα πλύσεως εγκαταστημένο σε πλοίο κινούμενο με αεριοστροβίλους. Αξίζει να σημειωθεί ότι το ίδιο βασικά σύστημα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και σε περίπτωση κινητήριας μηχανής Diesel. Τα επιτυγχανόμενα αποτέλεσματα με τα συστήματα αυτά είναι πολύ ικανοποιητικά όπως φαίνεται από τον πίνακα 7.4.1, όπου παρουσιάζονται τιμές πριν



**Σχ. 7.46.**  
Σύστημα πλύσεως του αεριοστροβίλου.

και μετά την πλύση του καυσίμου. Σημειώνεται ότι από την πλύση δεν επηρεάζεται το βανάδιο, γι' αυτό και η ανάγκη προσθήκης μαγνησίου.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.4.1.**  
**Αποτελέσματα πλύσεως καυσίμου.**

| Στοιχείο                       | Πριν από την πλύση | Μετά την πλύση |
|--------------------------------|--------------------|----------------|
| Νάτριο                         | 100 ppm            | 2 ppm          |
| Νάτριο + κάλιο                 | 100 ppm            | 5 ppm          |
| Ασβέστιο (διαλυτό στο νερό)    | 20 ppm             | 10 ppm         |
| Ασβέστιο (μη διαλυτό στο νερό) | 10 ppm             | 10 ppm         |
| Μόλυβδος                       | 5 ppm              | 5 ppm          |
| Βανάδιο                        | 400 ppm            | 400 ppm        |

### 7.5 Τα αέρια καύσιμα στους αεριοστροβίλους.

Το φυσικό αέριο (natural gas) είναι προϊόν γεωθερμικής ενέργειας και θεωρείται εξαιρετικής ποιότητας καύσιμο για τους αεριοστροβίλους. Η καθαριότητά του\* π.χ. είναι υποδειγματική. Εδώ και αρκετά χρόνια, χρησιμοποείται ευρύτατα ως καύσιμο σε εγκαταστάσεις ξηράς, όπου η παροχή του είναι ευχερής με δίκτυα και σωληνώσεις, για να κινεί αεριοστροβίλους που μεταδίδουν κίνηση στους αεροσυμπιεστές διακινήσεώς του από τα μέρη της παραγωγής του.

Κατά ανάλογο τρόπο, το φυσικό αέριο είναι εξαιρετικό καύσιμο για μηχανές

\* Υποτίθεται βέβαια ότι δεν έχει μολυνθεί κατά τη μεταφορά του από ρυπαρότητες των δικτύων, σκουριές κλπ.

Diesel και για ατμολέβητες ναυτικών εγκαταστάσεων. Τα προβλήματα όμως που δημιουργεί η αποθήκευση και η διακίνησή του επάνω σε πλοία δεν έχουν επιλυθεί ώστε να είναι οικονομικά συμφέρουσα και τεχνικά ασφαλής προς το παρόν\* η αξιοποίηση μέ τον τρόπο αυτό. Σημαντική εξαίρεση αποτελούν τα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου ή LNG (Liquified natural gas).

Το φυσικό αέριο για λόγους ασφαλείας, αλλά και χωρητικότητας, μεταφέρεται από τα πλοία αυτά από τους τόπους της φυσικής παραγωγής του υγροποιημένου σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες μέσα σε σφαιρικού σχήματος και αυξημένης μονώσεως δεξαμενές. Παρ' όλες τις προσπάθειες, η μόνωση δεν είναι πρακτικά τέλεια και έτσι μια μικρή ποσότητα του φορτίου εξαερώνεται. Το δημιουργούμενο από την αιτία αυτή αέριο (το λεγόμενο boil - off) χρησιμοποιείται ως καύσιμο στην εγκάταση προώσεως, είτε αυτή είναι μηχανή Diesel, είτε αεριοστρόβιλος ή και ατμολέβητας.

Επειδή όμως ο ρυθμός εξατμίσεως δεν είναι τόσο ταχύς ώστε η ποσότητα του boil - off να επαρκεί για τις ανάγκες της μηχανής σε καύσιμο, για να μπορέσει να αξιοποιηθεί το εξαερούμενο φυσικό αέριο, πρέπει η μηχανή να μπορεί συγχρόνως να κάψει και καύσιμο (πετρέλαιο).

Η μέθοδος αυτή της δυνατότητας ταυτόχρονης τροφοδοτήσεως της μηχανής με αέριο και κοινό καύσιμο έχει εφαρμοσθεί με επιτυχία και σε εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων που χρησιμοποιούνται για την πρώση πλοίων.

Στο σχήμα 7.5 παρουσιάζεται διαγραμματικά το σύστημα αυτό, όπου μεταξύ άλλων διακρίνονται οι καυστήρες, το σύστημα τροφοδοσίας με αέριο, το σύστημα ψεκασμού και τα μέσα ελέγχου της ταυτόχρονης ροής αερίου και καυσίμου.

Όπως φαίνεται στο σχήμα, οι καυστήρες μπορούν να καύσουν συγχρόνως και αέριο και καύσιμο ή μόνο καύσιμο.

Σημαντική είναι η συμβολή του **διαιρέτη ροής** (flow divider) ο οποίος αποτελείται από μια σειρά αντλιών θετικού εκτοπίσματος, η κάθε μια από τις οποίες αντιστοιχεί σε ένα καυστήρα. Οι αντλίες παίρνουν κίνηση από κοινό άξονα και, εφ' όσον είναι κατασκευαστικά ίδιες και παίρνουν τον ίδιο αριθμό στροφών, εξασφαλίζεται η ίδια παροχή καυσίμου σε όλους τους καυστήρες.

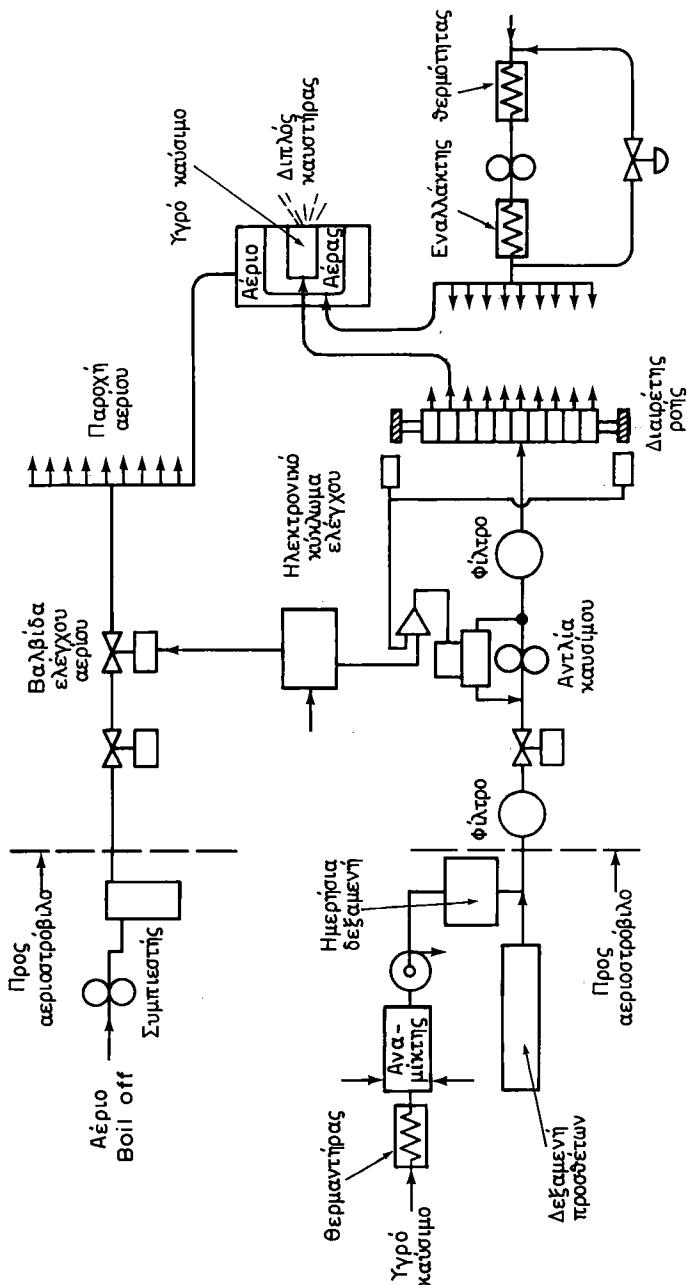
Σε συνήθεις συνθήκες πλου, όταν δηλαδή το boil - off καλύπτει ένα ποσοστό των απαιτήσεων της μηχανής σε καύσιμο, η ροή του αερίου προς τη μηχανή κανονίζεται από μια βαλβίδα ελέγχου, ενώ η ελλείπουσα ποσότητα καλύπτεται με κανονικό υγρό καύσιμο. Όταν αυξάνεται η παροχή του αερίου, ελαττώνεται αντίστοιχα η ροή του υγρού καυσίμου μέχρι το ελάχιστο επιτρεπόμενο δριο.

Όπως φαίνεται, το όλο σύστημα ελέγχου περιέχει στοιχεία αναδράσεως, ώστε να εξασφαλίζεται σε κάθε περίπτωση πλήρης και οικονομική καύση.

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο του συστήματος ταυτόχρονης καύσεως αερίου - υγρού καυσίμου είναι οι ευρείες διακυμάνσεις της θερμαντικής ικανότητας του αερίου, οι οποίες οφείλονται σε βαθμιαία μεταβολή της χημικής συνθέσεως του φορτίου κατά τη διάρκεια τού ταξιδιού, με συνέπεια να μεταβάλλεται και η χημική σύνθεση του boil - off και επομένως και η θερμαντική του ικανότητα.

Έτσι π.χ. το εξαερούμενο υγρό στην αρχή του ταξιδιού περιέχει γύρω στα 20%

\* Το οικονομικό συμφέρον μεταβάλλεται χρονικά. Έτσι αν σημειωθεί νέα ενεργειακή κρίση και αυξηθούν οι τιμές των υγρών καυσίμων, πιθανό να συμφέρει η χρησιμοποίηση φυσικού αερίου και στα πλοία.



**Σχ. 7.5.**  
Σύστημα καύσεως υγρού καυσίμου και αερίου (LNG).

άζωτο, ενώ στο τέλος είναι καθαρό μεθάνιο 100%\*, με διαφορετική συνεπώς θερμαντική ικανότητα. Η αύξηση αυτή της θερμαντικής ικανότητας προκαλεί αύξηση της διατιθέμενης ισχύος προώσεως και επομένως αύξηση των στροφών της μηχανής.

Με κατάλληλες ασφαλιστικές διατάξεις του συστήματος ελέγχου μπορούμε να πετύχουμε ώστε:

- Ο αριθμός στροφών της έλικας να παραμένει σταθερός.
- Η μηχανή να προστατεύεται από υπερθέρμανση (λόγω της μεγαλύτερης θερμαντικής ικανότητας του καυσίμου), ενώ συγχρόνως ύστερα από ολίγο να αποκτά τις κανονικές στροφές της.

## 7.6 Τα λιπαντικά στους αεριοστροβίλους.

Στους αεριοστροβίλους χρησιμοποιούνται λιπαντικά δύο διαφορετικών προελεύσεων:

- Συνθετικά λιπαντικά.
- Συνήθη ορυκτά λιπαντέλαια.

Τα συνθετικά λιπαντέλαια χρησιμοποιούνται κυρίως στους αεριοστροβίλους αεροπορικής προελεύσεως και υπέρτερούν των άλλων ως προς αρκετές ιδιότητες, από τις οποίες σημαντικότερη είναι η διατήρηση των ιδιοτήτων τους και σε υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι, οι θερμοκρασίες του λαδιού, φθάνουν μετά τους τριβείς μέχρι τους 300°F που είναι 100°F περισσότερο απ' ότι τα συνήθη λιπαντικά.

Δυστυχώς τα συνθετικά λιπαντέλαια παρουσιάζουν σοβαρά προβλήματα κατά την ψύξη τους, επειδή ο συνήθης τρόπος ψύξεως με τη βοιθεία εναλλάκτη θερμότητας με θαλασσινό νερό ως ψυκτικό μέσο, δεν είναι εφαρμόσιμος. Αυτό συμβαίνει, επειδή το συνθετικό λιπαντέλαιο, περνώντας από τους αυλούς του εναλλάκτη, αποσυντίθεται αντιδρώντας με το χαλκό, εκ του οποίου οι αυλοί είναι κατασκευασμένοι.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος έχουν εξευρεθεί διάφοροι τρόποι, όπως η κατασκευή εναλλακτών από διαφορετικά υλικά (tonel), η χρησιμοποίηση διαφόρων άλλων ψυκτικών μέσων αντί του θαλασσινού νερού, όπως αέρας, καύσιμο, γλυκό νερό κλπ.

Καθένας από τους τρόπους αυτούς παρουσιάζει και αρκετά μειονεκτήματα, τα οποία θα εξετασθούν στο οικείο κεφάλαιο. Εξ αιτίας των μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν οι διάφοροι παραπάνω τρόποι ψύξεως των συνθετικών λιπαντελαίων, η τάση των κατασκευαστών έχει στραφεί κυρίως προς τα ορυκτά έλαια αποστάξεως. Τα έλαια αυτά δεν είναι απαραίτητο να περιέχουν πρόσθετα για τη βελτίωση του ιξώδους των, ενώ συνιστάται η προσθήκη αντιδιαβρωτικών και αντιοξειδωτικών προσθέτων. Στο πίνακα 7.6.1 δίνονται οι προδιαγραφές των λιπαντικών για χρήση σε αεριοστροβίλους.

\* Επειδή βέβαια στο μεταξύ το άζωτο του φυσικού αερίου, ως πιπετικότερο, έχει εξαερωθεί πλήρως.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.6.1.**  
**Προδιαγραφές λιπαντελαιών για αεριοστροβίλους.**

| ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ ΜΕΓΕΘΟΣ              |         | ΕΙΔΟΣ ΛΙΠΑΝΤΕΛΑΙΟΥ |        |
|-------------------------------------|---------|--------------------|--------|
|                                     |         | Μεσαίο             | Ελαφρύ |
| 1. Δείκτης ιξώδους                  | minimum | 90                 | 90     |
| 2. Ιξώδες σε centistokes στους 38°C | 43÷60   | 29÷35              |        |
| 3. Σημείο εναύσεως °F               | minimum | 365                | 330    |
| 4. Σημείο ροής °F                   | maximum | 20                 | 20     |
| 5. Αλκαλικότητα σε mgKOH/kg         | maximum | 0,2                | 0,2    |
| 6. Διάβρωση χαλκού                  | maximum | ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ «1»      |        |
| 7. Οξείδωση σε kgKOH/kg             | maximum | 0,2                | 0,2    |
| 8. Απογαλακτοποίηση σε δευτερόλεπτα | maximum | 300                | 300    |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΟ

### ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ - ΑΠΑΓΩΓΗΣ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΣΕ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

#### 8.1 Γενικά.

Ο καταλληλότερος τρόπος για την εισαγωγή στο αντικείμενο του κεφαλαίου αυτού είναι η προσεκτική εξέταση των τριών σχημάτων που ακολουθούν, γιατί αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα της σημασίας των συστημάτων προσαγωγής-απαγωγής αέρα και καυσαερίων στις εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων.

Το σχήμα 8.1α είναι μια σχεδιαγραμματική παράσταση των μηχανών προώσεως και των οχετών του κινούμενου με αεριοστροβίλους πλοίου «Callaghan». Είναι αξιοσημείωτο ότι το μέγεθος των μηχανών αποτελεί μικρό μόνο ποσοστό του συνολικού όγκου της εγκαταστάσεως προώσεως, λόγω του ιδιάτερα μεγάλου όγκου που καταλαμβάνουν οι οχετοί.

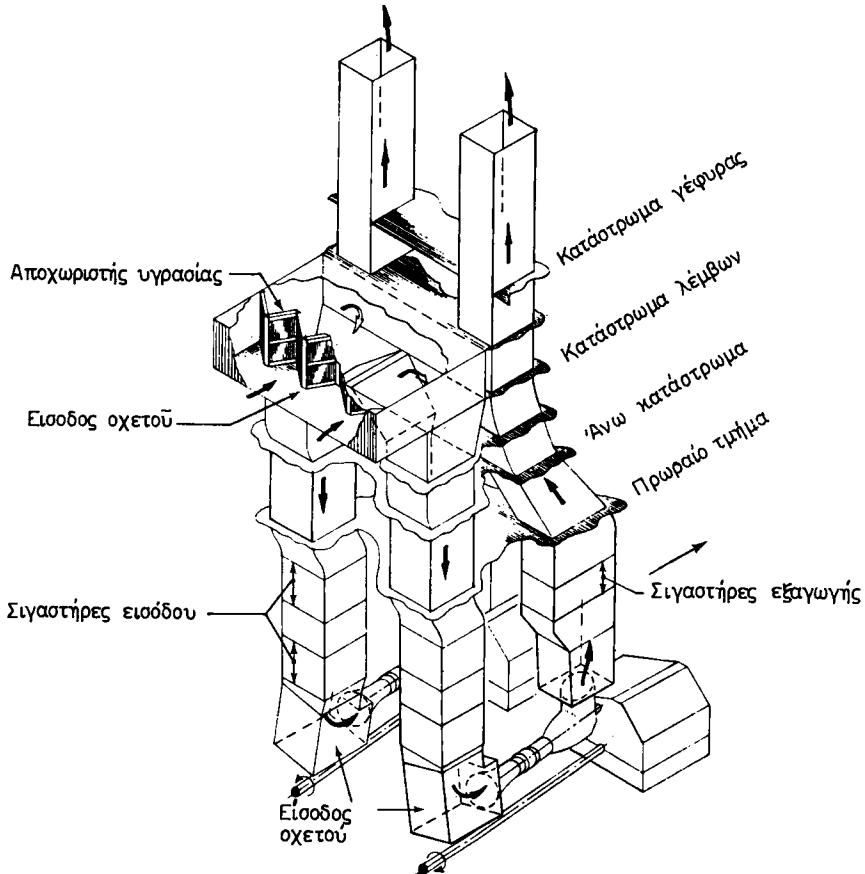
Στο σχήμα 8.1β παρουσιάζεται υπό μορφή νομογράμματος η απώλεια ισχύος του αεριοστροβίλου και η αύξηση της καταναλώσεως που οφείλεται στις πτώσεις πιέσεως των καυσαερίων και του αέρα κατά τη διέλευσή τους από τους οχετούς απαγωγής και προσαγωγής.

Στο σχήμα 8.1γ φαίνεται η απώλεια ισχύος ως ποσοστό της μέγιστης ροής του αέρα, καθώς και ο αναγκαστικός περιορισμός της, που οφείλονται στην παρουσία αλάτων στον καταθλιβόμενο από το συμπιεστή του αεριοστροβίλου αέρα και στην εξ αιτίας αυτών ρύπανση του συμπιεστή.

Ο κύριος παράγοντας που λαμβάνεται υπ' όψη στη σχεδίαση των αγωγών\* είναι η μεγάλη ποσότητα αέρα που διακινείται κατά τη λειτουργία των εγκαταστάσεων αεριοστροβίλων. Έτσι, ως ελάχιστη κατανάλωση αέρα μπορεί να θεωρηθεί η ποσότητα των 5 κυβικών ποδιών ανά λεπτό και ανά παραγόμενο ίππο ισχύος ( $5\text{ft}^3/\text{min.HP}$ ). Για ένα αεριοστρόβιλο δηλαδή ισχύος 20.000 HP απαιτούνται κατά ελάχιστο 100.000 κυβικά πόδια αέρα ανά λεπτό. Έναντι αυτών, οι χειρότερες από πλευράς καταναλώσεως αέρα μηχανές Diesel δεν υπερβαίνουν τα  $2\text{ft}^3/\text{min.HP}$  και οι εγκαταστάσεις ατμοστροβίλων ακόμη λιγότερο.

Σαν φυσική συνέπεια των ανωτέρω, οι οχετοί πρέπει να είναι μεγάλοι, για να διακινήσουν την απαιτούμενη ποσότητα ενώ, για λόγους περιορισμού κατά το δυνατόν του όγκου και βάρους τους, αυξάνεται η ταχύτητα του διακινούμενου ρευστού. Αύξηση όμως της ταχύτητας του ρευστού συνεπάγεται και μεγάλη πτώση

\* Στο κεφάλαιο αυτό, με τον όρο «αγωγοί» ή «οχετοί» νοούνται οι οχετοί προσαγωγής και απαγωγής του θερμοδυναμικού μέσου, δηλαδή τόσο του αέρα όσο και των καυσαερίων.



Σχ. 8.1α.

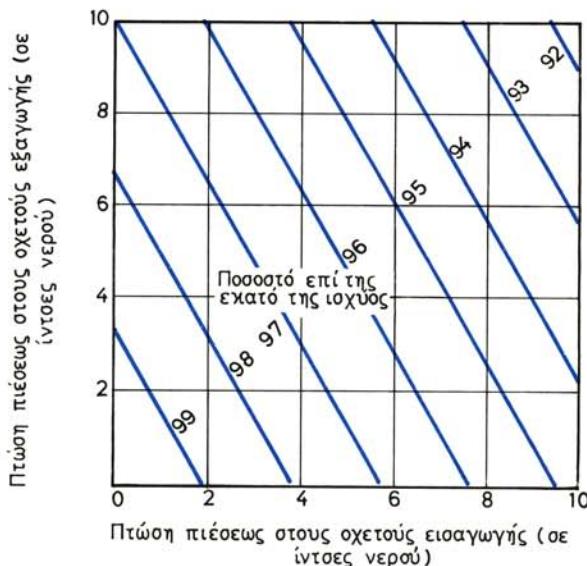
Οχετοί αέρα και καυσαερίων πλοίου κινούμενου με αεριοστροβίλους.

πιέσεως, με αποτέλεσμα τη μείωση της ισχύος, δύναται προκύπτει από το σχήμα 8.1γ. Πέρα όμως από αυτό, η μεγάλη ταχύτητα διευκολύνει τη μεταφορά των σταγονιδίων θαλασσινού νερού, ενώ η προσπάθεια για την αφαίρεσή τους με φίλτρα ή παγίδες αυξάνει ακόμη περισσότερο την πτώση πιέσεως στους αγωγούς.

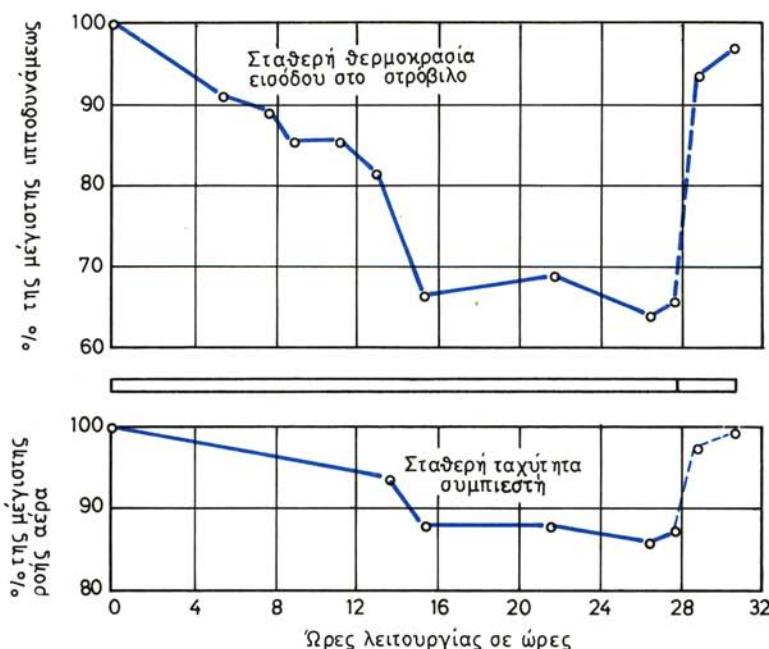
Είναι επομένως φανερό ότι μόνο με συμβιβασμό των διαφόρων αντικρουομένων απαιτήσεων επιτυγχάνεται σχεδίαση και κατασκευή των αγωγών, τέτοια, ώστε και μεγάλο δύκο να μην καταλαμβάνουν και η πτώση πιέσεως να κυμαίνεται σε ανεκτά πλαίσια και η μεταφέρομενη ποσότητα σταγονιδίων θαλασσινού νερού να μην υπερβαίνει ορισμένες προκαθορισμένες τιμές.

Οι αγωγοί όμως είναι ανάγκη επίσης να ικανοποιούν και τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Να ελαχιστοποιούν το μεταδιδόμενο θόρυβο στον περιβάλλοντα χώρο.
- Νά είναι έτσι χωροταξικά διαρρυθμισμένοι, ώστε να αποφεύγεται η ανάμιξη των καυσαερίων με τον αέρα εισαγωγής.
- Επειδή οι οχετοί εξαγωγής καυσαερίων έχουν αυξημένη θερμοκρασία, πρέπει να μειούται ο κίνδυνος δημιουργίας θερμών εστιών και πυρκαϊάς.

**Σχ. 8.1β.**

Η απώλεια ισχύος ως συνάρτηση της πτώσεως πιέσεως στούς οχετούς.

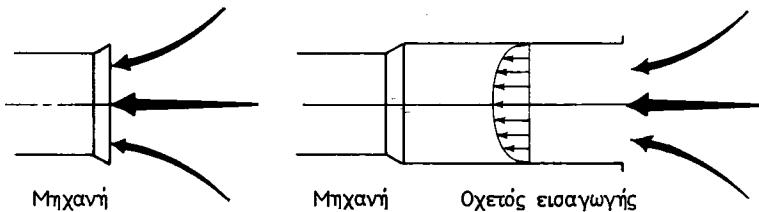
**Σχ. 8.1γ.**

Οι συνέπειες τής παρουσίας αλάτων στην ελάττωση της ισχύος και της ροής του αέρα.

## 8.2 Πτώση πιέσεως στους αγωγούς.

Ο υπολογισμός της πτώσεως πιέσεως στους αγωγούς είναι κεφαλαιώδους σημασίας, γιατί με βάση αυτόν υπολογίζεται επίσης η απαιτούμενη διατομή των αγωγών.

Στο αριστερό τμήμα του σχήματος 8.2a παρουσιάζεται η απ' ευθείας εισαγωγή αέρα σε ένα αεριοστρόβιλο χωρίς τη μεσολάβηση αγωγού. Ο συμπιεστής αναρροφά αέρα από το περιβάλλον και τον επιταχύνει προς την αναρρόφηση, όπως φαίνεται από τα βέλη.



**Σχ. 8.2a.**

Εισαγωγή αέρα στον αεριοστρόβιλο με και χωρίς αγωγό.

Η συνολική μηχανική ενέργεια ανά μονάδα μάζας αέρα ( $\Sigma ME$ ) παραμένει σταθερή και ανεξάρτητη από τη διαδικασία της αναρροφήσεως, αν και η στατική πίεση ελαττώνεται, καθώς ο αέρας επιταχυνόμενος προς την είσοδο αυξάνει την ταχύτητά του. Η ( $\Sigma ME$ ) είναι άθροισμα τριών επί μέρους ενέργειών, δηλαδή της στατικής, της κινητικής και της ενέργειας θέσεως, δηλαδή:

$$\Sigma ME = \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gh$$

όπου:  $P$  = πίεση,

$\rho$  = πυκνότητα,

$V$  = ταχύτητα,

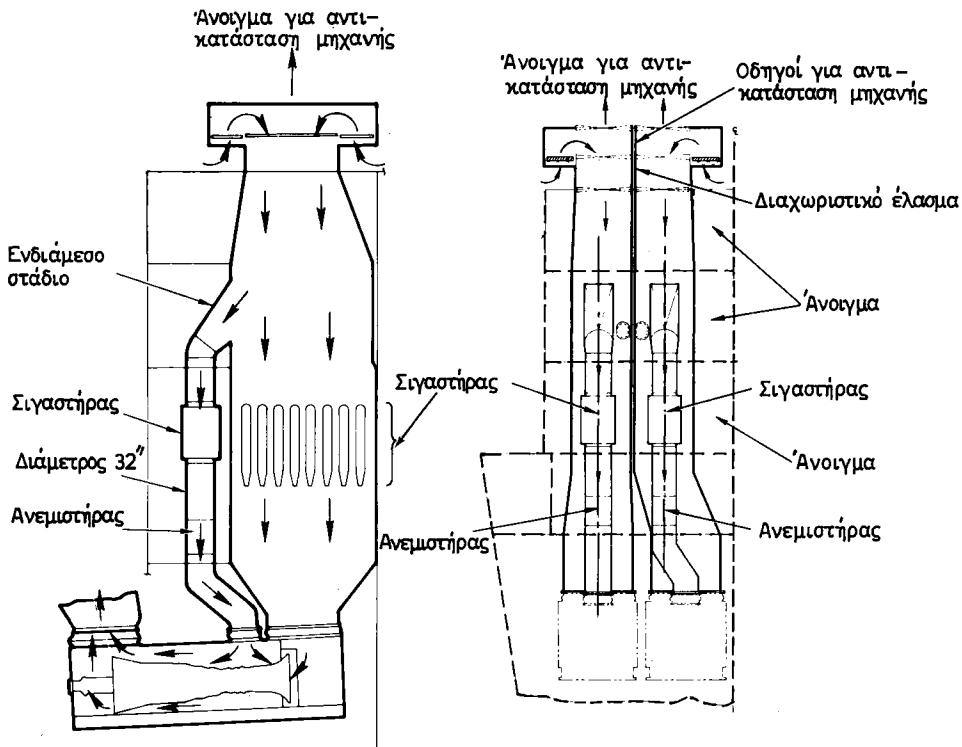
$g$  = επιτάχυνση της βαρύτητας και

$h$  = ύψος πάνω από ένα επίπεδο αναφοράς.

Η ( $\Sigma ME$ ) ελαττώνεται συνήθως με παραγωγή μηχανικού έργου ή με ροή θερμότητας από το ρευστό προς το περιβάλλον ή λόγω εσωτερικών τριβών από το ιεώδες του ρευστού. Στην προκειμένη περίπτωση όμως, κανένα από τα παραπάνω αίτια δεν υπάρχει και έτσι η μόνη μεταβολή είναι η ελάττωση του όρου  $P/\rho$  καθώς η ταχύτητα  $V$  αυξάνει, δηλαδή μια εναλλαγή των δύο όρων. Συνεπώς δεν υπάρχει απώλεια.

Αν τώρα προστεθεί ένας αγωγός στην αναρρόφηση του συμπιεστή, όπως φαίνεται στο δεξιό μέρος του ίδιου σχήματος, έχουμε μεγάλες μεταβολές του διανύσματος της ταχύτητας ροής, λόγω τριβών του ρευστού με τα τοιχώματα του αγωγού. Η δύναμη αυτή τριβής προκαλεί υποβάθμιση της ( $\Sigma ME$ ) του ρευστού, μετράται συνήθως ως μεταβολή πιέσεως και αποτελεί το φυσικό φαινόμενο που ονομάζεται **πτώση πιέσεως**. Είναι δηλαδή η πτώση πιέσεως μέτρο της ελαττώσεως της συνολικής μηχανικής ενέργειας ( $\Sigma ME$ ) του ρευστού.

Στην πράξη, οι οχετοί των εγκαταστάσεων αεριοστροβίλων είναι τεθλασμένου ή καμπύλου σχήματος, φέρουν φίλτρα και αποχωριστές υγρασίας, μεταβάλλουν τη



Σχ. 8.2β.

Οχετοί προσαγωγής αέρα σε εγκατάσταση αεριοστροβίλου πολεμικού πλοίου.

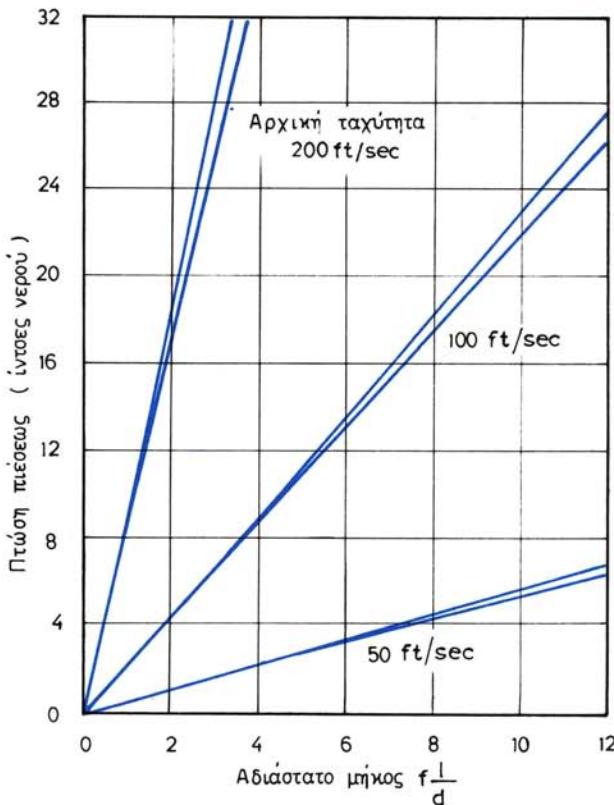
διατομή τους και αλλάζουν απότομα διεύθυνση όπως φαίνεται στο σχήμα 8.2β.

Όλοι οι παράγοντες που αναφέρθηκαν προηγουμένως, έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της πτώσεως πίεσεως και συνεπώς την ελάττωση της (ΣΜΕ) του ρευστού. Θα πρέπει να διευκρινισθεί ότι τα παραπάνω, αν και ισχύουν για το σύνολο των οχετών εισαγωγής - εξαγωγής, έχουν δύναμη μεγαλύτερη σημασία για τους οχετούς εισαγωγής, γιατί η ταχύτητα του ρευστού στους οχετούς εξαγωγής θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει, γενικά, μη αξιοποίησιμη μορφή ενέργειας.

Ο θεωρητικός υπολογισμός της συνολικής πτώσεως πίεσεως σε μια πραγματική εγκατάσταση αεριοστροβίλων δεν αποτελεί εύκολο έργο και ξεφεύγει από τους σκοπούς του βιβλίου, ενώ, αντίθετα, για τον υπολογισμό της πτώσεως πίεσεως σε ευθύγραμμους αγωγούς, υπάρχουν νομογραφήματα όπως του σχήματος 8.2γ, που επιτρέπουν το γρήγορο υπολογισμό της πτώσεως πίεσεως.

Από το νομογράφημα λοιπόν του σχήματος 8.2γ εφόσον γνωρίζομε το μήκος (l) και τη διάμετρο (d) του αγωγού, καθώς και το συντελεστή τριβής (f) του ρευστού στα τοιχώματα, μπορούμε να υπολογίσουμε τον αδιάστατο συντελεστή μήκους για την περίπτωσή μας, που είναι στον άξονα των τετραγμένων. Επίσης, αν είναι γνωστή και η αρχική ταχύτητα του ρευστού από τον άξονα των τεταγμένων, βρίσκομε απ' ευθείας την πώση πιέσεως σε ίντσες στήλης νερού.

Ως παράδειγμα αναφέρεται η πτώση πιέσεως στους οχετούς αέρα εισαγωγής



**Σχ. 8.2γ.**  
Νομογράφημα υπολογισμού πτώσεως πιέσεως σε οχετούς.

του σχήματος 8.2β που εξυπηρετούν εγκατάσταση αεριοστροβίλων των παρακάτω δεδομένων:

- Ισχύς μηχανής: 21.000 HP
- Κατανάλωση αέρα: 1840 κυβικά πόδια ανά δευτερόλεπτο
- Θερμοκρασία αέρα εισαγωγής: 80°F
- Πυκνότητα αέρα: 0,0735 lb/ft<sup>3</sup>
- Ιξώδες αέρα: 0,0185 centipoise

Με βάση τα στοιχεία αυτά, υπολογίζεται ότι η πτώση πιέσεως ανέρχεται σε 4 περίπου ίντσες στήλης νερού, από τις οποίες 1,12 ίντσες οφείλονται στη διέλευση του ρευστού από τους αγωγούς, ενώ οι υπόλοιπες 2,88 είναι αποτέλεσμα της υπάρξεως στους αγωγούς των φίλτρων, αποχωριστών υγρασίας κλπ.

### 8.3 Η ρύπανση του αέρα εισαγωγής από άλατα.

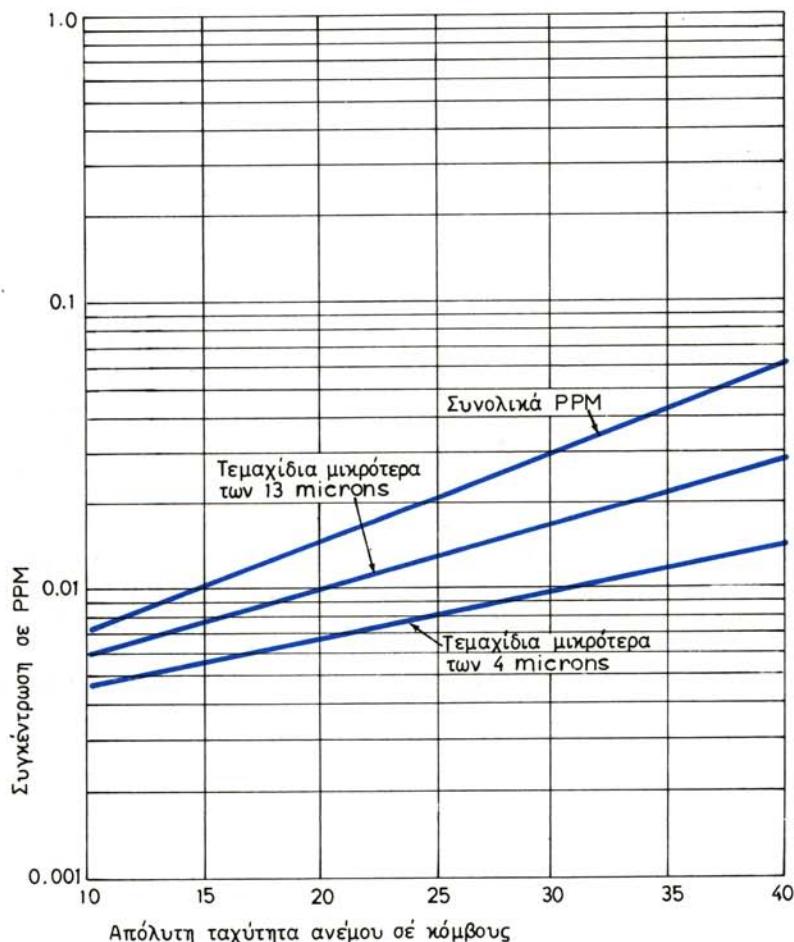
Ο ατμοσφαιρικός αέρας που βρίσκεται πάνω από τη θάλασσα περιέχει σημαντική ποσότητα αλάτων είτε υπό μορφή χονδρών σταγόνων πού δημιουργούνται

κοντά στη διαχωριστική επιφάνεια αέρα - Θάλασσας, είτε υπό μορφή λεπτοτάτων σταγονιδίων που αιωρούνται σε αρκετό ύψος.

Οι χονδρές σταγόνες μπορούν εύκολα να απομονωθούν και να αποτραπεί η είσοδος τους στους οχετούς, είτε με την τοποθέτηση των αναρροφήσεων ψηλά και σε προστατευμένο μέρος, είτε με την προσθήκη φίλτρων και υδροπαγίδων ή και με συνδυασμό των δύο μεθόδων.

Αντίθετα, τα λεπτότατα σταγονίδια υπό μορφή ψεκασμού (spray) είναι πολύ δύσκολο να αποφευχθούν ή να απομακρυνθούν με οποιοδήποτε συνδυασμό προληπτικών ή κατασταλτικών μέτρων.

Στο σχήμα 8.3α παρουσιάζεται η αναμενόμενη συγκέντρωση μικρών σταγονιδίων σε μέρη ανά εκατομμύριο (ppm) ως συνάρτηση της ταχύτητας του πνέοντος ανέμου και αφορά αγωγούς, οι αναρροφήσεις των οποίων είναι τοποθετημένες 12 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και επαρκώς προστατευμένες από την άμεση επίδραση του κύματος.



**Σχ. 8.3α.**  
Συγκέντρωση σταγονιδίων της θάλασσας στον αέρα.

Η πιο άμεση εκδήλωση εισόδου αλάτων στον αεριοστρόβιλο είναι η υποβάθμιση των επιδόσεων και δυνατοτήτων του, γιατί τα άλατα καλύπτουν τα πτερύγια του συμπιεστή, κλείνουν τη δίοδο του αέρα και μεταβάλλουν τις αεροτομές των πτερυγίων.

Η υποβάθμιση αυτή αποκαθίσταται εύκολα με πλύση του συμπιεστή με γλυκό νερό που, έχει αποδειχθεί ότι αποτελεί κατάλληλο τρόπο αντιμετωπίσεως του προβλήματος για τα περισσότερα είδη των αεριοστροβίλων. Η όλη διαδικασία της υποβάθμισης και της ανακτήσεως των δυνατοτήτων παρουσιάσθηκε ήδη στο σχήμα 8.1γ.

Πιο μακροπρόθεσμη συνέπεια της εισόδου αλάτων στον αεριοστρόβιλο είναι η διάβρωση των μεταλλικών του τμημάτων. Προς αποφυγή της καταστάσεως αυτής, στις σύγχρονες κατασκευές χρησιμοποιούνται υλικά ανθεκτικά στη διάβρωση. Έχουν δηλαδή αντικατασταθεί τα κράματα μαγνησίου, που είχαν χρησιμοποιηθεί αρχικά, με αντίστοιχα αλουμινίου ή τιτανίου.

Πιο σοβαρή ακόμα συνέπεια είναι η διάβρωση του «θερμού μέρους» του αεριοστροβίλου, ειδικότερα των προφυσίων και πτερυγίων της πρώτης βαθμίδας του στροβίλου, η οποία ονομάζεται **θειίκωση**. Αν και δεν υπάρχει στο θαλασσινό νερό, το θειάφι προέρχεται από το χρησιμοποιούμενο καύσιμο, οπότε ενώνεται με το νερό και δημιουργεί θειικό νάτριο. Η χημική αυτή ένωση καλύπτει τις θερμές επιφάνειες του στροβίλου και αντιδρά με το χρώμιο που περιέχεται στα κράματα κατασκευής του στροβίλου, με αποτέλεσμα επιταχυνόμενη διάβρωση.

Επειδή βέβαια, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο περί καυσίμων, είναι αναπόφευκτη η παρουσία μικρής ποσότητας θείου στο καύσιμο, γι' αυτό καταβάλλεται κάθε προσπάθεια περιορισμού εισόδου αλάτων στον καυσιγόνο αέρα.

Μεταξύ των περιοριστικών αυτών προσπαθειών περιλαμβάνονται η τοποθέτηση προστατευτικών φίλτρων στις αναρροφήσεις, η χρησιμοποίηση χαμηλών ταχυτήτων του αέρα εισαγωγής, καθώς και η χρησιμοποίηση αποχωριστών υγρασίας.

Από τα πολλά είδη αποχωριστών που προτάθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν κατά καιρούς, έχουν επικρατήσει δύο κυρίως, ο λεγόμενος **αδρανειακός** αποχωριστής και ο **διηθητικός** (φίλτρο).

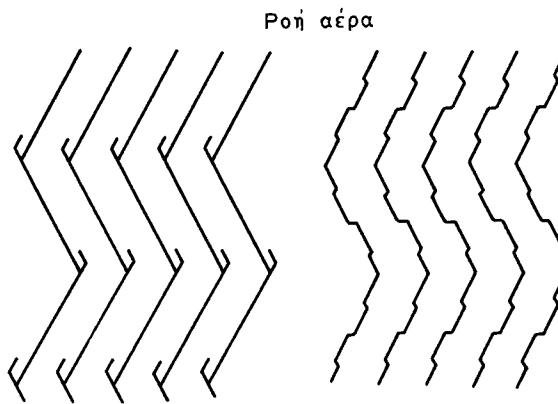
Ο αδρανειακός αποχωριστής έχει τη μορφή του σχήματος 8.3β, δηλαδή κυματοειδών ελασμάτων που εξαναγκάζουν τον αέρα σε απότομες αλλαγές της διεύθυνσεώς του, ώστε οι ξένες ύλες (και το νερό) να μη μπορούν λόγω αδράνειας να παρακολουθήσουν τις αλλαγές αυτές και να επικάθονται στα τοιχώματα του αποχωριστή.

Στο σχήμα 8.3γ φαίνεται η ικανότητα αποχωρισμού υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας των αντιστοίχων διατάξεων του κινούμενου με αεριοστροβίλους πλοίου «Euroliner».

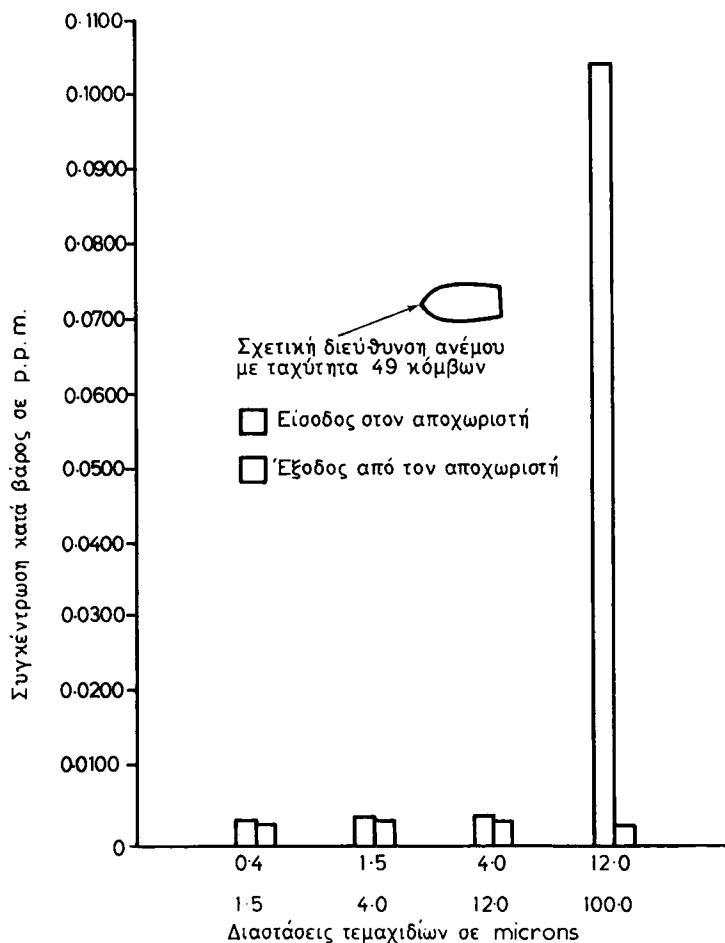
Όπως φαίνεται στο σχήμα και όπως αναμενόταν άλλωστε, η ικανότητα αποχωρισμού είναι συνάρτηση του μεγέθους των σωματιδίων και καθίσταται τόσο μεγαλύτερη όσο αυξάνει το μέγεθός του.

Το πλοίο «Euroliner» αντιμετώπισε οξύτατα προβλήματα θειικώσεως και γι' αυτό, μετά τα πρώτα του ταξίδια και με βάση την εμπειρία που αποκτήθηκε στο μεταξύ, ξανασχεδιάσθηκαν τα συστήματα αποτροπής εισόδου θαλασσινού νερού στους οχετούς αέρα.

Ο διηθητικός αποχωριστής, στη βασική του μορφή αποτελείται από ένα λεπτό



**Σχ. 8.3β.**  
Τυπικές μορφές αδρανειακού αποχωριστή.

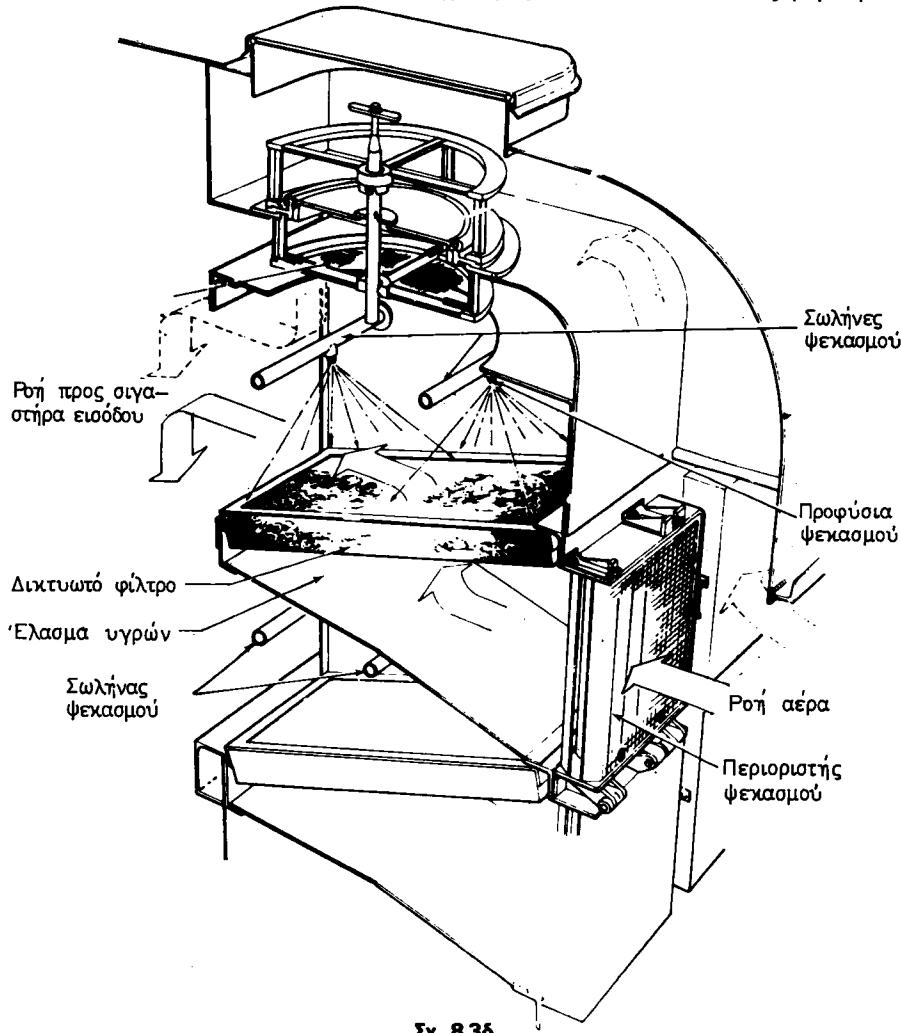


**Σχ. 8.3γ.**  
Η απόδοση του αδρανειακού αποχωριστή.

πλέγμα (από monel ή πολυπροπυλένιο), μέσα από το οποίο εξαναγκάζεται να διέλθει ο αέρας. Άν και πάλι τα μικρότερα σε μέγεθος σωματίδια συγκρατούνται δυσκολότερα, όμως ο αποχωρισμός γίνεται καλύτερα και είναι ανεξάρτητος από την ταχύτητα του ρευστού. Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, οι αποχωριστές του τύπου αυτού παρουσιάζουν τα ακόλουθα μειονεκτήματα:

- Μέγιστη πτώση πιέσεως.
- Φράσσουν εύκολα λόγω παγετού.
- Σε περίπτωση εχθρικής ενέργειας καταστρέφονται από το κύμα πιέσεως (έκρηξη).
- Φράσσουν εύκολα από άλατα και απαιτούν πλύσιμο.
- Φθείρονται πιο εύκολα.

Στο σχήμα 8.36 φαίνεται αποχωριστής διηθητικού τύπου, ο οποίος φέρει βαλβί-

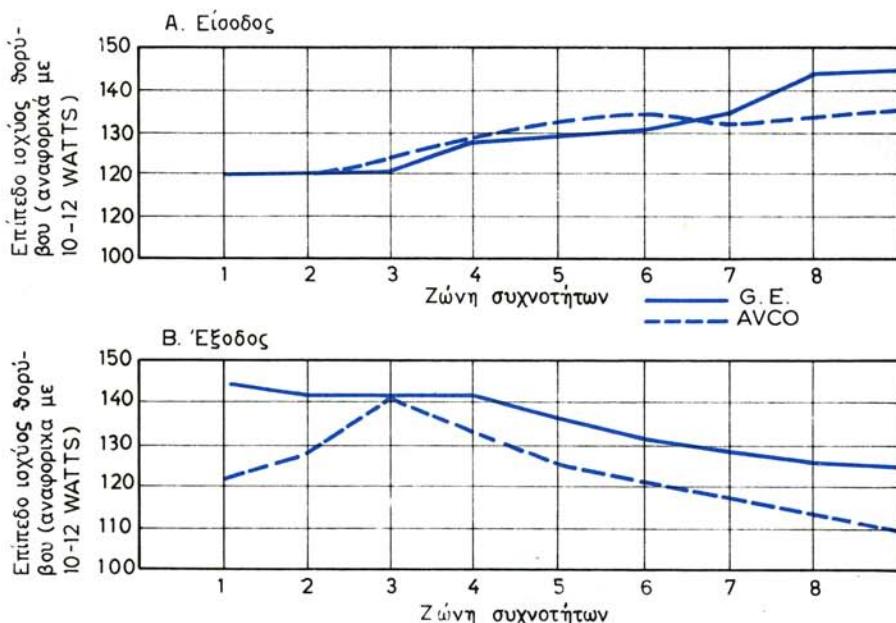


δα παρακάμψεις (by pass) από την οποία ο αέρας μπορεί να οδηγηθεί στό συμπιεστή εκτός φίλτρου σε περίπτωση αδυναμίας χρησιμοποίησεώς του, λόγω π.χ. εμφράξεώς του από παγετούς.

#### 8.4 Δημιουργία και αντιμετώπιση θορύβου στους οχετούς εγκαταστάσεων αεροστροβίλων.

Όσοι έχουν βρεθεί κοντά ή επάνω σε πλοίο που κινείται με αεροστροβίλους, αντιλαμβάνονται τη δημιουργία έντονου θορύβου στους αιγαγούς εισαγωγής και εξαγωγής.

Στο σχήμα 8.4α παρουσιάζονται χαρακτηριστικά επίπεδα του θορύβου στους οχετούς για δύο τύπους αεροστροβίλων, τον LM 2500 της General Electric και τον TF 35 της Avco Lycoming.



Σχ. 8.4α.

Ο θόρυβος στους οχετούς αέρα και καυσαερίων.

Τα διαγράμματα θορύβου παρουσιάζονται σε άξονες εντάσεως θορύβου (decibel) και συχνότητας, όπως δε φαίνεται για τις συγκεκριμένες μηχανές, τα επίπεδα θορύβου που δημιουργούνται στους οχετούς τους, όταν λειτουργούν, είναι ανεπίτρεπτα υψηλά από πλευράς ανθρώπινης ανέσεως.

Χειρότερο βέβαια είναι το ότι μέσω των οχετών ο υψηλός θόρυβος μεταδίδεται στα καταστρώματα και την υπόλοιπη σιδηρά κατασκευή του πλοίου, πράγμα που καθιστά αναγκαία την εξεύρεση τρόπων και μεθόδων για τη μείωσή του.

Ένας βασικός τρόπος για τη μείωση του θορύβου είναι η αλλαγή κατεύθυνσεως των αγωγών, η οποία αν και ανεπιθύμητη για άλλους λόγους (π.χ. πτώση πίεσεως), είναι όμως πολύ αποτελεσματική. Επίσης, πολύ συχνά χρησιμοποιούνται υλικά απορροφήσεως του θορύβου, τα οποία τοποθετούνται κατάλληλα μέσα

στους οχετούς.

Η ελάττωση του θορύβου με απορρόφηση διέπεται από τη θεμελιώδη σχέση:

$$R = (12,6)a^{0,25} \frac{P}{A} \text{ (dB/ft)}$$

όπου:  $R$  = ελάττωση,

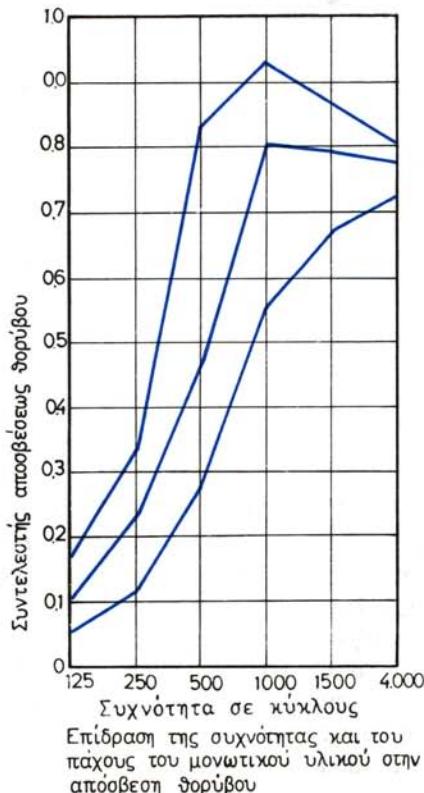
$a$  = συντελεστής απορροφήσεως θορύβου του υλικού,

$P$  = περίμετρος της διατομής του οχετού και

$A$  = επιφάνεια της διατομής του οχετού.

Ο συντελεστής απορροφήσεως « $a$ » έχει μεγάλες τιμές για ορισμένα υλικά, όπως ο φελός ή ο υαλοβάμβακας που αποτελούνται από πολλές ίνες, ενώ για υλικά σκληρά με λείες επιφάνειες οι τιμές του είναι μικρότερες.

Το σχήμα 8.4β δείχνει τις τιμές του συντελεστή « $a$ » για υλικό fiber glass και για τρία διαφορετικά πάχη, μισής, μιας και μιάμισης ίντσας. Όπως φαίνεται, η τιμή του « $a$ », εκτός από το πάχος του υλικού, εξαρτάται και από τη συχνότητα του προς μείωση θορύβου και μάλιστα αυξάνει σημαντικότατα με την αύξηση της συχνότητας. Έτσι, για το ίδιο πάχος υλικού μισής ίντσας οι τιμές του « $a$ » είναι 0,28, 0,54 και 0,67 για συχνότητες 500, 1000 και 2000 κύκλων αντίστοιχα. Για σύγκριση, οι



Σχ. 8.4β.

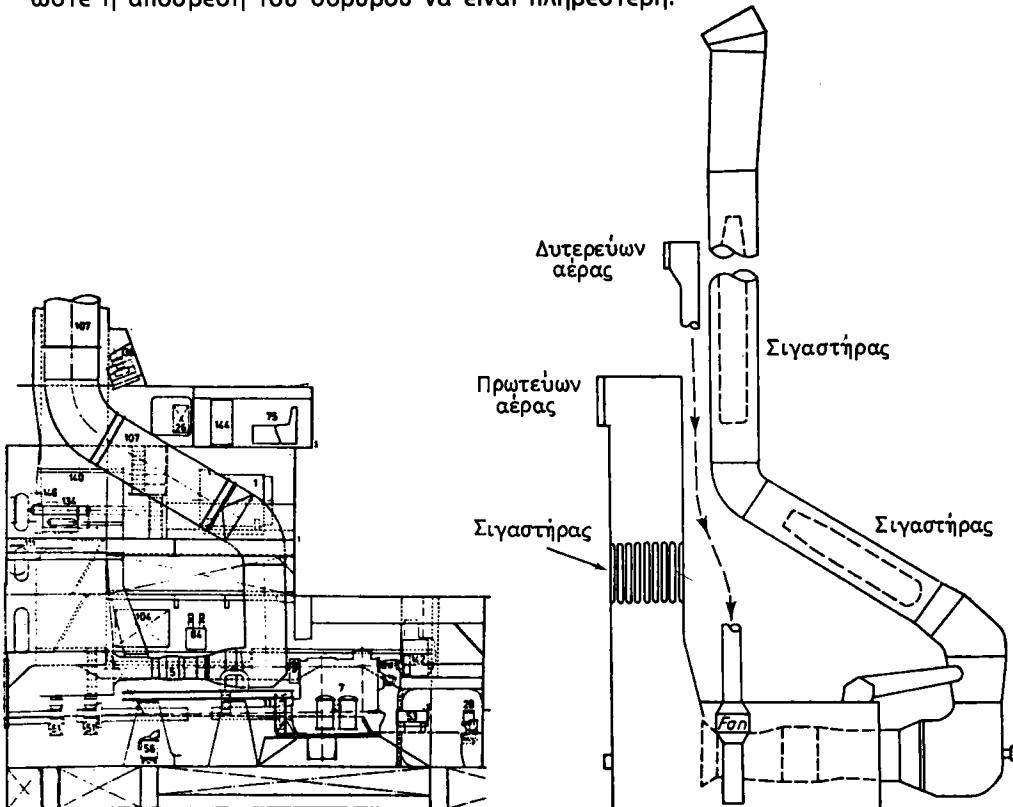
Συντελεστής αποσβέσεως θορύβου για υλικά χρησιμοποιούμενα σε οχετούς.

τιμές του συντελεστή «α» για το γιαλί είναι 0,04 καί 0,02 για συχνότητες 1000 και 2000 κύκλων.

Το υλικό κατασκευής των οχετών βέβαια δεν είναι ούτε fiber glass ούτε γιαλί, αλλά χάλυβας, του οποίου όμως οι τιμές του συντελεστή «α» είναι παραπλήσιες των τιμών του γιαλιού.

Οι σχεδιαστές των εγκαταστάσεων προώσεως, για να πετύχουν τη μείωση του θορύβου σε επιθυμητά δραστηριότητες, τοποθετούν μέσα στους οχετούς σιγαστήρες, κατασκευασμένους από υλικά με μεγάλες τιμές του συντελεστή απορροφήσεως, ενώ συγχρόνως με τους πρόσθετους αυτούς σιγαστήρες υπό μορφή χιτωνίων επιτυγχάνουν και αύξηση του λόγου P/A του αγωγού οπότε βελτιώνεται ακόμη πιο πολύ η απομείωση του θορύβου.

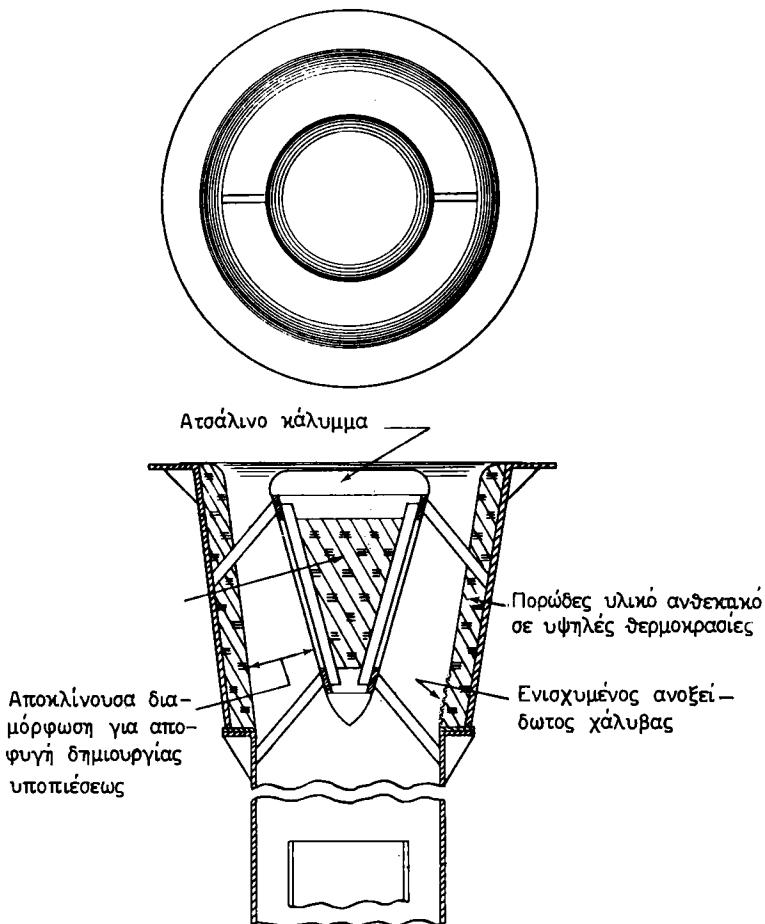
Ο τρόπος τοποθετήσεως των σιγαστήρων μέσα στους οχετούς φαίνεται στο σχήμα 8.4γ που απεικονίζει πραγματική εγκατάσταση του πλοίου «Euroliner». Όπως φαίνεται, για την κατασκευή αυτή έχει τοποθετηθεί κατάλληλο για απορρόφηση θορύβου υλικό, ικανού πάχους, ενώ ο όλος οχετός έχει τεθλασμένο σχήμα, ώστε η απόσβεση του θορύβου να είναι πληρέστερη.



Σχ. 8.4γ.

Οχετοί εξαγωγής καυσαερίων πλοίου που κινείται με αεριοστροβίλους.

Στο σχήμα 8.4δ παρουσιάζεται μια άλλη διάταξη αποσβέσεως του θορύβου, η οποία χρησιμοποιείται ευρύτατα, κυρίως σε πολεμικά πλοία.



**Σχ. 8.46.**  
Σιγαστήρας θορύβου σε εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το χρησιμοποιούμενο για απόσβεση του θορύβου υλικό πρέπει να αντέχει στις υψηλές θερμοκρασίες των καυσαερίων, καθώς επίσης και στις κάθε είδους διαβρώσεις. Η τελευταία αυτή απαίτηση, η αντοχή δηλαδή στις μηχανικές διαβρώσεις, είναι πολύ σημαντική, κυρίως στους οχετούς εισαγωγής αέρα, γιατί, στην αντίθετη περίπτωση, υφίσταται κίνδυνος να συμπαρασυρθούν μεταλλικά οξείδια στους οχετούς από τον αέρα, και να προκαλέσουν ανεπανόρθωτες βλάβες στο συμπιεστή.

Τέλος, όπως και στην περίπτωση των διατάξεων προς αποφυγή εισόδου αλάτων, έτσι και τα συστήματα μειώσεως τού θορύβου έχουν σάν αποτέλεσμα αύξηση της πτώσεως πιέσεως στους οχετούς, λόγω μειώσεως της επιφάνειας ροής και συνεπώς ο σχεδιαστής μηχανικός έχει να συμβιβάσει ένα ακόμη ζεύγος αλληλοσυγκρουομένων απαιτήσεων, τη μείωση του θορύβου και την αποφυγή πτώσεως της πιέσεως.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΑΤΟ

### Η ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΣΤΟ ΣΚΑΦΟΣ

#### 9.1 Γενικά.

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται ο τρόπος εγκαταστάσεως του αεριοστροβίλου στο σκάφος, δηλαδή η θέση που θα τοποθετηθεί η μηχανή, ο τρόπος συνδέσεώς της με την έλικα και ο τρόπος εδράσεώς της επάνω στην υπόλοιπη κατασκευή.

Λέγοντας θέση της μηχανής εννοούμε κυρίως τις συντεταγμένες της ως προς το σκάφος. Θα τοποθετηθεί δηλαδή η μηχανή στο πρυμναίο ή στο μεσαίο τμήμα, κάτω ή επάνω στο κύριο κατάστρωμα, στο δεξιό ή στο αριστερό μέρος; Η θέση της μηχανής συσχετίζεται βέβαια με τη θέση άλλων χώρων που συνδέονται άμεσα ή έμμεσα με αυτήν, όπως είναι οι χώροι των βοηθητικών μηχανημάτων, της έλικας, των δεξαμενών καυσίμου, των ενδιαιτήσεων του προσωπικού κλπ.

Ο τρόπος συνδέσεως της μηχανής με την έλικα επιδρά σημαντικά στην εκλογή της θέσεως της μηχανής. Έτσι, αν χρησιμοποιείται ηλεκτρική σύνδεση, τότε ο αεριοστρόβιλος θα μπορούσε θεωρητικά να τοποθετηθεί οπουδήποτε επάνω στο πλοίο, ενώ, αν η σύνδεση είναι μηχανική, τότε συνιστάται να τοποθετηθεί κατά το δυνατό πλησιέστερα προς την έλικα.

Ο τρόπος εδράσεως της μηχανής αφορά την υποστήριξη του βάρους της από το σκάφος, καθώς και τις επιδράσεις της ώσεως και ροπής, των θερμικών διαστολών, των σχετικών κινήσεων του πλοίου λόγω θαλασσοταραχής και των λοιπών επίσης παραγόντων που θα εξετασθούν λεπτομερώς παρακάτω.

#### 9.2 Εκλογή της θέσεως της μηχανής.

Η εκλογή της θέσεως της μηχανής, ανεξάρτητα από τον τύπο της, διέπεται από ορισμένους κανόνες γενικής ισχύος. Έτσι, π.χ. οι βραδύστροφες Diesel που συνδέονται απ' ευθείας με τον άξονα, πρέπει να τοποθετηθούν σε τέτοια θέση στο σκάφος, ώστε ο άξονάς τους να συμπίπτει με τη διαμήκη γραμμή συμμετρίας του πλοίου, ενώ σε πλοία που χρησιμοποιούν ενδιάμεση μετάδοση (π.χ. γρανάζια ή V-drive), αυτό δεν είναι υποχρεωτικό.

Η τοποθέτηση της μηχανής στο μεσαίο ή πρυμναίο τμήμα του πλοίου επιδρά άμεσα στο μήκος του ελικοφόρου άξονα. Όταν η μηχανή τοποθετείται στο πρυμναίο τμήμα, τότε ο ελικοφόρος άξονας είναι βραχύτερος, ελαφρότερος και καταλαμβάνει μικρότερο συναλικό όγκο.

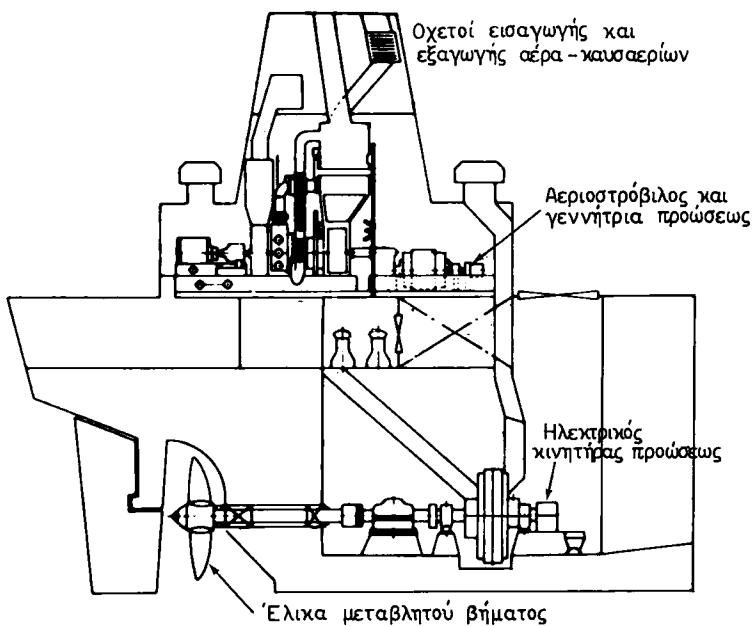
Παρ' όλα αυτά τα φανερά πλεονεκτήματα, πολλές φορές η μηχανή τοποθετείται

στο μεσαίο τμήμα του πλοίου, επειδή είναι επιθυμητό οι χώροι του μηχανοστασίου και οι χώροι ενδιαιτήσεως του προσωπικού να αποτελούν ενιαίο σύνολο.

Εξετάζοντας το θέμα από καθαρά ναυπηγική πλευρά, η κύρια μηχανή προώσεως αντιπροσωπεύει ένα μεγάλο συγκεντρωμένο φορτίο και συνεπώς συνιστάται η τοποθέτησή του κατά το δυνατό χαμηλότερα (διατήρηση της αρχικής ευστάθειας) και περίπου στο μέσο του πλοίου (αποφυγή δημιουργίας διαγωγής και εγκάρσιας κλίσεως).

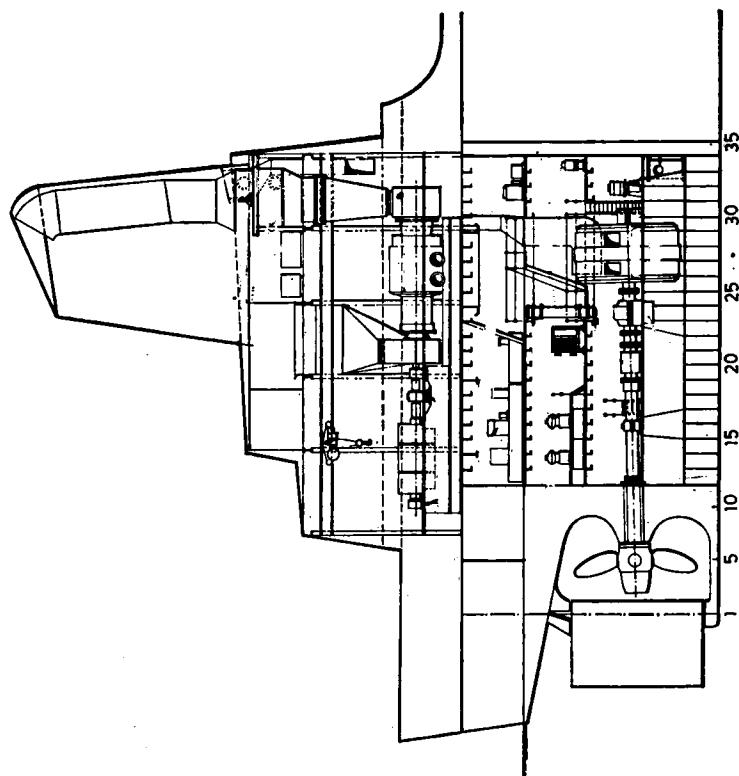
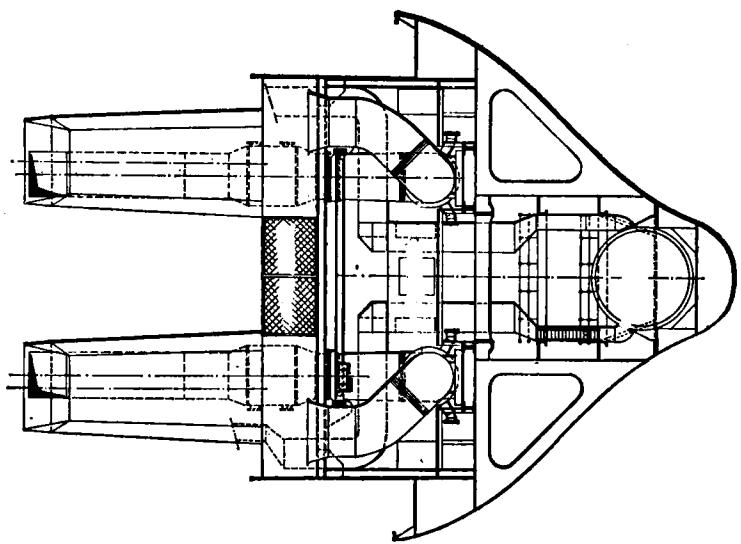
Ειδικά οι αεριοστρόβιλοι, λόγω του σχετικά μικρού βάρους τους ανά ίππο παραγόμενης ισχύος, δεν επιβάλλουν σοβαρούς περιορισμούς ως προς τη θέση και έτσι τοποθετούνται ακόμη και πάνω από το κύριο κατάστρωμα.

Στο σχήμα 9.2α φαίνεται η διάταξη των μηχανημάτων προώσεως ενός δεξαμενοπλοίου, του οποίου η κύρια μηχανή (αεριοστρόβιλος) είναι τοποθετημένη επάνω στο κύριο κατάστρωμα. Όπως φαίνεται, η κύρια μηχανή συνδέεται με ηλεκτρογεννήτρια, η οποία παράγει ρεύμα και κινεί τον κινητήρα προώσεως. Ανάλογη είναι η εικόνα του σχήματος 9.2β. Αξίζει να σημειωθεί ότι και στα δύο σχήματα οι χρησιμοποιούμενοι αεριοστρόβιλοι είναι βιομηχανικής προελεύσεως, δηλαδή πολύ βαρύτεροι από τους σχεδόν αποκλειστικά χρησιμοποιούμενους σε νέες κατασκευές αεριοστροβίλους αεροπορικής προελεύσεως.



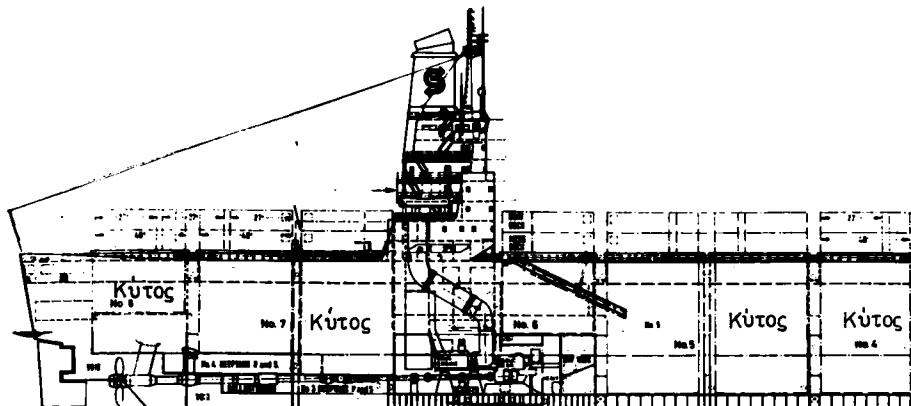
Σχ. 9.2α.  
Εγκατάσταση προώσεως με αεριοστροβίλους.

Σημαντική για την εκλογή της θέσεως των αεριοστροβίλων είναι η επίπτωσή της στο μήκος των οχετών του αέρα. Έτσι, αν ο αεριοστρόβιλος βρίσκεται ψηλά (σε σχέση προς την τρόπιδα), το μήκος των οχετών εισαγωγής αέρα και εξαγωγής καυσαερίων ελαπτώνεται καθώς και ο καταλαμβανόμενος από αυτούς όγκος και το βάρος τους.



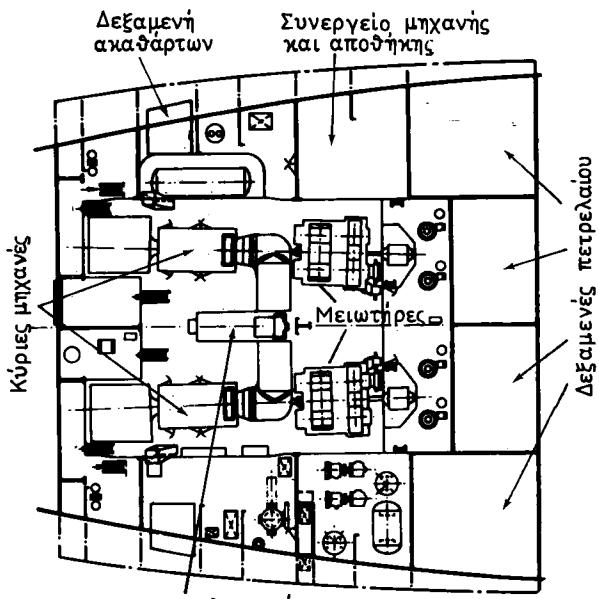
**Σχ. 92β.**  
Τομή και πλάγια όψη εγκαταστάσεως προώσεως με αεροστροβίλους.

Το σχήμα 9.2γ, που παρουσιάζει μια πλάγια όψη και τη διάταξη μηχανοστασίου του «Euroliner», του πρώτου πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που κινείται με αεριοστροβίλους, αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα. Έτσι, με κατάλληλη τοποθέτηση του άκρου του συμπιεστή του αεριοστροβίλου ακριβώς κάτω από το



Γενική άποψη σε διαμήκη όψη

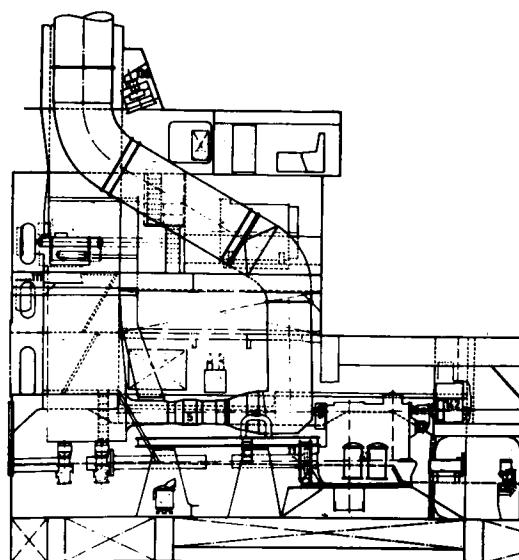
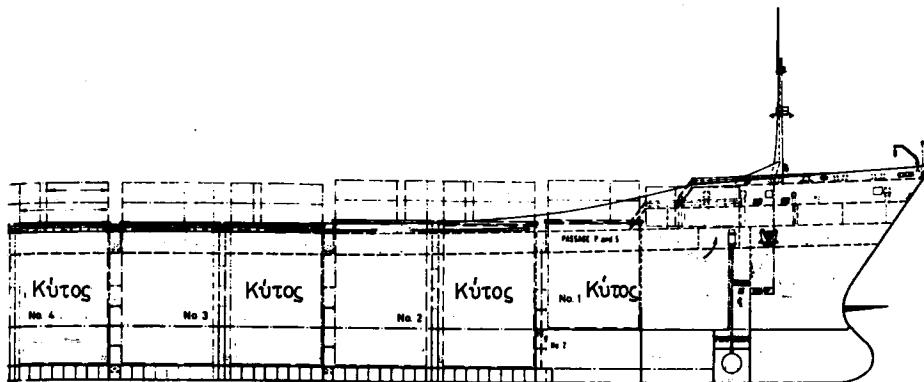
| G.T.S. EUROLINER   |              |
|--|--------------|
| Το πρώτο πλοίο εμπορευματοκιβωτίων που κινείται με αεριοστροβίλους |              |
| Ολυκό μήκος  | 796 ft 6 in  |
| Μήκος μεταξύ καθέτων   | 734 ft 11 in |
| Πλάτος   | 96 ft 5 in   |
| Υψος μέχρι το ανώτερο κατάστρωμα                                   | 63 ft 0 in   |
| Υψος μέχρι το κύριο κατάστρωμα                                     | 54 ft 2 in   |
| Βάθισμα  | 32 ft 6 in   |
| Εκτόπισμα  | 23100 tons   |
| Υπηρεσιακή ταχυτητά  | 25 knots     |

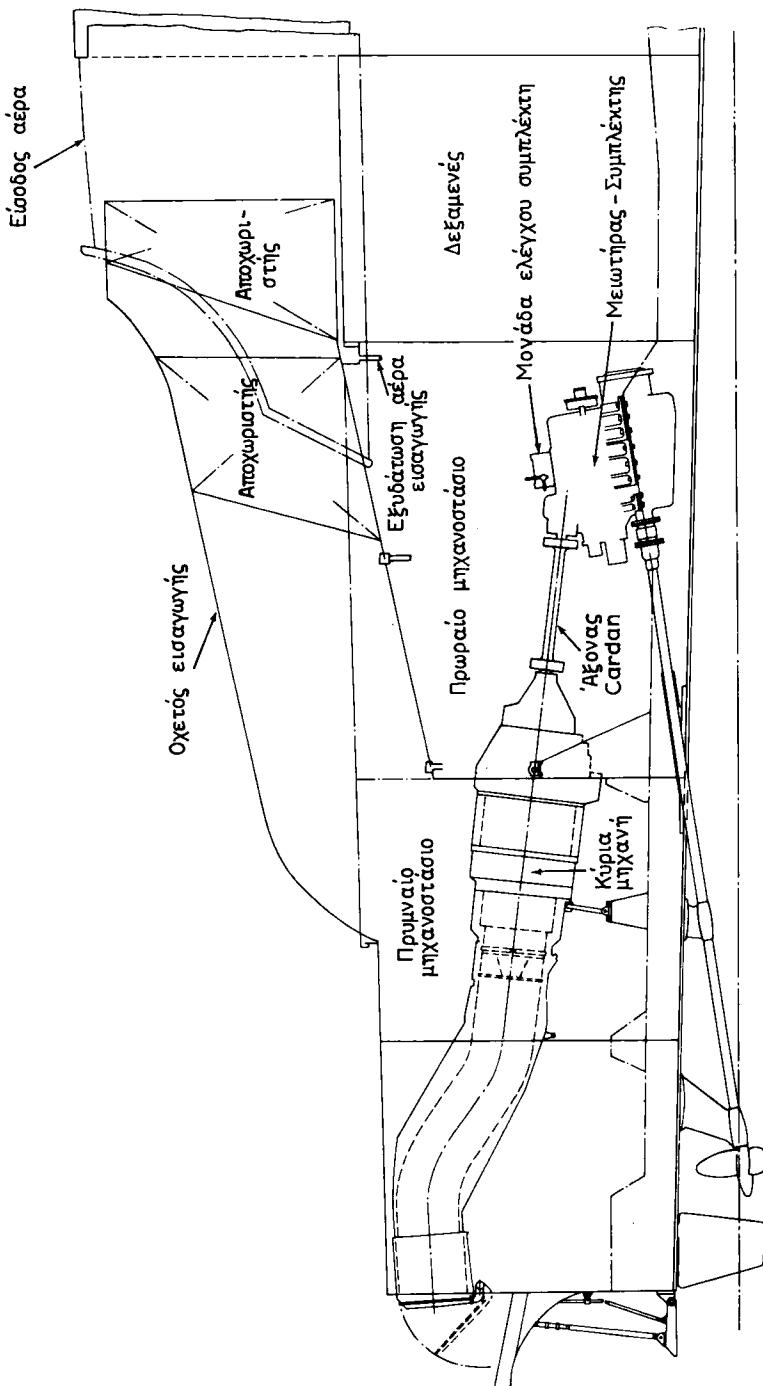


Τμηματική κάτοψη μηχανοστασίου

**Σχ. 9.2γ.**  
Λεπτομέρειες εγκαταστάσεως προώσεως με αεριοστροβίλους.

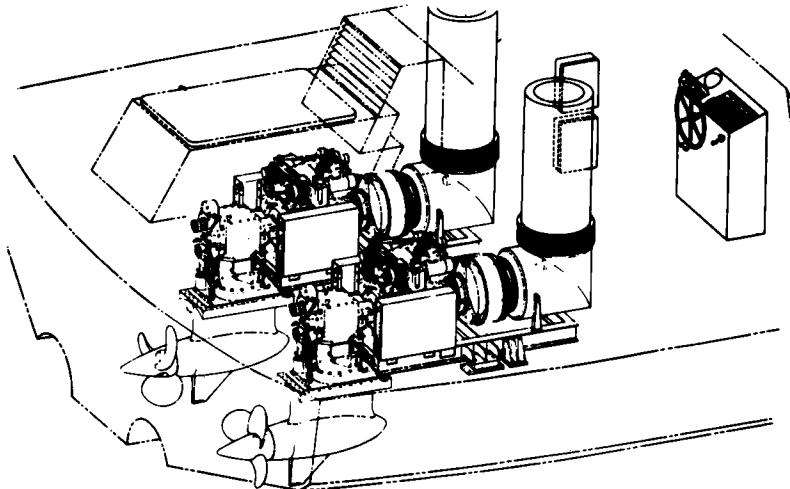
πρυμναίο άκρο της υπερκατασκευής, ελαχιστοποιείται το μήκος των οχετών αέρα, ενώ το τμήμα ισχύος του αεριοστροβίλου βρίσκεται στραμμένο προς την πρώρα, ο μειωτήρας σε θέση μεταξύ της μηχανής και της πρώρας και κάτω από όλα αυτά ο ελικοφόρος άξονας.



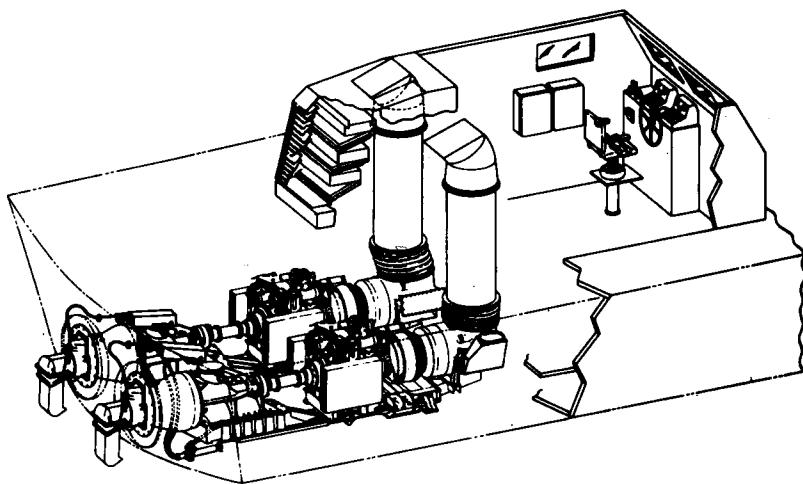


**Σχ. 9.26.**  
Αεριστρόβιλοι σε μικρό πολεμικό πλοίο.

Στα σχήματα 9.2δ, 9.2ε και 9.2στ παρουσιάζονται παραδείγματα μικρών πλοίων που κινούνται με αεριοστροβίλους αεροπορικής προέλευσης. Το πρώτο είναι ένα περιπολικό κινούμενο με αεριοστρόβιλο τύπου Proteus ο οποίος κινεί μία έλικα μέσω Vee-drive\*. Σημειώνεται ότι ο άξονας ισχύος του αεριοστροβίλου είναι προς το μέρος του συμπιεστή.



**Σχ. 9.2ε.**  
Αεριοστρόβιλοι σε περιπολικό πλοίο.



**Σχ. 9.2στ.**  
Αεριοστρόβιλοι σε πλοίο αναψυχής.

\* Vee-drive ή V-drive ονομάζονται οι μειωτήρες εκείνοι, στους οποίους ο προερχόμενος από τη μηχανή άξονας και ο ελικοφόρος άξονας σχηματίζουν οξεία γωνία ή πλαγιαστό το γράμμα V του λαπινικού αλφαριθμητικού, από όπου και η ονομασία τους. Με τη διάταξη αυτή επιτυγχάνεται πληρέστερη εκμετάλλευση του διατιθέμενου χώρου.

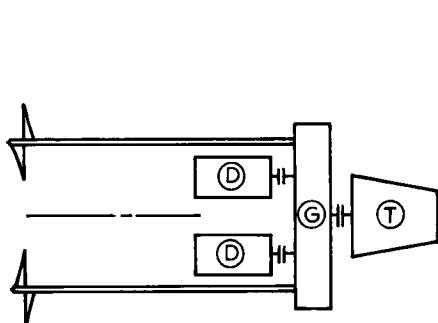
Στα άλλα δύο σχήματα οι κινητήριες μηχανές είναι τύπου Avco-Lycoming. Επισημαίνεται ότι στο σχήμα 9.2στ το πλοίο δεν έχει έλικες αλλά κινείται με εκτόξευση δέσμης νερού (water-jet).

Πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι η θέση των αεριοστροβίλων εκλέγεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι μηχανές να μην παρουσιάζουν υπερβολικές κλίσεις ως προς το οριζόντιο επίπεδο, κυρίως για λόγους εξασφαλίσεως συνεχούς λιπάνσεως. Π.χ. για τον αεριοστρόβιλο LM 2500 της General Electric προβλέπεται μέγιστη επιτρεπόμενη γωνία συνεχούς οριζόντιας κλίσεως  $13^{\circ}$  κατά τον άξονα συμμετρίας του πλοίου και  $15^{\circ}$  κατά τον εγκάρσιο άξονα, ενώ για χρονικό διάστημα 10 δευτερολέπτων οι γωνίες μπορεί να φθάσουν μέχρι  $45^{\circ}$ .

Οι άξονες των αεριοστροβίλων είναι πάντοτε παράλληλοι προς το διαμήκη άξονα του πλοίου. Αν και αυτό συμβαίνει κατά κανόνα με όλους τους τύπους των μηχανών, στους αεριοστροβίλους είναι απόλυτα απαραίτητο. Σε αντίθετη περίπτωση, οι μεγάλες περιστροφικές τους ταχύτητες θα είχαν σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη αυξημένων ροπών στους τριβείς και τη βάση της μηχανής, λόγω επιταχύνσεως από τις συνήθως μεγάλες γωνίες εγκάρσιας κλίσεως του πλοίου.

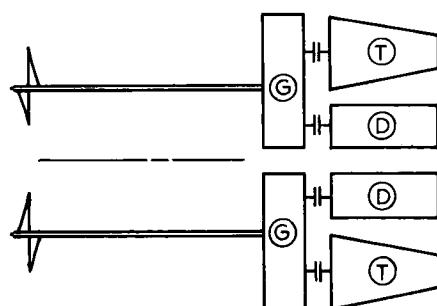
Οι σύνθετες εγκαταστάσεις προώσεως (CODAG ή CODOG κλπ.) δεν παρουσιάζουν ιδιάτερα προβλήματα, πέρα από το ότι ο ίδιος ελικοφόρος άξονας πρέπει να παίρνει κίνηση κατά διαφορετικούς τρόπους. Προς ικανοποίηση της απαιτήσεως αυτής έχουν προταθεί και πραγματοποιηθεί αρκετοί διαφορετικοί συνδυασμοί μηχανών Diesel και αεριοστροβίλων που κινούν κοινό άξονα.

Δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα παρουσιάζονται στα σχήματα 9.2ζ και 9.2η. Έτσι, το σχήμα 9.2ζ παρουσιάζει τη διάταξη των κανονιοφόρων PE 84 του Αμερικανικού Ναυτικού. Κάθε άξονας κινείται από την αντίστοιχη μηχανή Diesel που ευρίσκεται πίσω από το μειωτήρα, ενώ, όταν λειτουργεί μόνος του ο αεριοστρόβιλος που ευρίσκεται μπροστά από το μειωτήρα, και οι δύο ελικοφόροι κινούνται από αυτόν.



Σχ. 9.2ζ.

Εγκατάσταση προώσεως με Diesel  
και αεριοστροβίλους.



Σχ. 9.2η.

Εγκατάσταση προώσεως με Diesel  
και αεριοστροβίλους.

Στο σχήμα 9.2η φαίνεται η διάταξη προώσεως (CODAG) των πλοίων τύπου Hamilton της Αμερικανικής Ακτοφυλακής. Κάθε άξονας κινείται από την αντίστοιχη μηχανή Diesel **και** αεριοστρόβιλο που βρίσκονται η μια παραπλεύρως του άλλου, μπροστά από τον κοινό τους μειωτήρα.

### 9.3 Σύνδεση του αεριοστροβίλου με την έλικα.

Η σύνδεση των αεριοστροβίλων με την έλικα πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός συμπλέκτη, παρόμοιου προς τους χρησιμοποιούμενους στις εγκαταστάσεις προώσεως των ντηζελοκινήτων πλοίων, σε αντίθεση προς τα ατμοκίνητα, όπου σπάνια χρησιμοποιείται συμπλέκτης.

Ας εξετάσομε τις διαφορές που υπάρχουν στους συμπλέκτες των διαφόρων ειδών κυρίων μηχανών. Ως γενική αρχή ισχύει ότι, όταν δύο ή περισσότερες μηχανές ή διαφορετικά είδη μηχανών κινούν τον ίδιο ελικοφόρο άξονα, κάθε μια τους διαθέτει το δικό της συμπλέκτη, με τη βοήθεια του οποίου απεμπλέκεται όταν δεν εργάζεται και συμπλέκεται όταν απαιτείται.

Οι συμπλέκτες που χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις πολλαπλών ντηζελομηχανών, επειδή οι μηχανές αυτές έχουν απαίτηση αντίστροφης κινήσεως για την αναπόδιση του πλοίου, είναι διαφορετικοί από τους χρησιμοποιούμενους στις εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων καί CODOG, όπου είτε χρησιμοποιείται έλικα μεταβλητού βήματος είτε η αναπόδιση του πλοίου επιτυγχάνεται μόνο με τη μηχανή Diesel. Όπως προαναφέρθηκε, η ύπαρξη συμπλεκτών δεν είναι αναγκαία στις εγκαταστάσεις ατμού επειδή δεν υπάρχουν πολλαπλοί στρόβιλοι και επειδή συνήθως υπάρχει ιδιαίτερη πτερύγωση του στροβίλου ανάποδα\*.

Αυτό δεν συμβαίνει προκειμένου για εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων όπου δεν υπάρχει αεριοστρόβιλος ανάποδα, οπότε, εφ' όσον η έλικα είναι σταθερού βήματος, υπάρχουν ξεχωριστοί συμπλέκτες που συνδέουν τον αεριοστρόβιλο με την έλικα μέσω του μειωτήρα, ανάλογα με την επιθυμητή φορά περιστροφής (πρόσω ή ανάποδα).

Υπάρχουν πολλών ειδών συμπλέκτες, βασικός σκοπός των οποίων είναι η εμπλοκή και απεμπλοκή μιας κινητήριας μηχανής με τον ελικοφόρο άξονα, με την παρεμβολή ή όχι μειωτήρα. Οι συμπλέκτες αυτοί διαφοροποιούνται μεταξύ τους.

α) Αν η εμπλοκή (και η απεμπλοκή) μηχανής-άξονα γίνεται μόνο εν στάσει (μηχανή κρατημένη και άξονας ακίνητος).

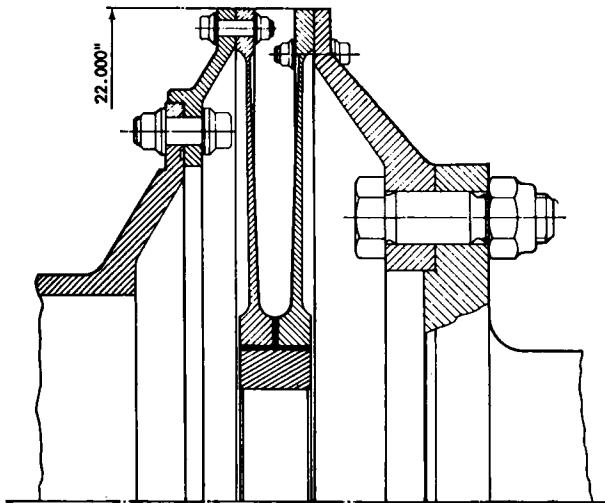
β) Αν η επιπρόσθετη εμπλοκή (ή αντίστοιχη απεμπλοκή) μιας μηχανής, στην περίπτωση πολλαπλών μηχανών, είναι δυνατό να επιτευχθεί χωρίς άμεση επίπτωση στον άξονα, όπως π.χ. κράτησή του.

γ) Αν η σύνδεση και αποσύνδεση των μηχανών μπορεί να επιτευχθεί υπό συνθήκες ισχυρών αντιθέτων ροπών του άξονα, π.χ. όταν ο άξονας στρέφεται ανάποδα, να μπορεί να συνδεθεί μηχανή περιστρεφόμενη κατά αντίθετη φορά, οπότε βέβαια θα επενεργήσει και σαν φρένο.

Τυπικό παράδειγμα συμπλέκτη της υποκατηγορίας (α), όπως παραπάνω, είναι αυτό του σχήματος 9.3a, που περιλαμβάνει επιπρόσθετα και μια βοηθητική ηλεκτρογενήτρια, η οποία λειτουργεί εν όρμω, οπότε βεβαίως η πρόωση έχει αποσυνδεθεί από το στρόβιλο.

Ο συμπλέκτης αποτελείται από δύο βασικά τμήματα, το κινητήριο και το οδηγούμενο με εξωτερική και αντίστοιχη εσωτερική οδόντωση, η οποία καθιστά δυνατή την εμπλοκή των δύο τμημάτων, καθώς το ένα κινείται αξονικά προς συνάν-

\* Υφίστανται βέβαια εγκαταστάσεις ατμοστροβίλων πολλαπλών κελυφών, όπως στρόβιλος υψηλής πιέσωσης, χαμηλής πιέσεως και πορείας, αλλά αυτοί θεωρούνται ότι αποτελούν ενιαίο σύνολο και όχι πολλαπλούς στρόβιλους.



Σχ. 9.3α.

Χαρακτηριστικός τύπος συμπλέκτη χρησιμοποιούμενος σε εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων.

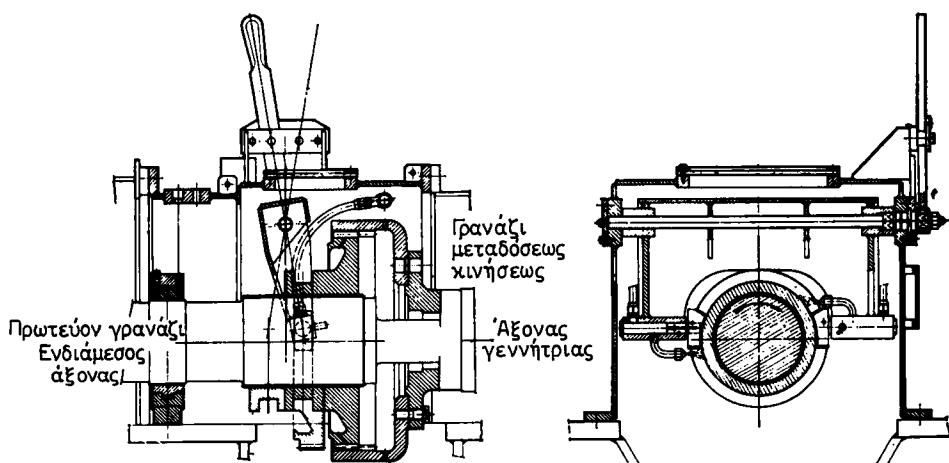
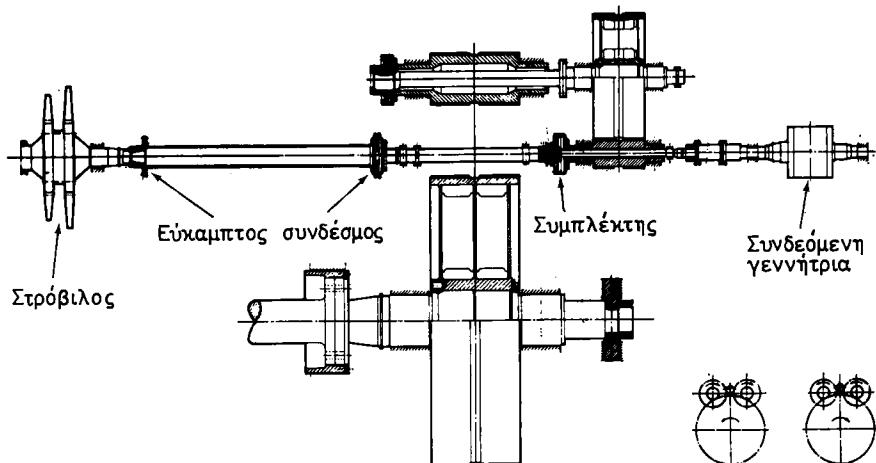
τηση του άλλου. Στο σχήμα 9.3β φαίνονται λεπτομέρειες του τρόπου με τον οποίο επιτυγχάνεται η αξονική αυτή μετατόπιση.

Οι συμπλέκτες της υποκατηγορίας (β) χρησιμοποιούνται όταν δύο ή περισσότερες μηχανές κινούν τον ίδιο άξονα, όπως π.χ. στην περίπτωση των CODOG ή στην περίπτωση πολλαπλών αεριοστροβίλων. Επειδή είναι ανεπιθύμητο να διακόπτεται η πρόωση του πλοίου όταν αλλάζει ο αριθμός των μηχανών που βρίσκονται σε λειτουργία, ο συμπλέκτης που συνδέει κάθε μηχανή στον κοινό μειωτήρα στροφών είναι κατασκευασμένος έτσι, ώστε να «συγχρονίζεται» η ταχύτητα της νεοπροστιθέμενης μηχανής προς την ταχύτητα του ήδη στρεφόμενου ελικοφόρου άξονα. Ο συγχρονισμός αυτός επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των πολλαπλών δίσκων από τους οποίους αποτελείται ο συμπλέκτης και με τους οποίους ο με μικρότερη ταχύτητα στρεφόμενος άξονας επιταχύνεται μέχρι την ταχύτητα του ταχύτερα περιστρεφόμενου.

Στο σχήμα 9.3γ φαίνονται οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες ενός συγχρονιζόμενου συμπλέκτη, που έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα σε μοντέρνες εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων. Όταν οι ταχύτητες των δύο προς σύνδεση αξόνων είναι οι ίδιες, τότε οι προεξόχουσες καστάνιες του ενός τμήματος του συμπλέκτη συμπίπτουν στις εσοχές του άλλου τμήματος.

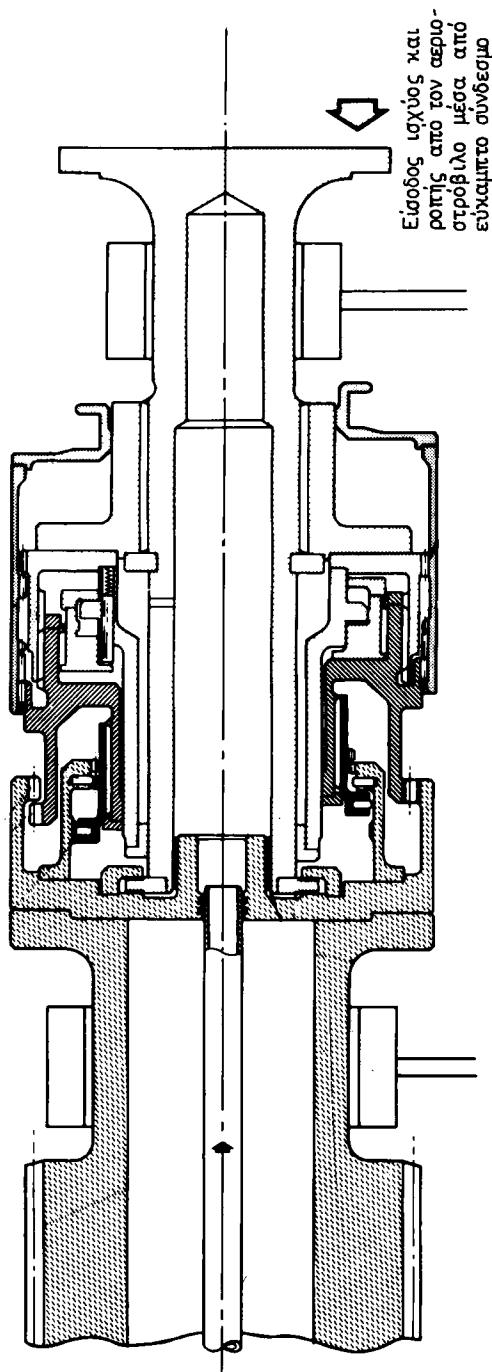
Στην περίπτωση ελίκων σταθερού βήματος, οπότε αναπόφευκτα υφίσταται μειωτήρας-αναστροφέας και η κινητήρια μηχανή στρέφεται πάντοτε κατά μια φορά, παρίσταται λειτουργικά ανάγκη συνδέσεως και αποσυνδέσεως των μηχανών υπό πολύ έντονες συνθήκες. Έτσι, π.χ. σε κίνηση ανάποδα ολοταχώς, ενώ το πλοίο κινείται πρόσω, ο αεριοστρόβιλος εξακολουθεί να στρέφεται με την ίδια φορά, ενώ ο συμπλέκτης επενεργεί σαν φρένο, μεταδίδοντας την απαραίτητη ροπή για να σταματήσει τον άξονα και συγχρόνως να τον επιταχύνει προς την αντίθετη φορά περιστροφής.

Τέτοιου είδους συμπλέκτες, χρησιμοποιούμενοι και σε μηχανές Diesel, αποτε-

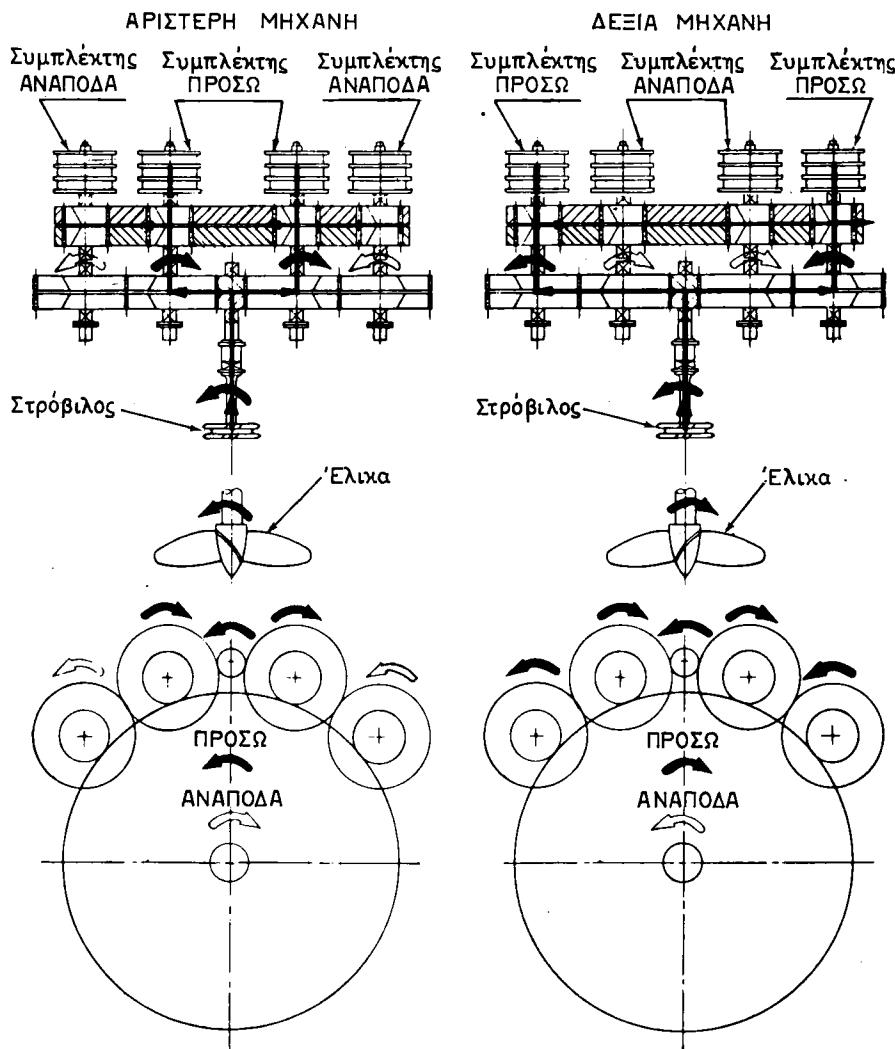


**Σχ. 9.3β.**  
Διαφορετικός τύπος συμπλέκτη.

λούνται από ένα τροχό (σαμπρέλα), ο οποίος γεμίζει με αέρα και πιέζει ένα τύμπανο τριβής, οπότε, ανάλογα με την υφιστάμενη μέσα στον τροχό πίεση, σημειώνεται ή όχι σχετική ολίσθηση των προς σύνδεση αξόνων. Αν και οι πιό σύγχρονες εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων χρησιμοποιούν πια έλικες μεταβλητού βήματος, μπορεί να υποστηριχθεί ότι όπου αυτό δεν συμβαίνει, χρησιμοποιούνται οι παραπάνω περιγραφόμενοι συμπλέκτες. Στα σχήματα 9.3δ, 9.3ε και 9.3στ παρουσιάζεται η διαγραμματική διάταξη και οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες ενός τέτοιου είδους συμπλέκτη.

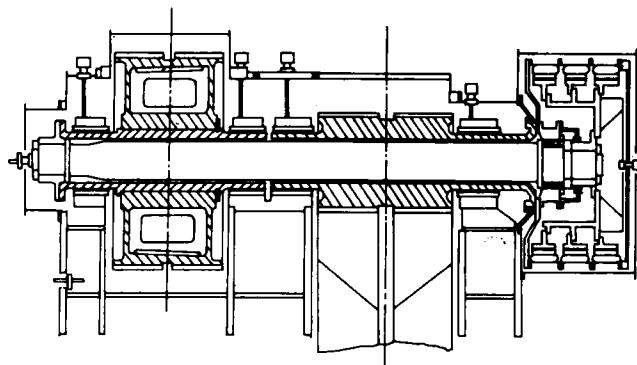


**Σχ. 9.3γ.**  
Αυτοσυγχρονίζουμενος συμπλέκτης τύπου S.S.S.

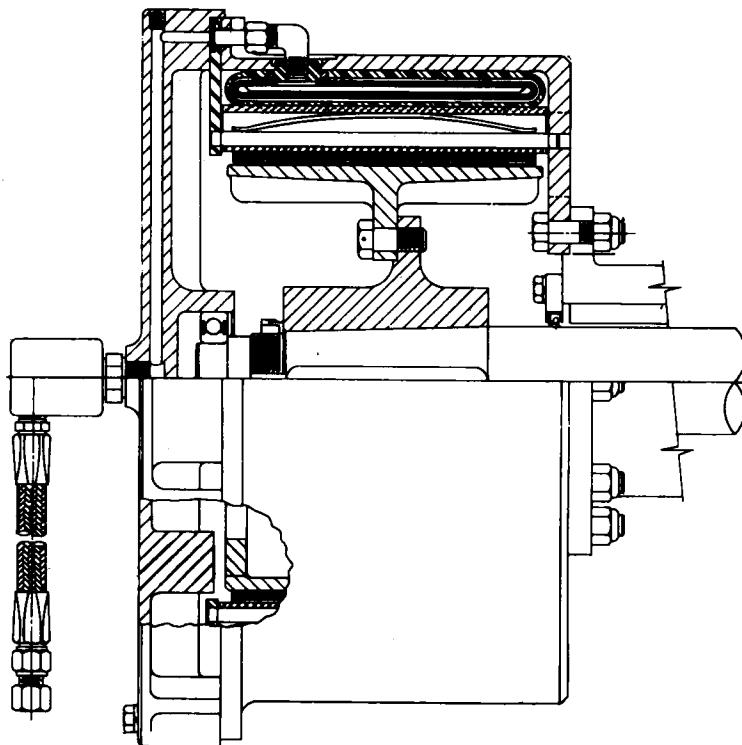


Σχ. 9.36.

Διάγραμμα συμπλέξεως περισσοτέρων μηχανών σε κοινό ελικοφόρο άξονα.



**Σχ. 9.3ε.**  
Κατασκευαστικές λεπτομέρειες συμπλέκτη.



**Σχ. 9.3στ.**  
Εγκάρσια τομή συμπλέκτη αέρα.

#### 9.4 Η έδραση του αεριοστροβίλου επάνω στο σκάφος.

Ο αεριοστρόβιλος, όπως και τα λοιπά είδη μηχανών, επικάθεται σε ειδικά διαμορφωμένο τμήμα της στερεάς κατασκευής του πλοίου, με τη βάση εδράσεως ή στηρίξεώς του.

Στην απλούστατη μορφή της, όπως π.χ. για την περίπτωση της κινητήριας μηχανής μιας βάρκας, η βάση εδράσεως αποτελείται από τους κοχλίες συνδέσεως της μηχανής στο σκάφος και τις απαραίτητες μεταλλικές προσθήκες για την ευθυγράμμιση της μηχανής και του ελικοφόρου άξονα. Η πολυπλοκότητα της βάσεως αυξάνει μαζί με το μέγεθος, την ισχύ και τις στροφές της μηχανής.

Ο πρώτος αντικειμενικός σκοπός του συστήματος εδράσεως είναι η υποστήριξη του βάρους της μηχανής, ενώ, πέρα απ' αυτό, πρέπει να εξασφαλίζει και τη μετάδοση της παραγόμενης από τη μηχανή ροπής και ώσεως στο σκάφος.

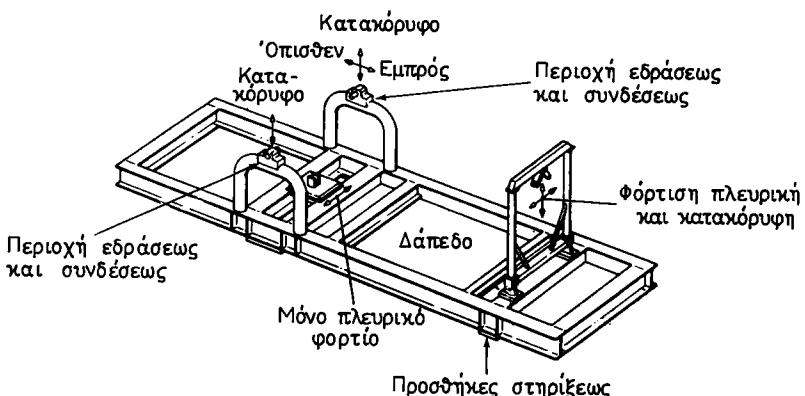
Στα πλοία, οι λόγω θαλασσοταραχής κινήσεις τους συνεπάγονται επιταχύνσεις, οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία επιπρόσθετων δυνάμεων επιταχύνσεως που και αυτές πρέπει να παραληφθούν από το σύστημα εδράσεως της μηχανής.

Καθώς οι μηχανές θερμαίνονται κατά τη λειτουργία τους, δημιουργούνται τάσεις κωλυόμενης διαστολής, οι οποίες, εφ' όσον δεν αντιμετωπισθούν, είναι δυνατό να προκαλέσουν μέχρι και σπάσιμο των μηχανών. Το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα οξύ στους αεριοστροβίλους επειδή δεν ψύχονται και επειδή η ελαφρά κατασκευή τους δεν μπορεί να αντέξει σε επιπρόσθετες τάσεις. Είναι συνεπώς προφανές ότι το σύστημα εδράσεως πρέπει να μπορεί να αντιμετωπίσει όλες τις παραπάνω συνθήκες λειτουργίας.

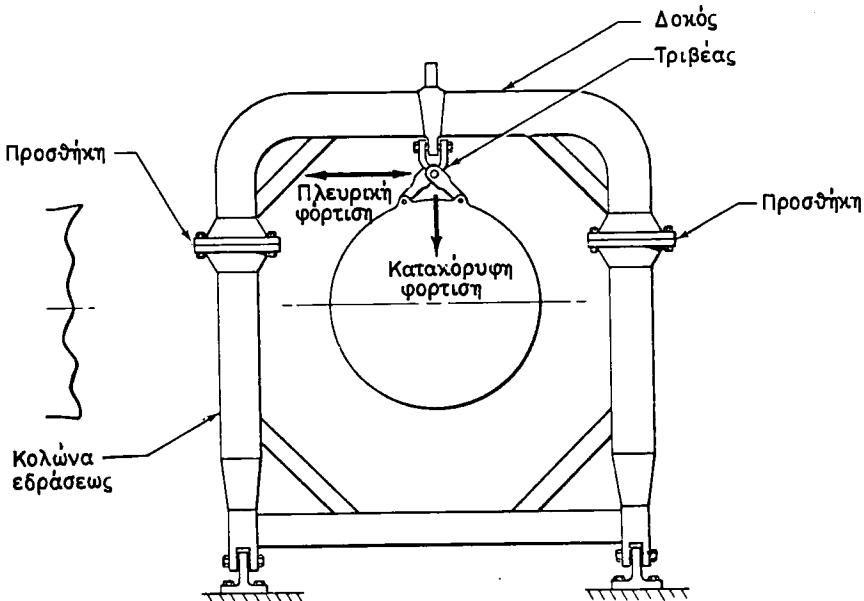
Πέρα από αυτό, οι αλλαγές της ορμής ( $m \times u$ ) του αέρα εισαγωγής και των καυσαερίων εξαγωγής δημιουργούν επιπρόσθετες δυνάμεις που και αυτές πρέπει να παραληφθούν από το σύστημα εδράσεως. Οι δυνάμεις αυτές, που οφείλονται στην αλλαγή της ορμής για την περίπτωση του αεριοστροβίλου LM 2500, είναι μέχρι 4800 λίμπρες.

Στο σχήμα 9.4α φαίνεται ένα χαρακτηριστικό σύστημα εδράσεως αεριοστροβίλου, αποτελούμενο από την κυρίως βάση και τρία στοιχεία εδράσεως της μηχανής, ενώ στο σχήμα 9.4β φαίνεται σε λεπτομέρειες το ένα από τα στοιχεία εδράσεως.

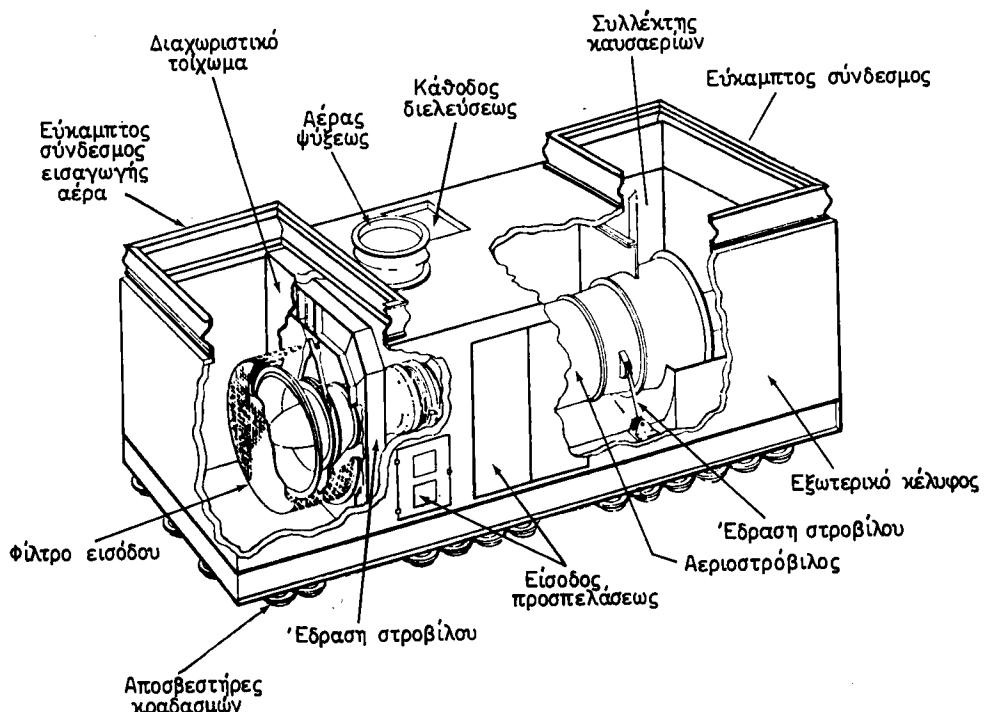
Στο σχήμα 9.4γ παρουσιάζεται ο αεριοστρόβιλος LM 2500 και ο τρόπος εδράσεώς του σε ένα εμπορικό πλοίο, ενώ στο σχήμα 9.4δ φαίνεται ο ίδιος αεριοστρό-



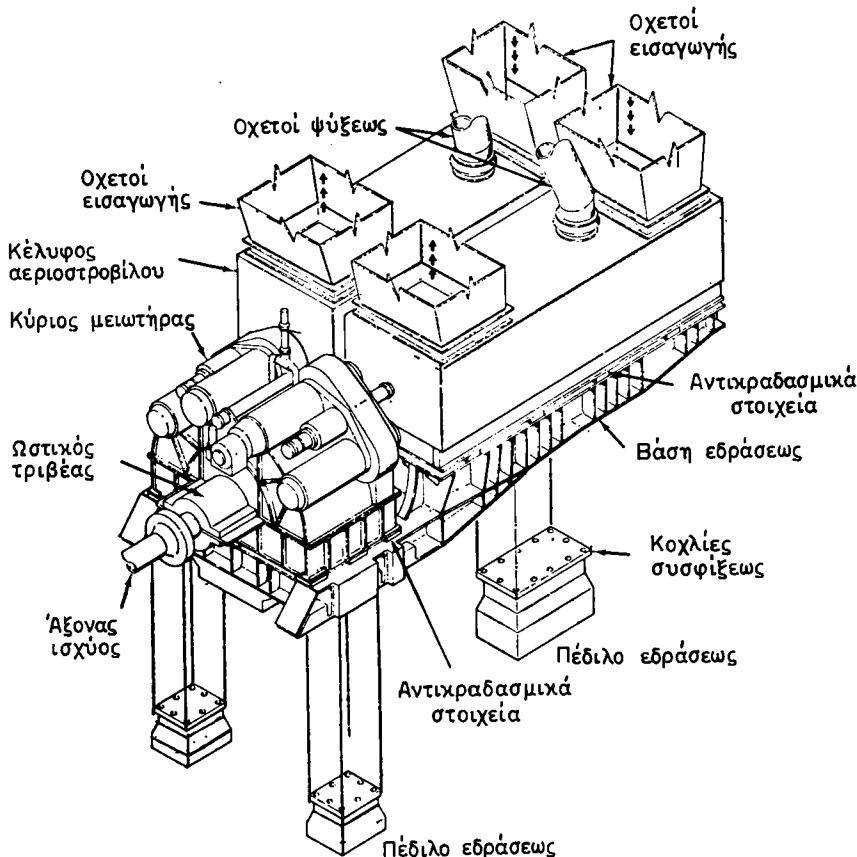
**Σχ. 9.4α.**  
Σύστημα εδράσεως αεριοστροβίλου τύπου FT4.



**Σχ. 9.4β.**  
Λεπτομέρειες συστήματος εδράσεως αεριοστροβίλου.



**Σχ. 9.4γ.**  
Εγκατάσταση αεριοστροβίλου τύπου LM 2500.



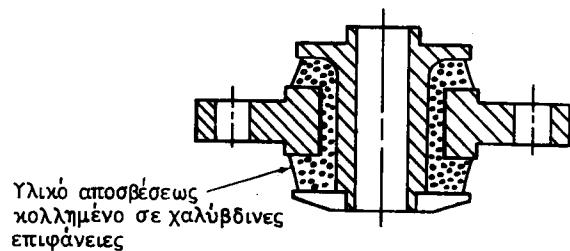
**Σχ. 9.46.**  
Τρόπος εδράσεως αεριοστροβίλων σε πολεμικό πλοίο.

βιλος, όπως είναι εγκαταστημένος σε πολεμικό πλοίο, όπου υφίστανται μεγαλύτερες απαιτήσεις απομονώσεως του ήχου και των κραδασμών.

Οι αεριοστρόβιλοι και οι μειωτήρες στηρίζονται σε ενδιάμεσο πλαίσιο, το οποίο υποστηρίζεται από αντικραδασμικά στοιχεία και το σύνολο όλων αυτών εδράζεται σε τρεις κολώνες εδράσεως.

Τέλος, στο σχήμα 9.4ε παριστάνεται σε τομή ένας τύπος των συνήθως χρησιμοποιουμένων αντικραδασμικών στοιχείων, τα οποία αποτελούν αναπόσπαστα στοιχεία του συστήματος εδράσεως, παρεμβαλλόμενα μεταξύ αυτού και της στρειδαίας κατασκευής του πλοίου.

Το αντικραδασμικό αυτό στοιχείο αποτελείται από υλικό υψηλού συντελεστή αποσβέσεως, όπως π.χ. σκληρό ελαστικό ή ελατήριο, το οποίο στερεώνεται επάνω σε μεταλλικές επιφάνειες. Ο αριθμός των χρησιμοποιουμένων στοιχείων ποικίλει, κυμαινόμενος από 4 μέχρι μερικές εκατοντάδες.



**Σχ. 9.4ε.**  
Εγκάρσια τομή αντικραδασμικού στοιχείου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ

### ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

#### 10.1 Γενικά.

Οι αεριοστρόβιλοι, όπως όλες οι μηχανές εσωτερικής καύσεως, αποτελούν ένα πλήρες και ενιαίο σύνολο, στο οποίο τα βοηθητικά συστήματα, όπως αντλίες πετρελαίου, λαδιού κλπ. περιλαμβάνονται επάνω στη μηχανή.

Στα βοηθητικά βέβαια συστήματα περιλαμβάνονται και οι οχειοί καυσαερίων, οι εναλλάκτες θερμότητας (ψυγεία), οι θάλαμοι καύσεως που εξετάσθηκαν ήδη σε ιδιαίτερα προηγούμενα κεφάλαια, όχι λόγω μεγαλύτερης σπουδαιότητας από τα λοιπά βοηθητικά συστήματα, αλλά απλώς επειδή η ύλη που αφορά τα κεφάλαια αυτά είναι εκτεταμένη. Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετασθούν κυρίως τα συστήματα λιπάνσεως, προστασίας πυρός, εκκινήσεως και προστασίας από τον παγετό, καθώς και τα όσα αφορούν τα δίκτυα του αεριοστροβίλου.

#### 10.2 Σύστημα λιπάνσεως.

Το σύστημα λιπάνσεως παρέχει λάδι υπό πίεση στους τριβείς της μηχανής, ενώ συγχρόνως φίλτράρει και ψύχει το λάδι, ώστε να εξασφαλίζεται η διατήρηση των ιδιοτήτων του σε επιθυμητά επίπεδα. Ορισμένα στοιχεία του συστήματος, όπως οι αντλίες, αποτελούν τμήμα της μηχανής, από την οποία και παίρνουν κίνηση, ενώ άλλα στοιχεία, όπως οι δεξαμενές αποθηκεύσεως, οι εναλλάκτες ψύξεως κλπ. είναι σχετικά απομακρυσμένα.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο περί καυσίμων και λιπαντικών, οι αεριοστρόβιλοι αεροπορικής προελεύσεως χρησιμοποιούν συνθετικά λάδια, λόγω των γνωστών πλεονεκτημάτων τους σε σύγκριση με τα ορυκτά. Υπενθυμίζεται όμως ότι τα συνθετικά αυτά λάδια δεν μπορούν να ψυχθούν σε συνήθεις εναλλάκτες θερμότητας, γιατί επηρεάζουν και αντιδρούν με το χαλκό, ο οποίος αποτελεί το κυριότερο υλικό κατασκευής τους.

Mία μέθοδος που εφαρμόζεται στην περίπτωση αυτή, είναι η ψύξη του λαδιού από το καύσιμο καθώς αυτό οδεύει στους θαλάμους καύσεως, κυρίως όπου ο χρησιμοποιείται JP-4 και JP-5.

Η ψύξη του λαδιού λιπάνσεως με αέρα, αν και παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι απαιτεί εναλλάκτες μεγάλου όγκου, δύμως χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου ο αεριοστρόβιλος είναι εγκαταστημένος ψηλά στο σκάφος, γιατί τότε ευκολύνεται η ψύξη του λαδιού με αέρα και ελαττώνονται οι απαιτούμενες σωληνώσεις.

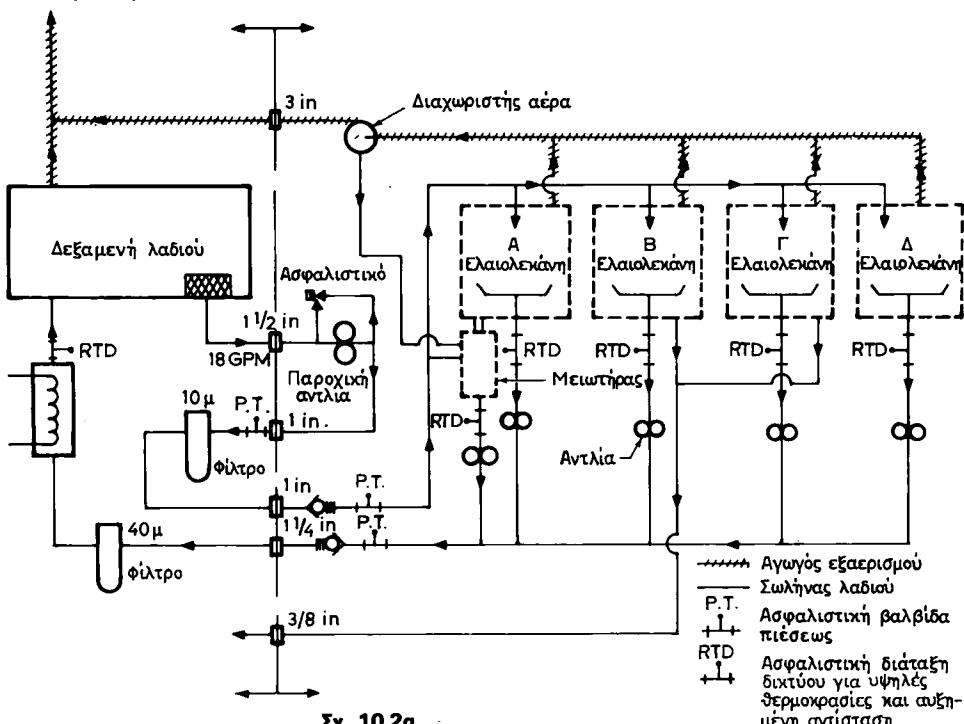
Σε αντίθεση προς τον κυρίως αεριοστρόβιλο, ο μειωτήρας στροφών χρησιμοποιεί πάντοτε ορυκτό λιπαντέλαιο, το οποίο ψύχεται είτε απ' ευθείας με θαλασσινό

νερό, είτε με γλυκό νερό, που με τη σειρά του ψύχεται με θαλασσινό. Το ορυκτό λάδι του μειωτήρα πολλές φορές χρησιμοποιείται, αφού βέβαια ψυχθεί, για την ψύξη του συνθετικού λαδιού του αεριοστροβίλου, σε ειδικό εναλλάκτη θερμότητας. Η κατανάλωση του λαδιού λιπάνσεως για τους μεγάλης ισχύος ναυτικούς αεριοστροβίλους κυμαίνεται γύρω στο 1 γαλόνι ή 3,2 kg την ημέρα, ενώ οι βιομηχανικοί αεριοστρόβιλοι έχουν μέχρι και δεκαπλάσια κατανάλωση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ιδιαίτερο πρόβλημα αποτελεί η εξαέρωση του συστήματος λιπάνσεως, ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία υψηλών πίεσεων και η υπερβολική κατανάλωση λαδιού. Η εξαέρωση πραγματοποιείται είτε στο χώρο του μηχανοστασίου, αφού εξασφαλισθεί ότι οι ατμοί του λαδιού απομακρύνονται από αυτό και δεν ενοχλούν το προσωπικό, είτε στην ελεύθερη ατμόσφαιρα, όπως είναι και η συνήθης πρακτική στις μοντέρνες κατασκευές.

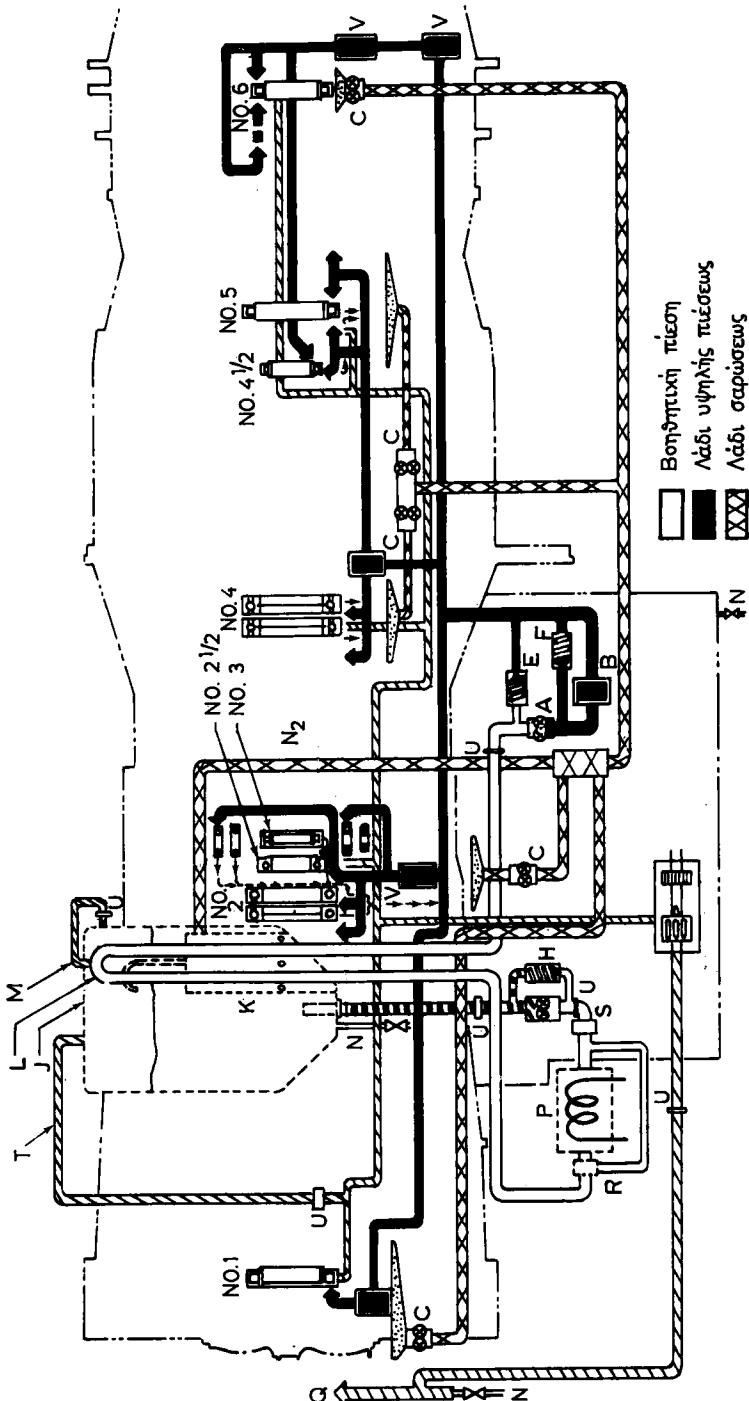
Στα σχήματα 10.2α, 10.2β και 10.2γ παρουσιάζονται τρία χαρακτηριστικά διαγράμματα δικτύων λαδιού λιπάνσεως με τα παρελκόμενά τους. Το πρώτο αφορά τον αεριοστρόβιλο LM 2500 της General Electric και τα άλλα δύο τον αεριογόνο και το στρόβιλο ισχύος του αεριοστροβίλου FT4. Όπως φαίνεται, σε αρκετά είδη αεριοστροβίλων χρησιμοποιούνται ξεχωριστά συστήματα λιπάνσεως για κάθε υπομονάδα, κυρίως για λόγους αποφυγής αλληλεξαρτήσεως των δικτύων.

Οι δεξαμενές χρήσεως του λιπαντικού, ανεξάρτητες από τη μηχανή, κατασκευάζονται από ειδικό υλικό, ώστε να συμβιβάζονται με τα συνήθως χρησιμοποιούμενα συνθετικά λάδια. Αξίζει να αναφερθεί η μικρή περιεκτικότητα των δεξαμενών αυ-Προς ατμόσφαιρα



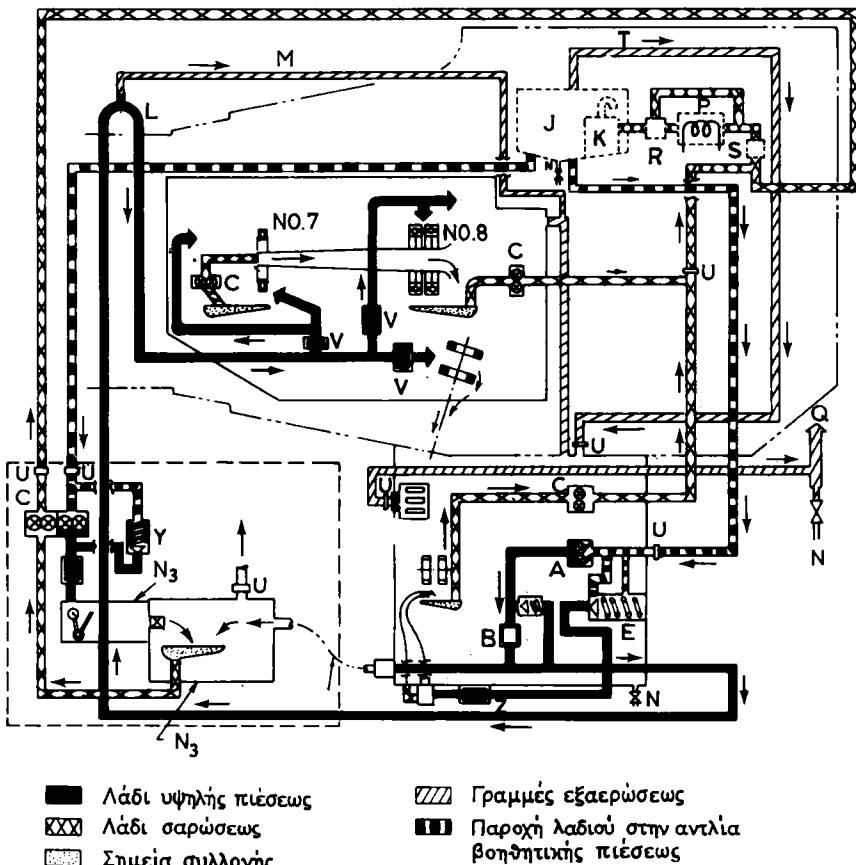
Σχ. 10.2α.

Διάγραμμα δικτύου λαδιού λιπάνσεως αεριοστροβίλου.



**Σχ. 10.2β.** Διάγραμμα δικτύου λαδιού απόπλουσεως αεροστροβιλου τύπου FT4.

Α: Κύρια αντλία πλέσεως. Β: Μεταλλικά φίλτρα. Κ: Αντλίες στρώσεως. Δ: Βοηθητικές αντλίες πλέσεως. Ε: Βαλβίδα ελέγχου πλέσεως. Φ: Παρακαμ- πήριος αγωγός. Η: Ανακουφιστική βαλβίδα βοηθητικής αντλίας. Ι: Δεξαμενή λαδιού. Κ: Εξαερωτής. Λ: Γραμμή βροχού για εξαέρωση. Ν: Εξαδάστη. Ο: Εξεριστικό. Ρ: Βαλβίδα παρακάμψεως. Σ: Βαμβακερό φίλτρο. Τ: Εξαερωτής δεξαμενής. Υ: Σύνδεσμοι. Ζ: Βοηθητικά μεταλλικά φίλτρα.



Σχ. 10.2γ.

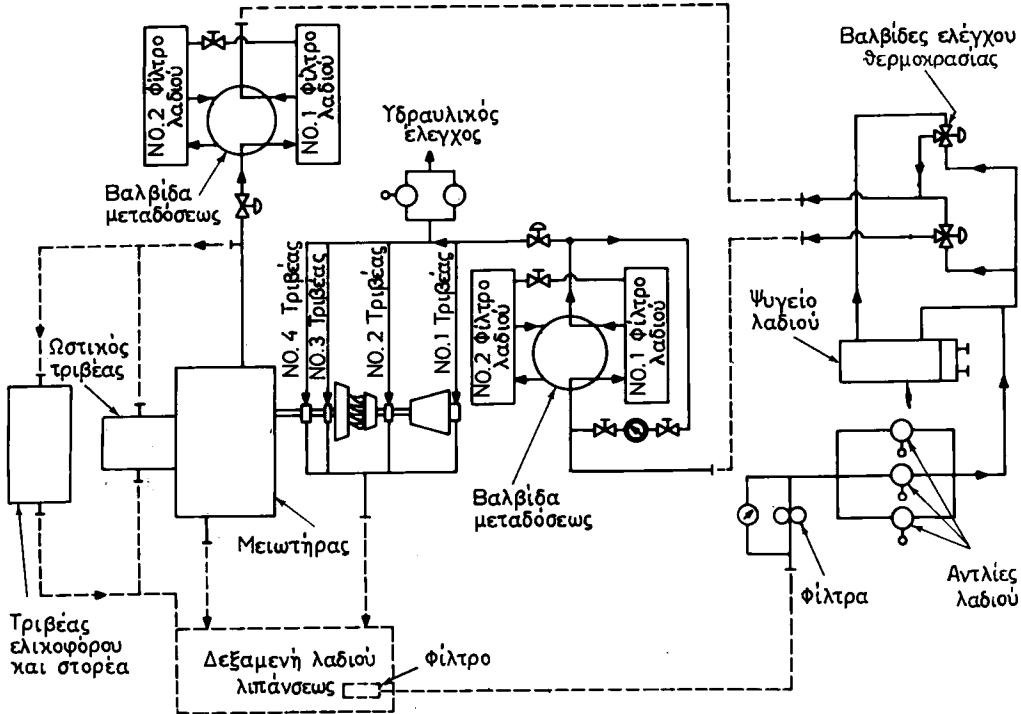
Διάγραμμα δικτύου λαδιού λιπάνσεως αεριοστροβίλου ισχύος.

A: Κύρια αντλία πιέσεως. B: Μεταλλικά φίλτρα. C: Αντλίες σαρώσεως. D: Βοηθητικές αντλίες πιέσεως. E: Βαλβίδα ελέγχου πιέσεως. F: Παρακαμπτήριος αγωγός. H: Ανακουφιστική βαλβίδα βοηθητικής αντλίας. J: Δεξαμενή λαδιού. K: Εξαερωτής. L: Γραμμή βρογχού. M: Γραμμή βρογχού για εξαέρωση. N: Εξδιάσταση. O: Εξαεριστικό. R: Βαλβίδα παρακάμψεως. S: Βαμβακέρο φίλτρο. T: Εξαερωτής δεξαμενής. U: Σύνδεσμοι. V: Βοηθητικά μεταλλικά φίλτρα. P: Ψυγείο λαδιού. W: Ρυθμιστική μονάδα φίλτρων. X: Ρυθμιστής βοηθητικής αντλίας. Y: Ρυθμιστική βαλβίδα πιέσεως. Z: Μηχανικό φίλτρο λαδιού.

τών σε σχέση με τις αντίστοιχες των ατμοστροβίλων και των ντζελομηχανών. Έτσι, η δυνατότητά τους, που δεν υπερβαίνει τα 100 γαλόνια, συγκρινόμενη με τις χιλιάδες γαλόνια των δεξαμενών των άλλων ειδών εγκαταστάσεως, είναι πολύ μικρή. Ο κυριότερος λόγος για το μικρό μέγεθος των δεξαμενών χρήσεως των αεριοστροβίλων είναι ότι τα συνθετικά λάδια έχουν πολύ μικρό χρόνο ζωής αποθηκεύσεως και συνεπώς είναι αναγκαίος ο συχνός εφοδιασμός με νέα αποθέματα.

Στην πράξη, χρησιμοποιούνται συνήθως συσκευασίες λαδιού των 10 γαλονιών για συχνή προσθήκη, ώστε να είναι εξασφαλισμένη πάντα η αποφυγή αλλοιώσεως των χαρακτηριστικών του λιπαντελαίου, πριν ακόμη χρησιμοποιηθεί.

Στο σχήμα 10.2δ παρουσιάζεται το διάγραμμα λαδιού λιπάνσεως εγκαταστά-



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

Αντλίες

 Ενδείκτες πλέσεως

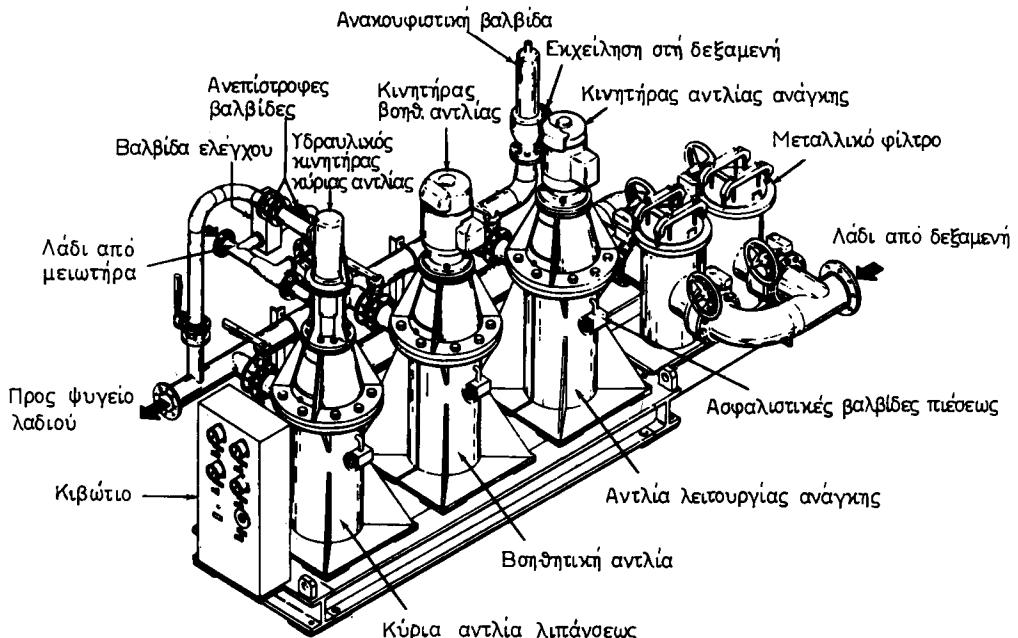
**Σχ. 10.26.**

**Διάγραμμα δικτύου λαδιού λιπάνσεως αεριοστροβίλου «βιομηχανικής» προελεύσεως.**

σεως αεριοστροβίλου βιομηχανικής προελεύσεως, όπου με διακεκομένες γραμμές δείχνονται τα στοιχεία του συστήματος που χρησιμοποιούνται ανεξάρτητα από το είδος της μηχανής.

Τα συστήματα λιπάνσεως των αεριοστροβίλων βιομηχανικής χρήσεως είναι πιο «συμβατικά» και μοιάζουν περισσότερο με τα αντίστοιχα συστήματα των ατμοστροβίλων. Παρουσιάζουν ωστόσο σημαντικές διαφορές από εκείνα, όπως είναι η έλλειψη δεξαμενής βαρύτητας (gravity tank), η ύπαρξη περισσοτέρων αντλιώνώστε να εξασφαλίζεται η συνέχεια της λιπάνσεως σε περίπτωση βλάβης κάποιας από αυτές και τέλος η απουσία φυγοκεντρικού καθαριστή του λαδιού.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 10.2€, που παριστάνει σε λεπτομέρειες τις αντλίες του συστήματος λιπάνσεως, υπάρχουν τρεις χωριστές αντλίες, ώστε να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία της παροχής λαδιού, ακόμη και σε περιπτώσεις βλάβης σε δύο από τις αντλίες. Η κύρια αντλία παίρνει υδραυλικά κίνηση απ' ευθείας από τον αεριοστρόβιλο, ενώ η βοηθητική κινείται από έλεκτροκινητήρα τροφοδοτούμενο από την ηλεκτροδότηση του πλοίου. Τόσο η κύρια, όσο και η βοηθητική μπορούν να ικανοποιήσουν πλήρως τις απαιτήσεις λιπάνσεως του αεριοστροβίλου, μέχρι τη μενιστρική ισχύ. Αντίθετα, η αντλία λιπάνσεως ανάγκης (emergency) είναι μικρότερης



Σχ. 10.2ε.  
Σύστημα αντλιών λιπάνσεως αεριοστροβίλου.

παροχικής ικανότητας και προορίζεται κυρίως για την παροχή λιπάνσεως κατά την περίοδο αποψύξεως του αεριοστροβίλου μετά την κράτησή του. Σε περιπτώσεις δύμως ανάγκης, όταν οι δύο άλλες αντλίες δεν μπορούν να εργασθούν, μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις λιπάνσεως του αεριοστροβίλου, όταν αυτός εργάζεται μέχρι ενός ποσοστού της ισχύος του.

Η έλλειψη φυγοκεντρικού καθαριστή λαδιού στις εγκαταστάσεις αεριοστροβίλου οφείλεται στο ότι για τη διατήρηση των λιπαντικών ιδιοτήτων του λαδιού είναι αρκετή η διέλευσή του μέσα από διηθητικά φίλτρα και από σύστημα αφυγραντών προς αφαίρεση της υγρασίας.

### 10.3 Προστασία από φωτιά.

Θεωρώντας τον πίνακα 10.3.1 παρέχεται αμέσως η εξήγηση γιατί η προστασία από φωτιά ή όπως λέγεται **πυροπροστασία** αποτελεί αναγκαίο σύστημα στις εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων. Στον πίνακα παρατίθενται τα σημαντικότερα, από πλευράς πυρασφάλειας, χαρακτηριστικά των καυσίμων και λιπαντικών.

Υπενθυμίζονται εδώ οι παρακάτω ορισμοί:

**Σημείο εναύσεως** είναι η θερμοκρασία στην οποία οι παραγόμενοι ατμοί του καυσίμου σχηματίζουν μαζί με τον αέρα αναφλέξιμο μίγμα παρουσία φλόγας.

**Σημείο καύσεως** είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία οι παραγόμενοι ατμοί εξακολουθούν να καίονται, αφού έχουν ήδη αναφλεγεί.

**Σημείο αυταναφλέξεως** είναι η θερμοκρασία στην οποία οι παραγόμενοι ατμοί αναφλέγονται «αυθόρυμη» χωρίς την παρουσία φλόγας.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 10.3.1.**  
**Χαρακτηριστικές θερμοκρασίες καυσίμων και λιπαντικών.**

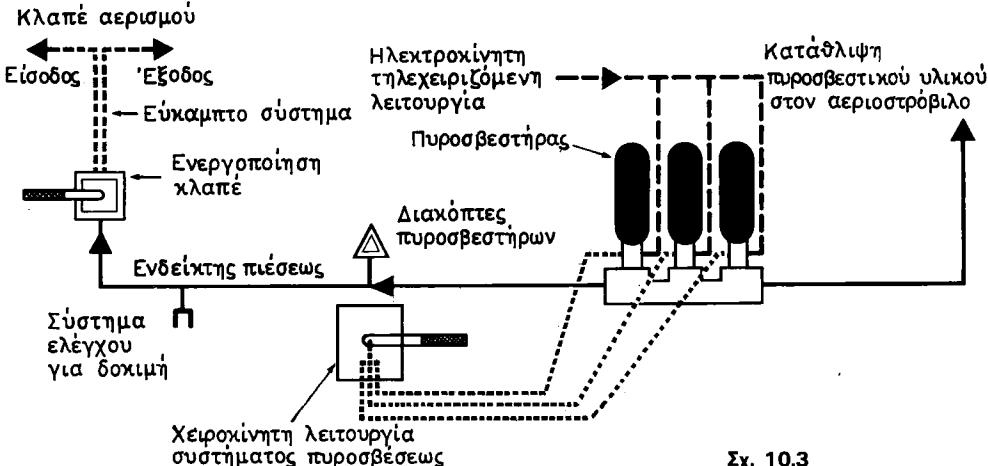
|                      | JP5 | Navy Oil<br>Diesel | Ορυκτό<br>λιπαντικό | Συνθετικό<br>λιπαντικό |
|----------------------|-----|--------------------|---------------------|------------------------|
| ΣΗΜΕΙΟ ΕΝΑΥΣΕΩΣ      | 140 | 150                | 350                 | 400                    |
| ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΥΣΕΩΣ       | 190 | 200                | —                   | 490                    |
| ΣΗΜΕΙΟ ΑΥΤΑΝΑΦΛΕΞΕΩΣ | 440 | 440                | 700                 | 860                    |

Σε αντίθεση προς τις εγκαταστάσεις των ατμοστροβίλων και των μηχανών ντίζελ, οι αεριοστρόβιλοι έχουν εκτεθειμένες επιφάνειες με θερμοκρασίες πολύ υψηλότερες από τις θερμοκρασίες αυταναφλέξεως. Αυτό, σε συνδυασμό με το ότι τα δίκτυα καυσίμου αναγκαστικά περνούν από σημεία κοντά στις επιφάνειες αυτές, καθιστούν πρακτικά αναπόφευκτη την εκδήλωση πυρκαϊάς σε περίπτωση διαρροής του δικτύου ή άλλης τυχαίας βλάβης.

Για την αντιμετώπιση του κινδύνου αυτού, λαμβάνονται προληπτικά μέτρα με την παρεμβολή μονωτικών μεταξύ των δικτύων και των επιφανειών, αλλά και κατασταλτικά μέτρα για την κατάσβεση της πυρκαϊάς όταν εκδηλωθεί. Έτσι, υπάρχουν συστήματα όπου χρησιμοποιούνται όλα τα κατάλληλα μέσα που διατίθενται για το σκοπό αυτό, δηλαδή ομίχλη νερού, μίγμα αφρού, διοξείδιο του άνθρακα και άλλες χημικές ενώσεις (π.χ. υδρογονάνθρακες, Halon).

Καθένα από τα μέσα αυτά παρουσιάζει και πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Έτσι, ενώ η ομίχλη νερού και το μίγμα αφρού έχουν ως κύριο συστατικό νερό που διατίθεται σε αφθονία από το περιβάλλον, διαβρώνουν τις επιφάνειες και χρειάζεται πλήρης αποκατάσταση της μηχανής (π.χ. πλύσιμο με πετρέλαιο) το συντομότερο δυνατό μετά τη χρησιμοποίησή τους για κατάσβεση πυρκαϊάς. Εξ άλλου τα χημικής συνθέσεως πυροσβεστικά μέσα, αν και δεν έχουν τέτοιο μειονέκτημα, είναι ακριβά και τοξικά για το περιβάλλον. Ανεξάρτητα από το είδος του χρησιμοποιούμενου συστήματος πυροσβέσεως, βασικό χαρακτηριστικό όλων είναι η άμεση διακοπή της παροχής καυσίμου και αέρα με την ενεργοποίησή τους.

Επίσης, όλα τα συστήματα φέρουν στοιχεία έγκαιρου εντοπισμού εστίας πυρκαϊάς, τα οποία ενεργοποιούνται είτε με υπερβολική τοπική αύξηση της θερμοκρασίας αερισμού



Σχ. 10.3

σίας είτε από την παρουσία καπνού, πράγμα που βοηθεί τους χειριστές τόσο στον εντοπισμό όσο και την έγκαιρη αντιμετώπιση του κινδύνου μόλις εκδηλωθεί.

Στο σχήμα 10.3 φαίνεται η διάταξη του συστήματος έγκαιρου εντοπισμού και κατασβέσεως πυρκαϊάς ενός αεριοστροβίλου της εταιρίας Rolls - Royce.

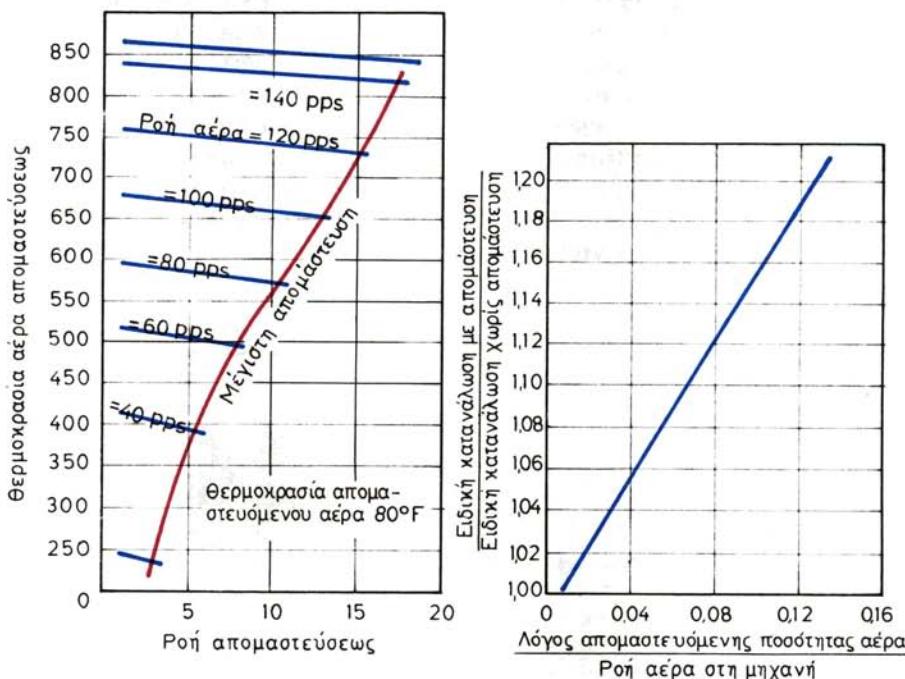
#### 10.4 Συστήματα προστασίας από παγετό.

Όταν το πλοίο βρίσκεται σε ψυχρά κλίματα, σχηματίζεται παγετός στις εισαγωγές των οχετών του καυσιγόνου αέρα και κυρίως στους αποχωριστές υγρασίας. Αυτό αποτελεί σοβαρό πρόβλημα για τις εγκαταστάσεις των αεριοστροβίλων, αφού υπήρξαν και περιπτώσεις σχηματισμού παγετού μέχρι και στα οδηγητικά προφύσια του συμπιεστή.

Το πρόβλημα συνήθως αντιμετωπίζεται είτε με την παροχή θερμού αέρα που προέρχεται από την κατάθλιψη του συμπιεστή, είτε με τοπικές ηλεκτρικές αντιστάσεις. Έτσι, ο αεριοστρόβιλος LM 2500 της General Electric π.χ. είναι εφοδιασμένος με ειδικό δίκτυο και επιστόμια που επιτρέπουν την παροχή 2 - 3 λιμπρών αέρα ανά δευτερόλεπτο από το συμπιεστή στις αναρροφήσεις αέρα για τη θέρμανσή τους και την αποφυγή δημιουργίας παγετού.

Στο σχήμα 10.4a φαίνεται το ποσό του παρεχόμενου αέρα και η θερμοκρασία του.

Είναι φανερό ότι ο παρεχόμενος για θέρμανση των οχετών αέρας δεν χρησιμοποιείται για την παραγωγή ισχύος. Αποτελεί δηλαδή απώλεια, με αποτέλεσμα την αύξηση της καταναλώσεως καυσίμου, όπως δείχνει το δεξιό τμήμα του σχήματος,

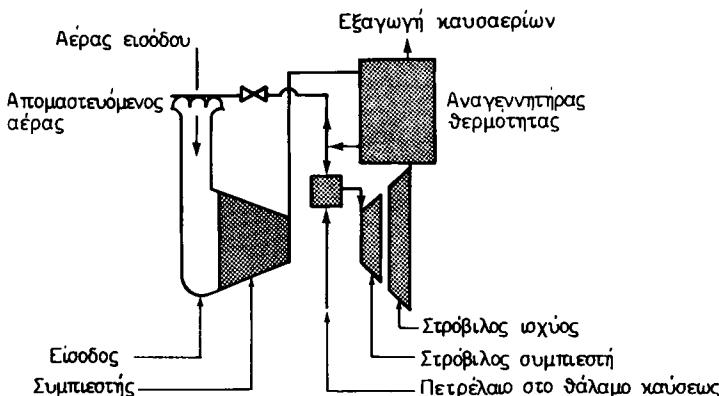


Σχ. 10.4a.  
Παράμετροι συστήματος προστασίας από παγετό.

όπου, για παροχή 3 λιμπρών ανά δευτερόλεπτο, στην περίπτωση λειτουργίας του αεριοστροβίλου σε πλήρη ισχύ, απαιτείται αύξηση της παρεχόμενης ποσότητας του καυσίμου κατά 47%.

Ο προερχόμενος από το συμπιεστή θερμός αέρας εγχέεται στο ρεύμα του αναρροφόμενου ψυχρού αέρα σε κατάλληλο σημείο και κατά τέτοιο τρόπο, ώστε ο ψυχρός αέρας να θερμαίνεται ομοιόμορφα πριν φθάσει στο συμπιεστή.

Στο σχήμα 10.4β παρουσιάζεται διαγραμματικά μία τέτοια διάταξη εγκαταστάσεως αεριοστροβίλου με αναγεννητήρα.



Σχ. 10.4β.

Σχηματική διάταξη δικτύου προστασίας από παγετό.

Σημειώνεται ότι ο θερμός αέρας παραλαμβάνεται μετά τον αναγεννητήρα με θερμοκρασία  $900 \div 950^{\circ}\text{F}$ , οπότε επιτυγχάνεται η προθέρμανση του αναρροφόμενου αέρα σε θερμοκρασία  $38^{\circ}\text{F}$ , όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι  $-20^{\circ}\text{F}$ .

Αρκετές εγκαταστάσεις χρησιμοποιούν, όπως προαναφέρθηκε, ηλεκτρικές αντιστάσεις για την προθέρμανση του εισαγόμενου αέρα. Έτσι, για εγκατάσταση ισχύος  $25.000 \div 30.000 \text{ HP}$  απαιτείται από τις κύριες γεννήτριες του πλοίου ηλεκτρική ισχύς γύρω στα  $50 \text{ kW}$ . Αν και το σύστημα των ηλεκτρικών αντιστάσεων έχει βελτιωθεί σημαντικά, δημως σπάνια χρησιμοποιείται σε σύγχρονες εγκαταστάσεις.

## 10.5 Συστήματα εκκινήσεως του αεριοστροβίλου.

Όπως στα περισσότερα είδη μηχανών, έτσι και για τον αεριοστρόβιλο χρησιμοποιείται **εκκινητής**, δηλαδή μια διάταξη, η οποία χρησιμοποιεί εξωτερική ενέργεια και περιστρέφει τον αεριογόνο μέχρι τέτοια ταχύτητα, ώστε να μπορεί από μόνος του πιά να διατηρήσει την καύση και συνεπώς και τη λειτουργία του.

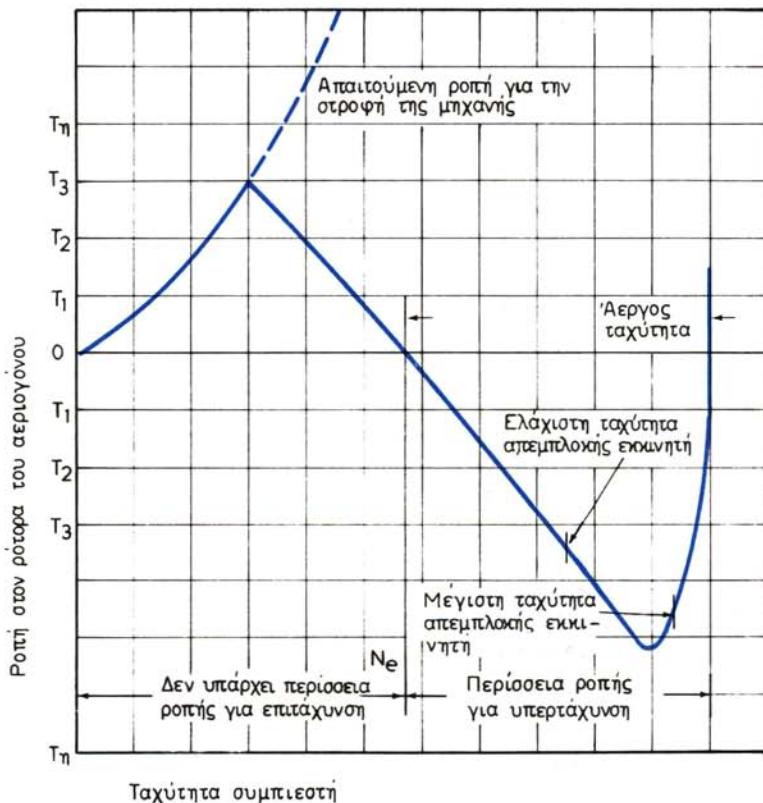
Η βασική επομένως απαίτηση από τον εκκινητή είναι να παρέχει την απαραίτητη για το σκοπό αυτό ροπή, καθώς επίσης και να μπορεί να περιστρέψει επί ορισμένο χρονικό διάστημα τον αεριοστρόβιλο σαν κινητήρα (motorizing), ώστε να επιτυγχάνεται η εξδάτωση πριν από τη λειτουργία, η απόψυξη μετά τη λειτουργία και η πλύση του κατά τη συντήρηση.

Συνήθως ο εκκινητής είναι είτε μικρός ηλεκτρικός κινητήρας τροφοδοτούμενος

από μπαταρία ή ρεύμα είτε μικρότερος αεριοστρόβιλος ή Diesel.

Η απαιτούμενη από τον εκκινητή ροπή καθορίζεται από την καμπύλη ταχύτητας - ροπής του αεριοστροβίλου που πρόκειται να ξεπηρετήσει και από το χρόνο που χρειάζεται να στρέφεται ο αεριοστρόβιλος για τις βοηθητικές χρήσεις που προαναφέρθηκαν (βραδεία ωύη, συντήρηση κλπ.).

Στο σχήμα 10.5α παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη εκτιμήσεως απαιτούμενης ροπής περιστροφής ενός αεριοστροβίλου. Η περιοχή της καμπύλης, που ονομάζεται **ροπή εξωτερικής περιστροφής**, είναι η απαίτηση από τον εκκινητή να μπορεί να περιστρέψει τον αεριοστρόβιλο πριν από την έναυση. Μετά από την έναυση, η απαιτούμενη ροπή του εκκινητή ελαττώνεται.



#### **Σχ. 10.5α.**

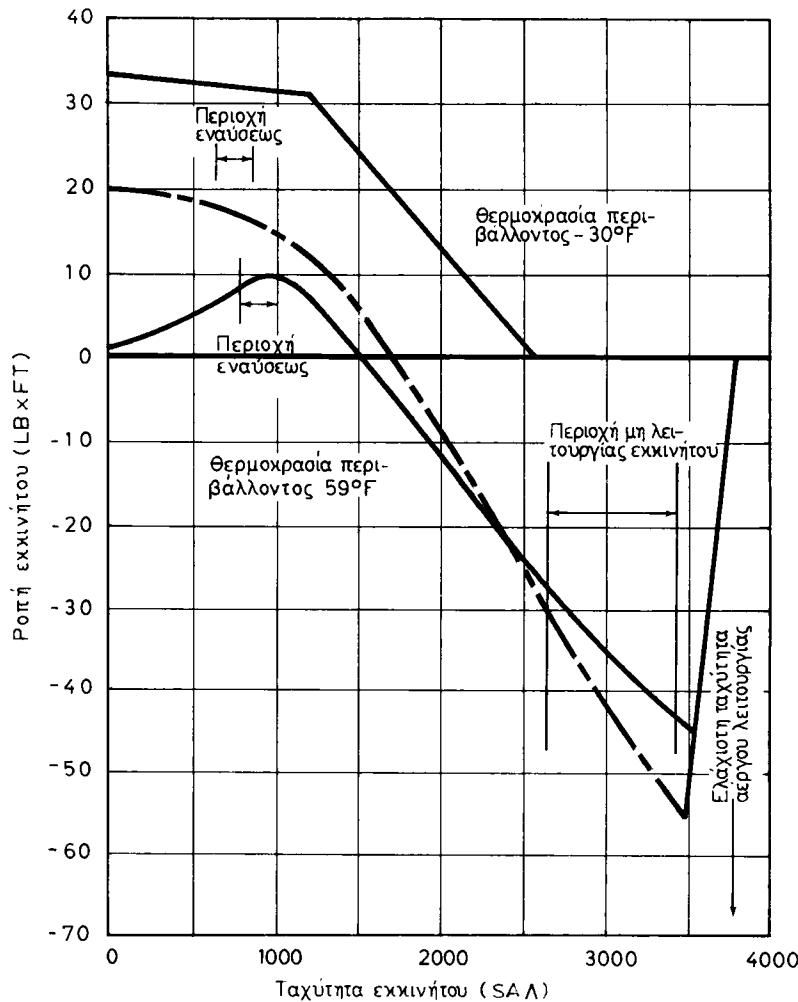
Στο ίδιο σχήμα, η περιοχή **μη διατθέμενης ροπής** σημαίνει ότι η ίδια η μηχανή, σ' αυτή την περιοχή λειτουργίας, δεν διαθέτει περίσσεια ροπής ώστε να μπορεί να επιταχυνθεί, ενώ, όσο αυξάνει η ταχύτητα, η απαίτηση εξωτερικής ροπής είναι αρνητική, δηλαδή δεν χρειάζεται πια.

Η απαίτηση για περίσσεια στρεπτικής ροπής από τον εκκινητή οφείλεται κυρίως στην επιθυμία ταχείας εκκίνησεως του αεριοστροβίλου, έχουν δε επιτευχθεί στον τομέα αυτό εντυπωσιακά αποτέλεσματα, όπως είναι η δυνατότητα αναλή-

ψεως πλήρους φορτίου από τον αεριοστρόβιλο 43 μόλις δευτερόλεπτα μετά την εντολή εκκινήσεώς του.

Το σχήμα 10.5β είναι παρόμοιο προς το προηγούμενο, αλλά με την προσθήκη ότι παρουσιάζει τη διατιθέμενη από τον εκκινητή ροπή και την απαιτούμενη από τον αεριοστρόβιλο σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην πολύ χαμηλή θερμοκρασία των  $-30^{\circ}\text{F}$ , η μεγαλύτερη απαίτηση ροπής είναι σε μηδενικές στροφές.

Σημαντικό χαρακτηριστικό του εκκινητή είναι η συνολικά διατιθέμενη από αυτόν ενέργεια, η οποία καθορίζει το χρόνο κατά τον οποίο μπορεί συνεχώς να στρέψει τον αεριοστρόβιλο καθώς και τη δυνατότητα επανείλημμένων εκκινήσεών του. Συνήθως, ο μέγιστος χρόνος συνεχούς περιστροφής του αεριοστροβίλου απαιτείται για τη συντήρησή του (πλύση), ο δε μέγιστος αριθμός επανείλημμένων εκκινή-



**Σχ. 10.5β.**  
Σχέση ροπής εκκινητή και αεριοστροβίλου.

σεων καθορίζεται από τους Νηογνώμονες, ώστε να εξασφαλίζεται η ασφαλής εκκίνηση της προωστήριας εγκαταστάσεως.

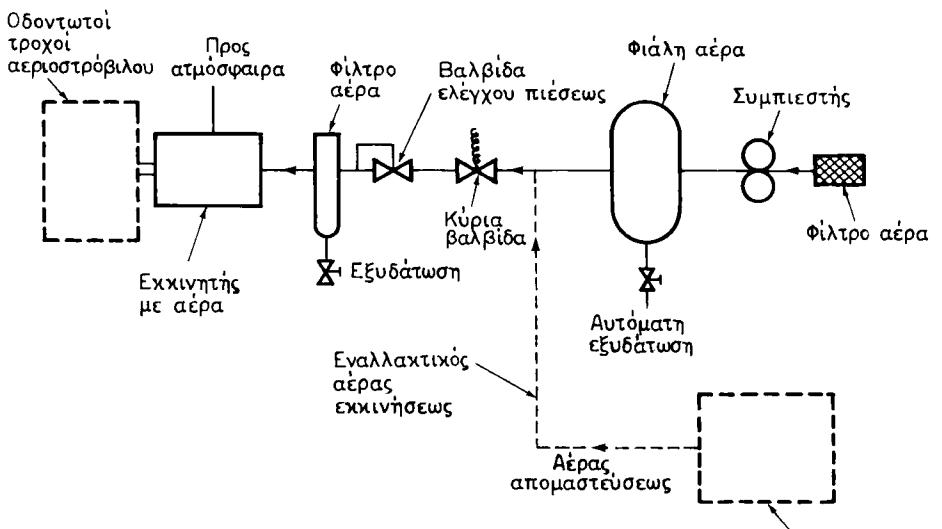
Οι εκκινητές διακρίνονται από τον τρόπο ενεργοποίησεώς τους και οι συνηθέστεροι, προκειμένου για εγκατάσταση προώσεως, είναι υδραυλικοί και με πεπιεσμένο αέρα. Σε μικρότερες ισχείς χρησιμοποιούνται συσσωρευτές (μπαταρίες) ή ακόμη και χειροκίνηση (μανιβέλα), ενώ για εκκίνηση μεγάλων αεριοστροβίλων βιομηχανικής χρήσεως ξηράς χρησιμοποιούνται είτε μηχανές Diesel είτε μικροί ατμοστρόβιλοι και αεριοστρόβιλοι.

Στο σχήμα 10.5γ παριστάνεται διαγραμματικά το σύστημα εκκινήσεως αεριοστροβίλου με πεπιεσμένο αέρα. Ο εκκινητής αποτελεί ένα ενιαίο σύνολο, που περιλαμβάνει ένα μικρό στρόβιλο κινούμενο από τον πεπιεσμένο αέρα, ένα μειωτήρα και το συμπλέκτη του με τον αεριογόνο. Σημειώνεται ότι η παροχή του αέρα επιτυγχάνεται από δύο διαφορετικές πηγές, ώστε σε κάθε περίπτωση να είναι εξασφαλισμένη η λειτουργία του συστήματος.

Στον πίνακα 10.5.1 παρέχονται ενδεικτικά στοιχεία από τη λειτουργία του συστήματος εκκινήσεως που παρουσιάζεται στο σχήμα 10.5γ.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 10.5.1.**

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Βάρος εκκινητή        | 15 χιλιόγραμμα   |
| Δυνατότητα εκκινήσεως | Πέντε συνεχόμενες εκκινήσεις με μεσολαβούν χρονικό διάστημα μεταξύ τους 30 δευτερόλεπτα.                                   |
| Χρόνος περιστροφής    | Δίλεπτη συνεχής περιστροφή του αεριοστροβίλου, επαναλαμβανόμενη δέκα φορές με πεντάλεπτο διάλειμμα μεταξύ των περιστροφών. |
| Διάρκεια εκκινήσεως   | Ενεργοποίηση του εκκινητή μέχρι 45 δευτερόλεπτα.   |



**Σχ. 10.5γ.**

Σύστημα εκκινήσεως αεριοστροβίλου με αέρα.

Μικρός αεριοστρόβιλος που εκχίνει με μπαταρία

## 10.6 Δίκτυα του αεριοστροβίλου.

Τα δίκτυα του αεριοστροβίλου, τόσο τα ηλεκτρικά όσο και οι σωληνώσεις, διαφέρουν όχι μόνο μεταξύ των διαφόρων τύπων μηχανών, αλλά και για την ίδια μηχανή, ανάλογα με το πλοίο όπου θα τοποθετηθεί. Θα περιορισθούμε λοιπόν εδώ στην περιγραφή ορισμένων μόνο γενικοτήτων.

Τα ηλεκτρικά δίκτυα τροφοδοτούν ενδείκτες λειτουργίας, ενεργοποιητές και το σύστημα εναύσεως των θαλάμων καύσεως. Οι κυριότεροι από τους ενδείκτες λειτουργίας είναι:

- Θερμοηλεκτρικά στοιχεία για τη μέτρηση των θερμοκρασιών εισόδου στο στρόβιλο ισχύος (π.χ. Θερμοκρασία  $T_3$ ).
- Θερμόμετρα με αντίσταση για μέτρηση της θερμοκρασίας λαδιού λιπάνσεως μετά τους τριβείς.
- Ενδείκτες μετρήσεως ταλαντώσεων του αεριογόνου και του στροβίλου ισχύος.
- Στροφόμετρα λειτουργίας του αεριογόνου και του στροβίλου ισχύος.
- Ενδείκτης θέσεως κεντρικού διακόπτη πετρελαίου.
- Διακόπτης υπερταχύνσεως εκκινητή.

Εξ άλλου, οι ενεργοποιητές περιλαμβάνουν δύο σωληνοειδή πηνία για τη διακοπή παροχής του καυσίμου, καθώς και το ρυθμιστή στροφών και επιταχύνσεως του στροβίλου ισχύος, ενώ το σύστημα εναύσεως των θαλάμων καύσεως έχει ήδη περιγραφεί στο οικείο κεφάλαιο.

Νοείται βέβαια ότι εφ' όσον το σύστημα προστασίας από παγετό είναι ηλεκτρικό υπάρχει αντίστοιχη τροφοδότηση και αυτού.

Τέλος, σε ό,τι αφορά τις σωληνώσεις, εκτός των δύον έχουν ήδη αναφερθεί (δίκτυα καυσίμου, λαδιού, πυροπροστασίας, προστασίας από παγετό, πεπιεσμένου αέρα, πλύσεως, ψύξεως κλπ.) υπάρχουν και δίκτυα επιστροφών καυσίμου και λιπαντελαίου για την αποφυγή απωλειών των μη καταναλισκομένων αντιστοίχων ποσοτήτων.

σημαίνει ρύπανση του συμπιεστή και ανάγκη καθαρισμού του. Αν τα πυρόμετρα του χώρου καύσεως δείχνουν σημαντικές θερμοκρασιακές διαφορές, ίσως είναι αποτέλεσμα ανομοιόμορφης καύσεως λόγω εμφράξεως ορισμένων καυστήρων, οπότε άμεση συνέπεια θα είναι η φθορά των πτερυγίων που δέχονται τα καυσαέρια της υψηλότερης θερμοκρασίας. Έμφραξη ορισμένων καυστήρων εκδηλώνεται επίσης από μεγάλες διαφορές πιέσεως του συστήματος παροχής καυσίμων. Τέλος, συνεχής αύξηση του επιπέδου κραδασμού και θορύβου της μηχανής είναι ενδεικτική είτε αυξημένης ρυπάνσεως του συμπιεστή είτε φθοράς των πτερυγώσεων του στροβίλου ή και του συμπιεστή.

### **β) Συντήρηση χρήσεως.**

Συνίσταται κυρίως σε επιθεώρηση του συστήματος καύσεως, δηλαδή καυστήρων, θαλάμων κλπ., καθώς και σε ταυτόχρονο έλεγχο των υπολοίπων τμημάτων της μηχανής που καθίστανται προσιτά όταν αφαιρούνται προσωρινά τα εξαρτήματα του συστήματος καύσεως για έλεγχο.

### **γ) Συντήρηση μικρών επισκευών.**

Συνήθως είναι οπτικός έλεγχος καταστάσεων των τμημάτων της μηχανής που εκτίθενται στα προϊόντα της καύσεως (θερμό τμήμα) και απαιτεί ανύψωση του άνω ημικελύφους του στροβίλου.

### **δ) Συντήρηση εκτεταμένης επισκευής.**

Είναι λεπτομερειακή εξέταση όλων των τμημάτων της μηχανής και απαιτεί ανύψωση των κελυφών ώστε να καταστεί δυνατός ο πλήρης έλεγχος καταστάσεως, η λήψη μετρήσεων, και η αντικατάσταση ή επισκευή όσων τμημάτων χρειάζεται.

Η συχνότητα όλων των παραπάνω συντηρήσεων εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας και από την εμπειρία από την στο μεταξύ χρήση της μηχανής, διαφέρει δε σημαντικά από τμήμα σε τμήμα, ανάλογα με το είδος της συντηρήσεως. Έτσι, η συντήρηση λειτουργίας είναι περίπου συνεχής ενώ η συντήρηση εκτεταμένης επισκευής μπορεί να φθάσει τις 30.000 ώρες λειτουργίας.

Στους πίνακες 11.2.1, 11.2.2 και 11.2.3 παρουσιάζονται ενδεικτικώς οι απαιτούμενες εργασίες συντηρήσεως, χρήσεως, μικρών και μεγάλων επισκευών αντίστοιχα, καθώς και ο απαιτούμενος αριθμός εργατο-ωρών για την εκτέλεση της κάθε μιας, όπως καθορίζονται από την εταιρία General Electric.

#### **ΠΙΝΑΚΑΣ 11.2.1.**

**Εργασίες συντηρήσεως χρήσεως μηχανών, ισχύος δύνα των 20.000 HP.**

| Συνολικές ώρες λειτουργίας | Απαιτούμενες εργατο-ώρες | Περιγραφή  |
|----------------------------|--------------------------|--|
| 4.000                      | 6                        | Αφαίρεση καυστήρων και καθαρισμός.   |
| 6.000                      | 6                        | Επιθεώρηση χιτωνίων θαλάμων καύσεως και πρώτης βαθμίδας προφυσίων-πτερυγίων. |
| 8.000                      | 6                        | Ογκομέτρηση, επιθεώρηση καυστήρα.  |

**ΠΙΝΑΚΑΣ 11.2.2.**  
**Εργασίες συντηρήσεως μικρών επισκευών μηχανών, ισχύος  
άνω των 20.000 ΗΡ.**

| Συνολικές ώρες λειτουργίας | Απαιτούμενες εργατο-ώρες | Περιγραφή  |
|----------------------------|--------------------------|--|
| 12.000                     | 24                       | -Αντικατάσταση χιτωνίων και λοιπών εξαρτημάτων θαλάμων καύσεως.<br>Αντικατάσταση προφυσίων πρώτης βαθμίδας.<br>Έλεγχος και επισκευή αντλίας παροχής καυσίμων.<br>Έλεγχος και επισκευή διανομέα καυσίμων.<br>Αντικατάσταση καυστήρων εφ' όσον είναι απαραίτητο. |
| 12.000                     | 64                       |  |
| 12.000                     | 1                        |  |
| 12.000                     | 1                        |  |
| 12.000                     | 1                        |  |

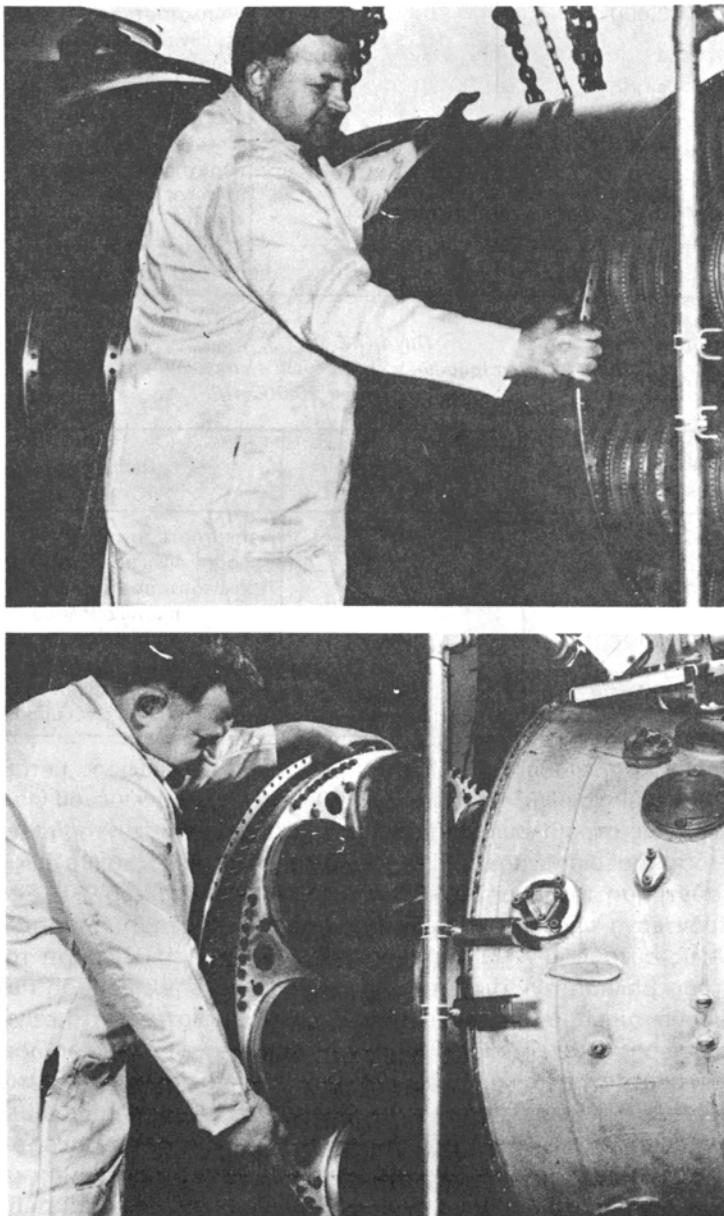
**ΠΙΝΑΚΑΣ 11.2.3.**  
**Εργασίες συντηρήσεως εκτεταμένων επισκευών, μηχανών,  
ισχύος άνω των 20.000 ΗΡ.**

| Συνολικές ώρες λειτουργίας | Απαιτούμενες εργατο-ώρες | Περιγραφή   |
|----------------------------|--------------------------|---|
| 24.000                     | 6                        | Αντικατάσταση καυστήρων εφ' όσον είναι απαραίτητο.          |
| 24.000                     | 24                       | Αντικατάσταση χιτωνίων και λοιπών τμημάτων θαλάμου καύσεως. |
| 24.000                     | 128                      | Αντικατάσταση πρώτης και δεύτερης βαθμίδας προφυσίων.       |
| 24.000                     | 300                      | Αντικατάσταση τριβέων και πτερυγίων, όπου είναι απαραίτητα. |

Θα πρέπει να σημειώθεί ότι υφίσταται μια σημαντική διαφορά μεταξύ των αεριοστροβίλων βιομηχανικής και αεροπορικής χρήσεως. Προκειμένου για αεροπορικής προελεύσεως στροβίλους, σε περίπτωση εκτεταμένης συντηρήσεως, αντικαθίστανται τόσο ο αεριογόνος στρόβιλος όσο και ο στρόβιλος ισχύος ως ενιαίο σύνολο, για σύντμηση του απαιτούμενου για το σκοπό αυτό χρόνου. Εφαρμόζεται δηλαδή η μοντέρνα τεχνική της επισκευής με αντικατάσταση. Επίσης, στους αεριοστροβίλους αυτούς, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην επιθεώρηση του θερμού τμήματός τους, δηλαδή των τμημάτων που υφίστανται την επίδραση των καυσαερίων. Το θερμό τμήμα, αφαιρούμενο από το πλοίο, υφίσταται στη συνέχεια προσεκτική επιθεώρηση και εξάρμοση όλων των τμημάτων για να προσδιορισθούν οι αναγκαίες αντικαταστάσεις και επισκευές, μετά την πραγματοποίηση των οποίων το «κανανεωθέν» πια θερμό τμήμα είναι έτοιμο να ξαναχρησιμοποιηθεί.

Αξίζει να διευκρινισθεί ότι ο στρόβιλος ισχύος υπόκειται σε μικρότερο βαθμό φθοράς σε σχέση προς το στρόβιλο που κινεί το συμπιεστή, λόγω της σημαντικής διαφοράς θερμοκρασίας των καυσαερίων καθώς αυτά διέρχονται από τον κάθε στρόβιλο.

Στον πίνακα 11.2.4 παρατίθενται στοιχεία συντηρήσεως του αεριοστροβίλου τύπου FT4, όπως προβλέπεται από τις ισχύουσες οδηγίες του Αμερικανικού Ναυτικού. Λόγω των αυξημένων απαιτήσεων που διέπουν τις διαδικασίες του οργανισμού αυτού, η συχνότητα επιθεώρησεων είναι αυξημένη σε σύγκριση με τις αντίστοιχες συχνότητες του κατασκευαστή.

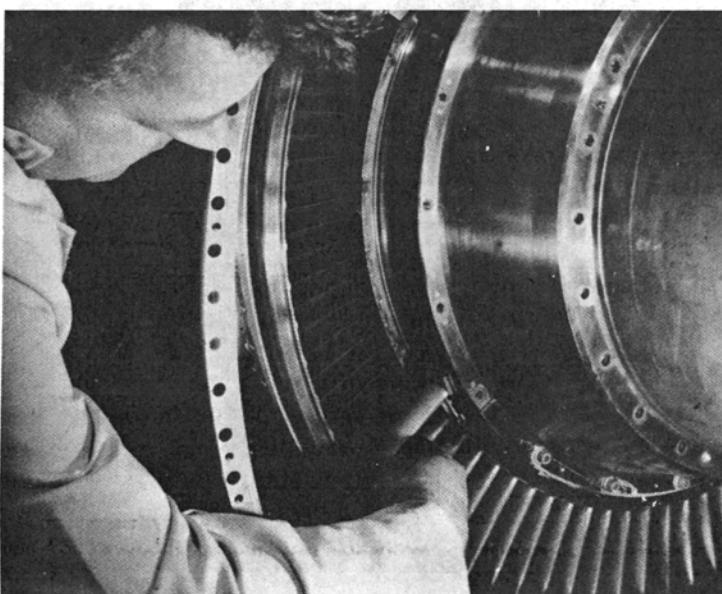
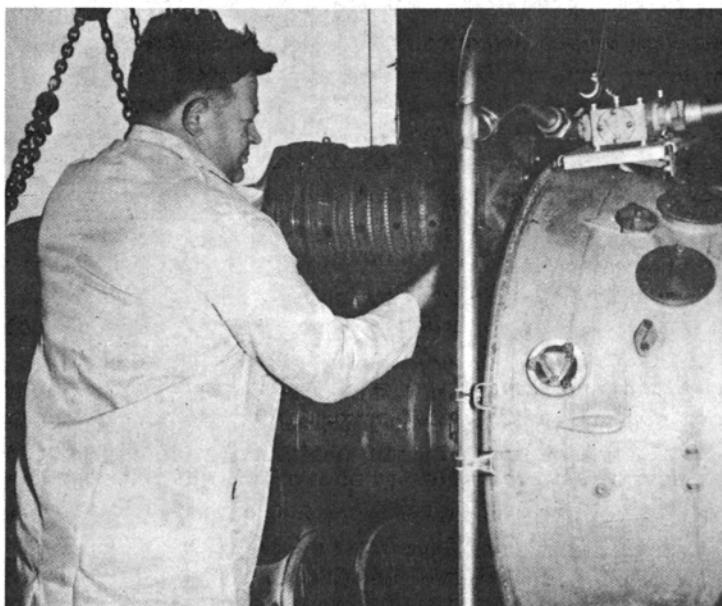


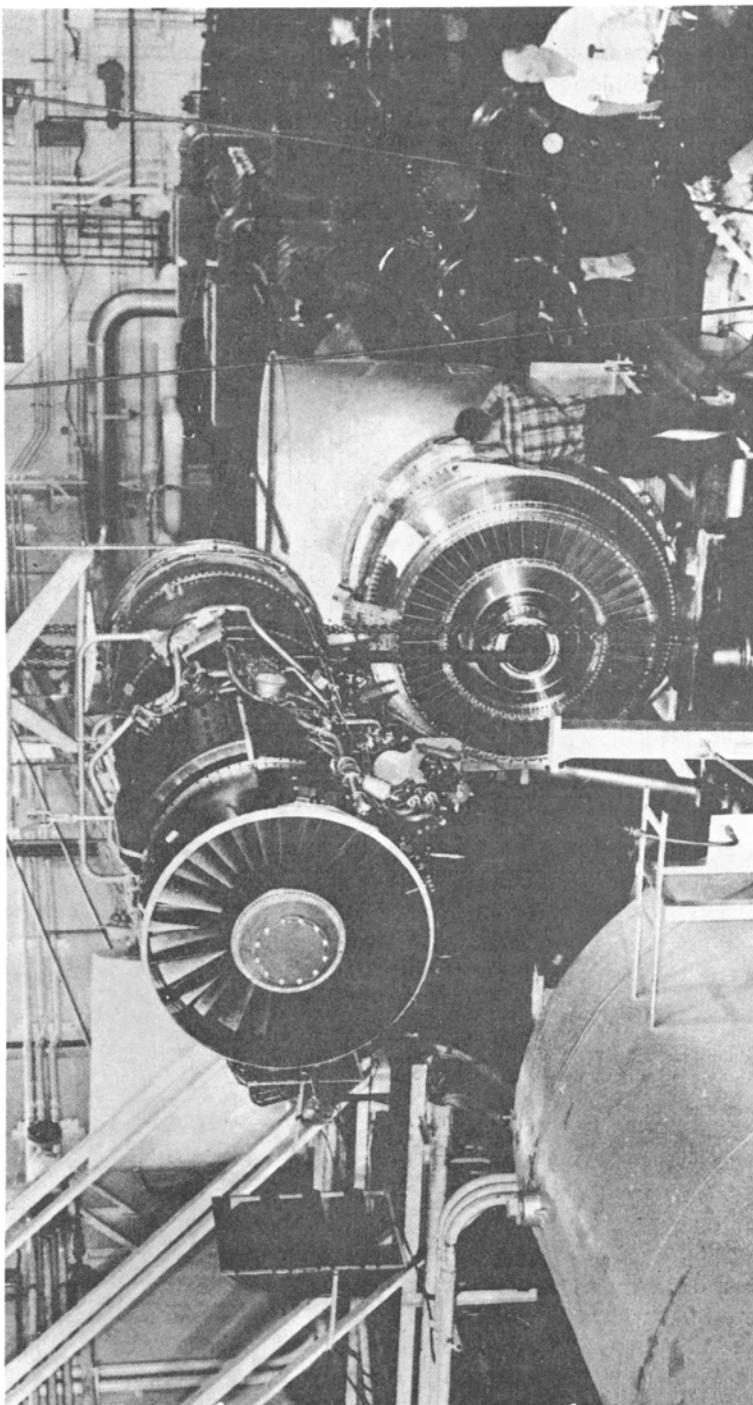
**Σχ. 11.2α.**  
Επιθεώρηση αεριοστροβίλου.

Στο σχήμα 11.2α παρουσιάζονται οι διάφορες φάσεις επιθεωρήσεως ενός αεριοστροβίλου, δηλαδή η αφαίρεση του προστατευτικού καλύμματος για έλεγχο των θαλάμων καύσεως και η μετά την αφαίρεση των θαλάμων καύσεως αποκάλυψη της πρώτης βαθμίδας των προφυσίων.

Τέλος, στα σχήματα 11.2γ, 11.2δ και 11.2ε παρουσιάζεται η διαδικασία αφαίρεσεως του αεριογόνου ή και του στροβίλου ισχύος ως συνόλου από ένα πλοίο.

Με την αφαίρεση της μηχανής, επιτυγχάνεται, όπως προαναφέρθηκε, η επι-





Σχ. 11.2β.  
Διαδικασία αντικαταστάσεως αεροστροβιλού.

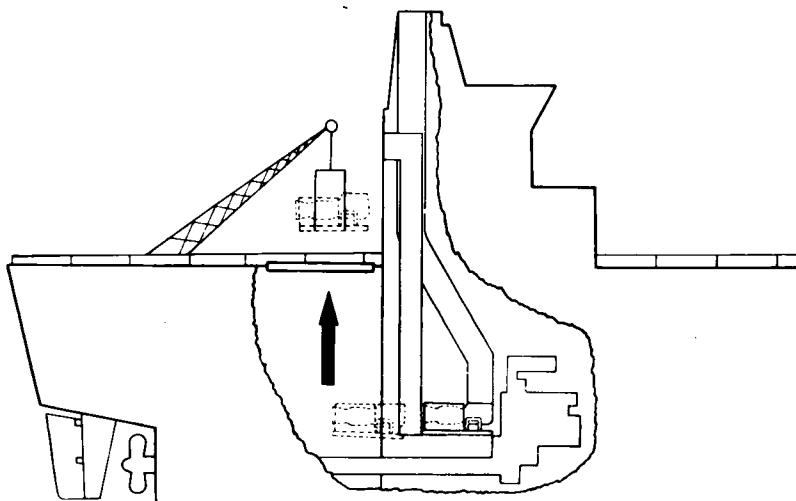
**ΠΙΝΑΚΑΣ 11.2.4.**  
**Προβλεπόμενη συντήρηση αεριοστροβίλου τύπου FT4.**

| Αντικείμενο                    | Χρονικό διάστημα      | Απαιτούμενες εργατο-ώρες       |
|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| 1. Παρακολούθηση λειτουργίας   | Συνεχής               | —                              |
| 2. Πλύση με νερό               | Μετά από κάθε κράτηση | 3                              |
| 3. Συνήθης έλεγχος             | Μετά από κάθε κράτηση | 1                              |
| 4. Πλήρης έλεγχος              | Ανά 500 ώρες          | 4                              |
| 5. Πλήρης εκτεταμένος έλεγχος  | Ανά 1000 ώρες         | 36                             |
| 6. Επιθεώρηση αεριογόνου       | Ανά 2000 ώρες         |                                |
| 7. Επιθεώρηση στροβίλου ισχύος | Ανά 4000 ώρες         | Σε εργοστάσιο<br>Σε εργοστάσιο |

σκευή με αντικατάσταση (repair by replacement) αποτέλεσμα της οποίας είναι η εξοικονόμηση μέρους από το σύνολο του απαιτούμενου χρόνου επισκευής του πλοίου.

Στο σχήμα 11.2γ παρουσιάζεται η μέθοδος αντικαταστάσεως των αεριοστροβίλων στα πλοία της σειράς Euroliner.

Όπως φαίνεται, η προοριζόμενη για αντικατάσταση μηχανή μετακινείται από το μηχανοστάσιο σε παρακείμενο χώρο, από όπου ανυψώνεται με τη βοήθεια γερανού ξηράς.

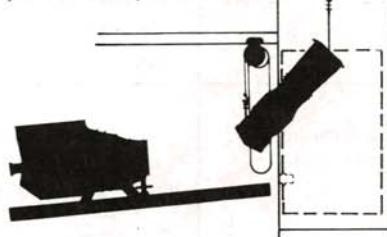


**Σχ. 11.2γ.**  
**Αντικατάσταση αεριοστροβίλου σε πλοίο τύπου Euroliner.**

Στο σχήμα 11.2δ παρουσιάζεται η διαδικασία αντικαταστάσεως του αεριοστροβίλου, όταν δεν διατίθεται παρακείμενος χώρος για την ενδιάμεση μεταφορά της μηχανής. Η αφαίρεσή της τότε γίνεται από τον οχετό εισαγωγής αέρα.

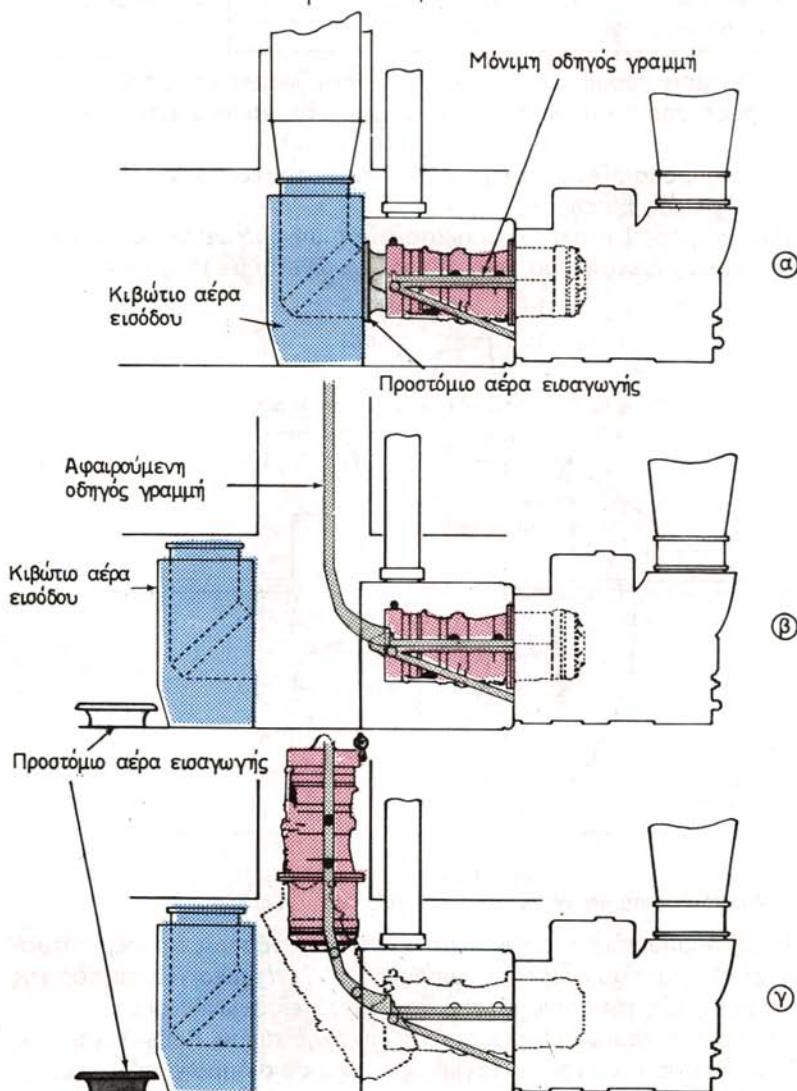
Παρόμοιος είναι και ο τρόπος εξαγωγής της μηχανής τύπου Rolls-Royce του σχήματος 11.2ε μέσα από τον οχετό εισαγωγής επάνω σε σιδηροτροχιές που τοποθετούνται ειδικά για το σκοπό αυτό. Στην περίπτωση του σχήματος, η αφαίρεση επιτυγχάνεται από δύο μόνο άνδρες.

Αντικατάσταση αεριοστροβίλου μέσα από τον οχετό εισαγωγής αέρα χωρίς άλλη επιδραση στην κατασκευή του πλοιού



Σχ. 11.2δ.

Αντικατάσταση αεριοστροβίλου μέσα από τον οχετό εισαγωγής αέρα.



Σχ. 11.2ε.

Αντικατάσταση αεριοστροβίλων Rolls-Royce σε τρία στάδια.

### 11.3 Γενικές αρχές σχεδίου συντηρήσεως αεριοστροβίλων.

Θα εξετασθούν εδώ οι γενικές αρχές που διέπουν το σχέδιο συντηρήσεως, όχι ενός συγκεκριμένου τύπου, αλλά του συνόλου των κυριοτέρων ειδών αεριοστροβίλων. Υπενθυμίζεται ότι με τον όρο αεριοστρόβιλος νοείται το σύνολο των μηχανημάτων και συσκευών που συνιστούν την εγκατάσταση προώσεως. Για το σκοπό αυτό, θα εξετασθούν παρακάτω ξεχωριστά οι απαιτήσεις των διαφόρων τμημάτων και εξαρτημάτων, οι οποίες αποτελούν και τις απαιτήσεις της εγκαταστάσεως στο σύνολό της.

Προϋποτίθεται βέβαια ότι πριν από κάθε συντήρηση, έχει οπωσδήποτε εξασφαλισθεί η τήρηση των εξής όρων:

α) Υφίσταται πλήρες και ακριβές ιστορικό λειτουργίας όλων των προς συντήρηση συσκευών και μηχανημάτων με ώρες λειτουργίας, βλάβες, ενδιάμεσες επισκευές κλπ.

β) Το προσωπικό που θα εκτελέσει τη συντήρηση είναι εξοικειωμένο με τις προβλεπόμενες διαδικασίες, σχέδια και εγχειρίδια του κατασκευαστή κλπ.

γ) Οι ανοχές συναρμολογήσεως, τα όρια φθοράς και οι απαιτούμενες ρυθμίσεις των μηχανημάτων και εξαρτημάτων είναι γνωστά.

δ) Διατίθενται τα απαιτούμενα ανταλλακτικά, κοινόχρηστα υλικά και ειδικά εργαλεία.

ε) Καταγράφονται επακριβώς οι μετρήσεις των εξαρτημάτων και ο απολογισμός των εκτελεσθεισών εργασιών.

Οι αρχές που διέπουν τη συντήρηση των μηχανημάτων και εξαρτημάτων της εγκαταστάσεως αεριοστροβίλων έχουν κατά κανόνα ως ακολούθως:

#### **1) Οδοντωτοί τροχοί.**

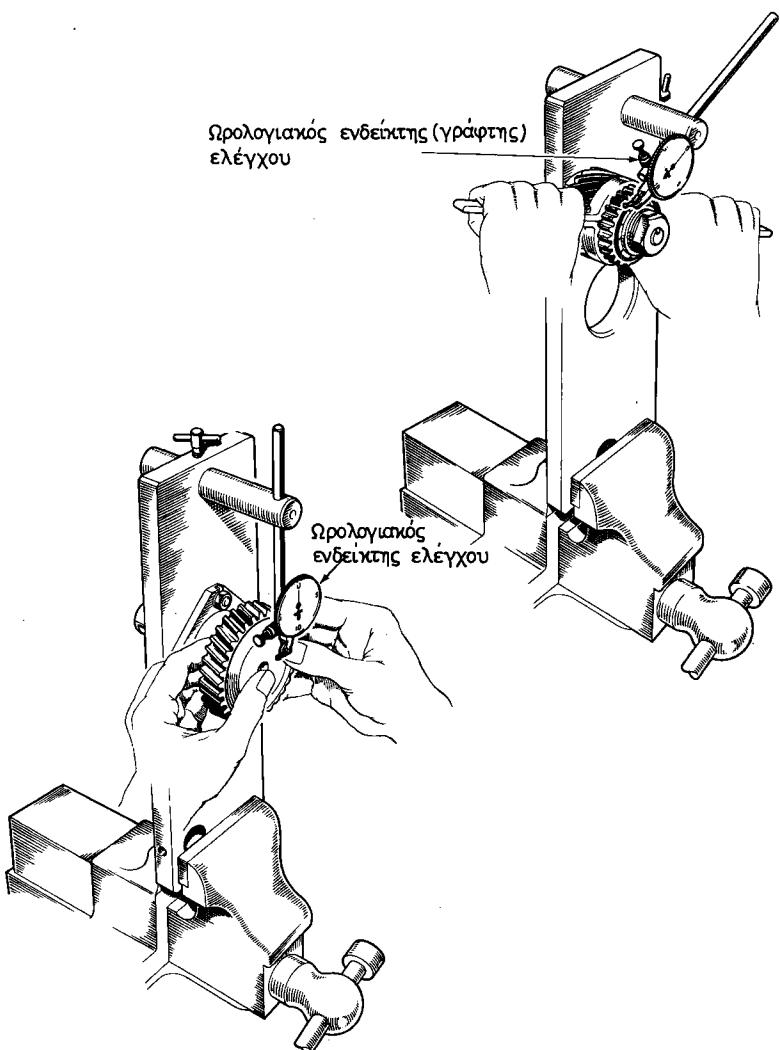
Ο κυριότερος λόγος δημιουργίας προβλημάτων στους οδοντωτούς τροχούς είναι η έλλειψη επαρκούς και κανονικής λιπάνσεως. Η ύπαρξη σημειακών φθορών (pitting) δεν αποτελεί λόγο αντικαταστάσεως, παρά μόνο σε προχωρημένες περιπτώσεις, οπότε τίθεται θέμα αντοχής του δοντιού. Πάντως, σε κάθε περίπτωση, απαιτείται έλεγχος φθορών και ελευθερίας σχετικής κινήσεως των οδοντωτών τροχών (backlash) (σχ. 11.3α).

#### **2) Τριβείς (σχ. 11.3β).**

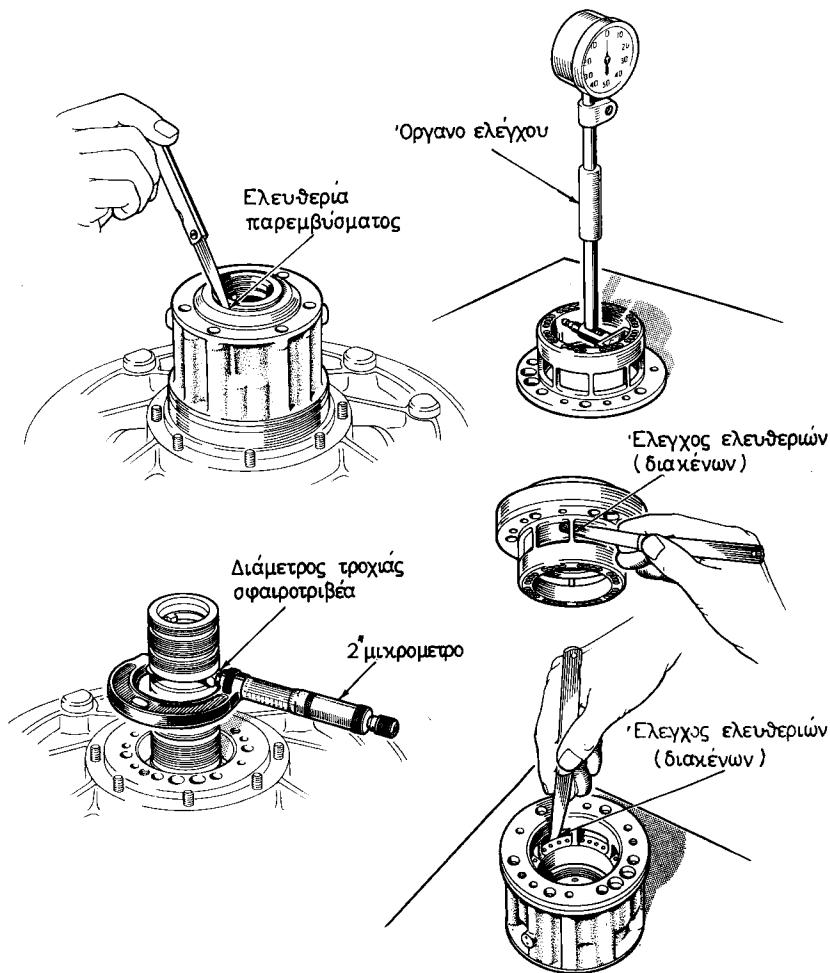
Στους αεριοστροβίλους χρησιμοποιούνται γενικά οι μεγάλης ακριβείας τριβείς αντιτριβής, των οποίων η μοναδική – αλλά ιδιαίτερα σοβαρή – απαίτηση είναι η επαρκής και χωρίς ξένα σωματίδια λίπανση.

#### **3) Συμπιεστές (σχ. 11.3γ).**

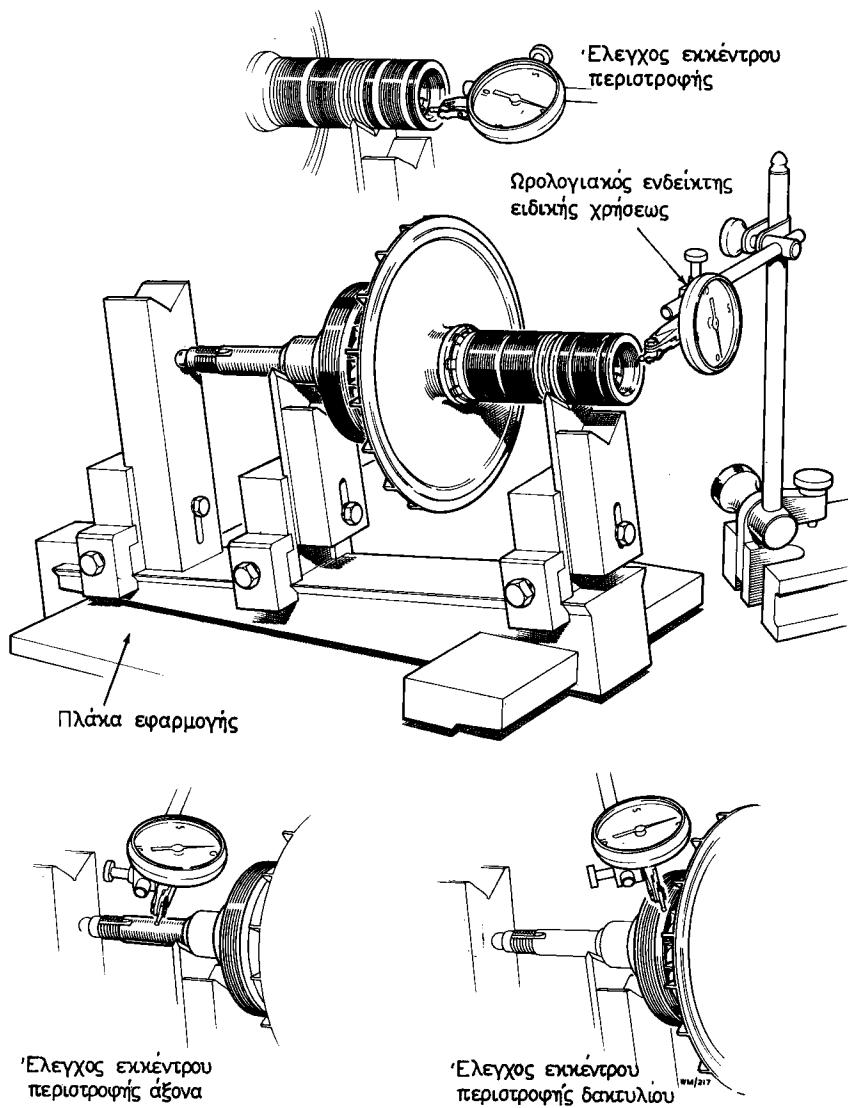
Η διατήρηση καθαριότητας στο συμπιεστή αποτελεί σημαντικό παράγοντα προς εξασφάλιση ικανοποιητικής αποδόσεώς του. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ρύπανση έχει άμεσο αποτέλεσμα την αδυναμία αναπτύξεως της προβλεπόμενης ισχύος και των στροφών. Ως υλικά καθαρισμού χρησιμοποιούνται διάφορα, ανάλογα με το αίτιο που προκάλεσε τη ρύπανση. Εκτός από το πλύσιμο, απαιτείται συχνός έλεγχος των προφυσίων και των πτερυγίων του συμπιεστή, για να διαπιστωθεί ότι είναι απαλλαγμένα από ρωγμές, σχισμές, οδοντώσεις και λοιπές μηχανικές βλάβες.



**Σχ. 11.3α.**  
Έλεγχος οδοντωτών τροχών.



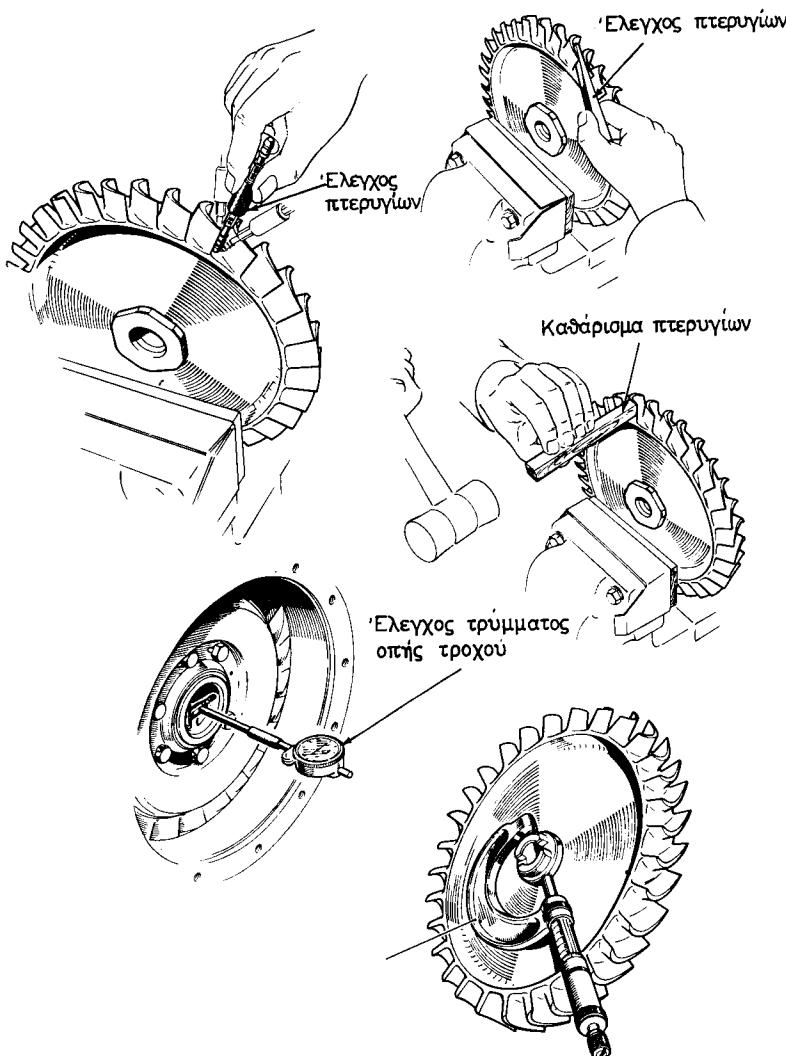
Σχ. 11.3β.  
Έλεγχος τριβέων.



**Σχ. 11.3γ.**  
Έλεγχος συμπιεστή.

**4) Στροβίλοι** (σχ. 11.3δ, 11.3στ και 11.3ζ).

Η ικανοποιητική ή όχι λειτουργία των στροβίλων έχει άμεση επίπτωση στο παραγόμενο έργο. Και εδώ, η εξασφάλιση της καθαριότητας των πτερυγίων είναι κεφαλαιώδους σημασίας. Άλλο σημαντικό σημείο ελέγχου είναι η τυχόν δημιουργία βλαβών από εξανθρακώματα ή ξένα σωματίδια, τα οποία παρασύρονται από τα θερμά καυσαέρια.

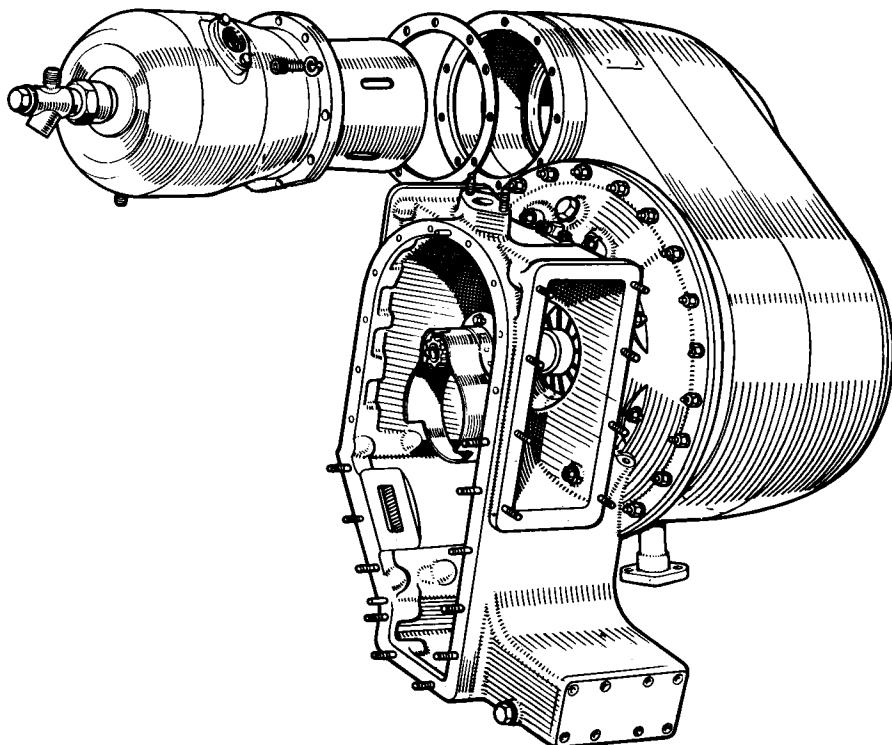


**Σχ. 11.3δ.**  
Έλεγχος τροχού αεριοστροβίλου.

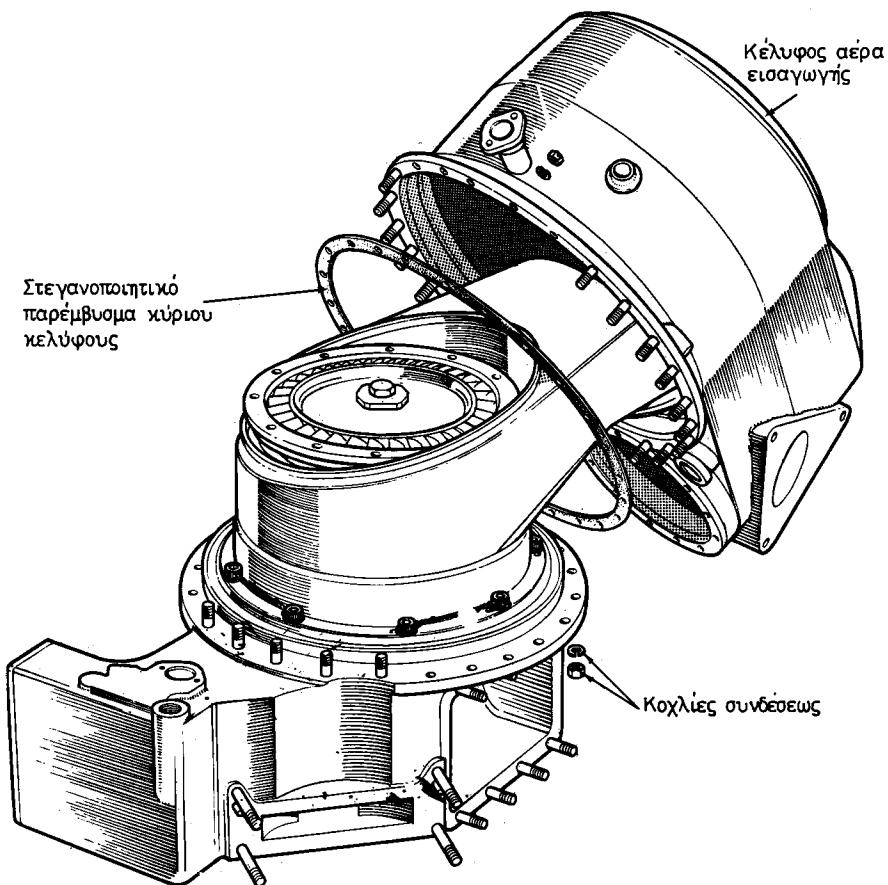
### 5) Θάλαμοι καύσεως (σχ. 11.3ε).

Οι θάλαμοι καύσεως πρέπει κατά περιόδους να αποσυναρμολογούνται μερικώς, ώστε να καθίσταται δυνατός ο έλεγχος καταστάσεως των χιτωνίων και ολόκληρου του θαλάμου για ρωγμές, αρπάγματα, στρεβλώσεις ή άλλης μορφής παραμορφώσεις. Είναι επίσης απαραίτητος ο καθαρισμός των προφυσίων των καυστήρων και ο ογκομετρικός έλεγχός τους, εργασία που απαιτεί εξειδίκευση και ειδικά όργανα. Μαζί με τα υπόλοιπα σημεία, κατά τη μερική αποσυναρμολόγηση των θαλάμων καύσεως ελέγχονται επίσης:

- Τα μπουζί.
- Τα πυρόμετρα.
- Τα οδηγητικά προφύσια και τα πτερύγια του στροβίλου.
- Τα από το θάλαμο προσιτά τμήματα του συμπιεστή.



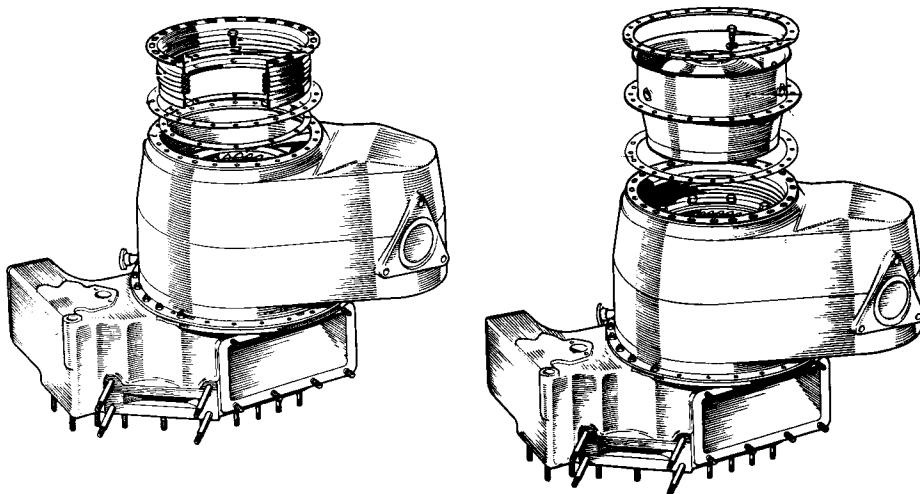
**Σχ. 11.3ε.**  
Περιοδική συντήρηση θαλάμου καύσεως.



**Σχ. 11.3στ.**  
Προσαρμογή εξωτερικού κελύφους.

### 6) Εγχυτήρες ή καυστήρες.

Οι καυστήρες πρέπει περιοδικά να ελέγχονται για την επισήμανση ρωγμών εξανθρακωμάτων, παραμορφώσεων ή αρπαγμάτων που δημιουργούνται κατά τη λειτουργία τους. Όπως είναι γνωστό, σκοπός των εγχυτήρων είναι η ψέκαση καυσίμου στο θάλαμο καύσεως κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη καύση. Ο περιοδικός έλεγχος των καυστήρων απαιτεί προσοχή ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία βλαβών. Ως κυριότερο αίτιο αντικανονικής λειτουργίας των καυστήρων, θεωρείται η λειτουργία της εγκαταστάσεως υπό χαμηλό φορτίο, γιατί ευνοείται έτσι ο σχηματισμός εξανθρακωμάτων. Για την αντιμετώπισή του συνιστάται η περιοδική και για λίγο μόνο ανάπτυξη μεγάλης ισχύος, οπότε τα εξανθρακώματα παρασύρονται πριν σκληρυνθούν.



**Σχ. 11.3ζ.**  
Συναρμολόγηση αεριοστροβίλου.

### 7) Οχετοί εισαγωγής αέρα.

Το πόσο σημαντικό είναι να ελαχιστοποιηθεί η πτώση πιέσεως στους οχετούς εισαγωγής έχει ήδη αναφερθεί και επεξηγηθεί στο σχετικό κεφάλαιο. Για την επί-τευξη του σκοπού αυτού, πρέπει, με συχνές επιθεωρήσεις των φίλτρων, υδροπαγίδων και λοιπών προστατευτικών συστημάτων να εξασφαλισθεί κατ' αρχήν η αποφυγή εμφράξεως των διόδων ή εισόδου ξένων σωματιδίων σ' αυτά.

### 8) Οχετοί εξαγωγής και σαερίων.

Οι οχετοί αυτοί έχουν κατά το δυνατό μεγάλο μέγεθος, για την ελάττωση της πτώσεως πιέσεως των διερχομένων από αυτούς και σαερίων, λόγω της άμεσης επιπτώσεως της πιέσεως αντιθίψεως επί της ισχύος της μηχανής. Πρέπει και εδώ να εξασφαλίζονται η αποφυγή μειώσεως της διατομής και η κανονική λειτουργία των υπαρχόντων σιγαστήρων.

### 9) Όργανα.

Τα βασικά όργανα ελέγχου της εγκαταστάσεως είναι:

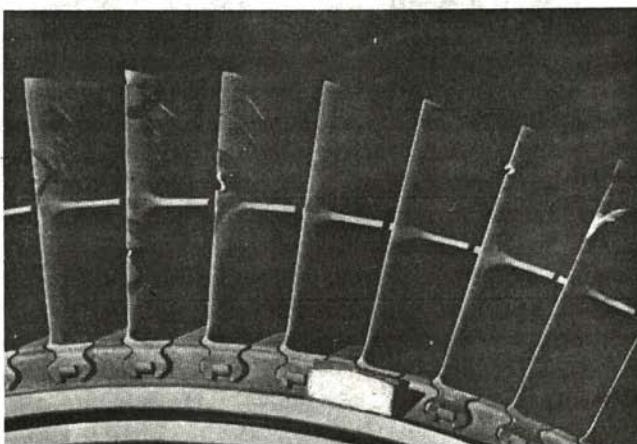
- Θερμόμετρα εξαγωγής και εισόδου και σαερίων στο στρόβιλο (Θερμοκρασία  $T_3$ ).
- Θερμόμετρα λαδιού λιπάνσεως.
- Θλιβόμετρα (πιεσόμετρα) λαδιού λιπάνσεως.
- Στροφόμετρα συμπιεστή και στροβίλων.

Αν και όλα τα παραπάνω όργανα είναι ρυθμισμένα με ακρίβεια (καλιμπράρισμα) κατά την τοποθέτησή τους, απαιτείται έλεγχος των ενδείξεών τους ανά εξάμηνο, με τη βοήθεια αντίστοιχου προτύπου για τυχόν απαιτούμενη διόρθωση.

#### 11.4 Χαρακτηριστικές σοβαρές βλάβες αεριοστροβίλων.

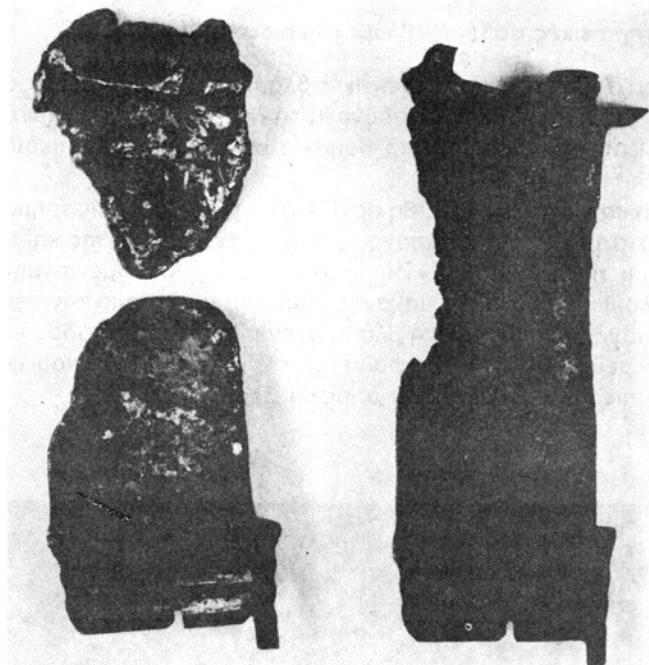
Με τον όρο σοβαρές ή καταστρεπτικές βλάβες εννοούμε εκείνες οι οποίες, όταν εκδηλωθούν ξαφνικά, καθιστούν αδύνατη τη λειτουργία της μηχανής μέχρις ότου επισκευασθεί αυτή έν δρμα, με τη βοήθεια συνήθως προσωπικού και ευκολιών που δεν διαθέτει το πλοίο.

Μια τυπική καταστροφική βλάβη αρχίζει με τη θραύση ενός τμήματος της μηχανής που υφίσταται μεγάλη καταπόνηση από τη λειτουργία της και συνεχίζεται με τις βλάβες που την ακολουθούν διαδοχικά, καθώς θραυσμένα τμήματα οδεύουν προς τα υπόλοιπα τμήματα της μηχανής, παρασυρόμενα από τον αέρα και τα καυσαέρια. Ανάλογη βεβαίως είναι η βλάβη στην περίπτωση εισόδου ενός ξένου σωματιδίου στο ρεύμα αέρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 11.4a που παρουσιάζει τα πτερύγια συμπιεστή ο οποίος έχει υποστεί βλάβη.

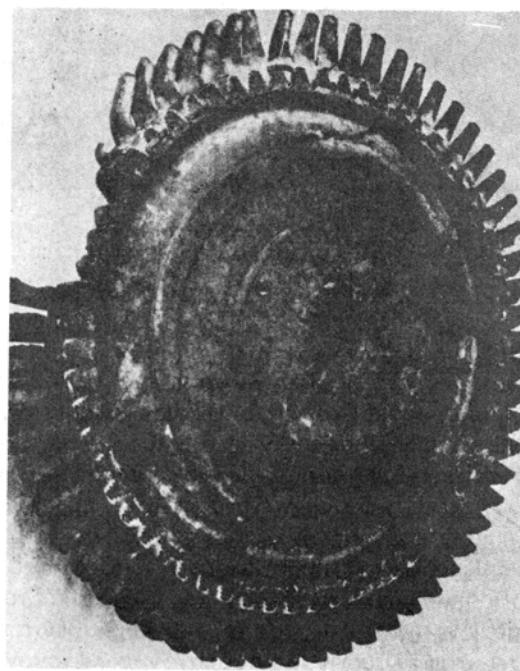


**Σχ. 11.4a.**  
Βλάβη πτερυγίων συμπιεστή.

Στο σχήμα 11.4β παρουσιάζεται η πτερύγωση ενός στροβίλου μετά από βλάβη οφειλόμενη σε διάβρωση λόγω θεικώσεως. Τα αποσπώμενα με αυτό τον τρόπο τμήματα της πτερυγώσεως δημιουργούν, με την πρόσκρουσή τους, επιπρόσθετες βλάβες. Τέλος, στο σχήμα 11.4γ παρουσιάζεται η βλάβη του δίσκου της πρώτης βαθμίδας των πτερυγίων που συνέβη στο στρόβιλο μιας αγγλικής φρεγάτας. Η βλάβη εκδηλώθηκε κατά πολύ εντυπωσιακό τρόπο και, σύμφωνα με αυτόπτες μάρτυρες, οι ευρισκόμενοι στο κατάστρωμα αναγκάσθηκαν να καλυφθούν για να αποφύγουν τα ερυθροπυρωμένα μεταλλικά τεμαχίδια από τον οχετό εξαγωγής καυσαερίων. Τα τεμαχίδια αυτά προέρχονταν από τα βλαβέντα πτερύγια, λόγω τοπικής υπερθερμάνσεως οφειλόμενης σε αντικανονική λειτουργία ορισμένων καυστήρων.



Σχ. 11.4β.  
Πτερύγια διαβρωμένα από θειάφι.



Σχ. 11.4γ.  
Βλάβη τροχού αεριοστροβίλου πολεμικού πλοίου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΩΔΕΚΑΤΟ

### ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΠΡΟΩΣΗ ΣΕ ΠΛΟΙΑ

#### 12.1 Γενικά.

Η πυρηνική ενέργεια είναι η πιο καινούργια μορφή ενέργειας που έχει χρησιμοποιηθεί για την πρόωση πλοίων κατά την τελευταία εικοσαετία, τόσο σε πολεμικά όσο και σε εμπορικά πλοία.

Παρουσιάζει πολλές αρχές ομοιότητας με την πρόωση με ατμοστροβίλους, με ουσιώδη όμως διαφορά στον τρόπο παραγωγής του ατμού. Εδώ ο ατμός παράγεται από τη θερμότητα που εκλύεται όχι από την καύση του πετρελαίου, αλλά από τις αντιδράσεις (διασπάσεις) που γίνονται στον πυρηνικό αντιδραστήρα.

Το βασικό πλεονέκτημα της πυρηνικής προώσεως είναι ότι με αυτήν αποφεύγεται ο συχνός ανεφοδιασμός σε καύσιμα, για τον οποίο, για συμβατικές εγκαταστάσεις, χρειάζεται χρόνος σε βάρος βέβαια της συνεχούς αξιοποίησεως του πλοίου\*. Τα πυρηνοκίνητα πλοία ταξιδεύουν μέχρι και 200.000 μίλια χωρίς η εγκατάστασή τους να χρειάζεται «ανεφοδιασμό».

Άλλα πλεονεκτήματα των πυρηνοκίνητων πλοίων είναι:

α) Η εκμετάλλευση του χώρου που θα καταλάμβαναν οι δεξαμενές πετρελαίου, όπου μπορεί να τοποθετηθεί πια άλλο φορτίο.

β) Η ανεξαρτητοποίηση από την ανάγκη του ατμοσφαιρικού αέρα, η οποία παρουσιάζει ιδιαίτερα πλεονεκτήματα για υποβρύχια.

γ) Η ανυπαρξία καπνοδόχων και γενικότερα οχετών εισαγωγής - εξαγωγής αέρα.

#### 12.2 Βασικές αρχές πυρηνικής φυσικής.

Υπάρχουν στη φύση 103 χημικά στοιχεία, από τα οποία, με χημικές μεθόδους μπορεί να «απομονωθεί» ως μικρότερο συστατικό τους το άτομο. Σύμφωνα με τις τελευταίες θεωρίες, το άτομο παρομοιάζεται με το ηλιακό μας σύστημα. Έτσι, στο κέντρο του ατόμου, όπως φαίνεται στο σχήμα 12.2a, υπάρχει ένας πυρήνας αντιστοιχος με τον ήλιο του ηλιακού συστήματος και γύρω από αυτόν κινούνται σε τροχιές σωματίδια, τα οποία ονομάζονται ηλεκτρόνια.

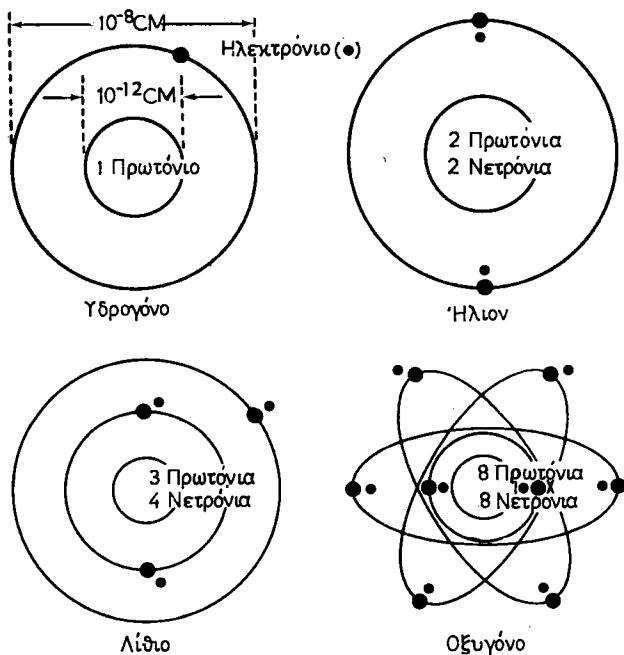
Τα ηλεκτρόνια έχουν αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο και συγκρατούνται σε τροχιές ελκόμενα από το θετικά φορτισμένο πυρήνα. Ο πυρήνας αποτελείται από δύο ειδών σωματίδια, τα πρωτόνια και τα νετρόνια. Το θετικό φορτίο του πυρήνα οφεί-

\* Αν και δεν γίνεται σύγκριση των τιμών του χρησιμοποιούμενου καυσίμου (πετρελαίου) με το αντιστοιχό «καύσιμο» της πυρηνικής εγκαταστάσεως, είναι φανερό ότι με τη σημερινή ενέργειακή κρίση, η σύγκριση αποβαίνει υπέρ της πυρηνικής ενέργειας.

λεται στα πρωτόνια, κάθε ένα από τα οποία έχει φορτίο ίσο και αντίθετο με ενός ηλεκτρονίου, ενώ τα νετρόνια (ή ουδετέροντα) δεν φέρουν κανενός είδους ηλεκτρικό φορτίο. Έτσι, ο αριθμός των πρωτονίων ενός ατόμου καθορίζει το είδος του στοιχείου, αν είναι δηλαδή οξυγόνο, υδρογόνο κλπ. Ο αριθμός των ηλεκτρονίων και το είδος των τροχιών τους καθορίζει τη χημική συμπεριφορά του στοιχείου.

Είναι φανερό ότι, υπό φυσιολογικές συνθήκες, τα άτομα έχουν ίσο αριθμό πρωτονίων και ηλεκτρονίων. Συνεπώς είναι ηλεκτρικώς ουδέτερα, αφού τα θετικά φορτία των πρωτονίων αντισταθμίζονται από τα ίσα και αντίθετα φορτία των ηλεκτρονίων.

Όπως φαίνεται στην εικόνα Α του σχήματος 12.2α, το άτομο του υδρογόνου, που είναι το ελαφρύτερο στοιχείο, έχει ένα μόνο πρωτόνιο στον πυρήνα και ένα ηλεκτρόνιο σε τροχιά, θεωρείται δε ως η μονάδα μετρήσεως των στοιχείων, έχει δηλαδή ατομική μάζα ένα.



Σχ. 12.2α.  
Άτομα χημικών στοιχείων.

Το αμέσως βαρύτερο άτομο, το ήλιο (εικόνα Β του σχήματος 12.2α), έχει τετραπλάσια μάζα σε σχέση με το υδρογόνο και θα περίμενε κανείς να έχει τέσσερα πρωτόνια. Βρέθηκε όμως ότι το ήλιο έχει δύο πρωτόνια και ότι η υπόλοιπη μάζα του οφείλεται στα δύο νετρόνια που υπάρχουν στον πυρήνα του. Γενικότερα, δύο πιο σύνθετα είναι τα άτομα, περιέχουν περισσότερα πρωτόνια και νετρόνια στον πυρήνα με αντίστοιχη αύξηση του αριθμού των περιφερομένων ηλεκτρονίων.

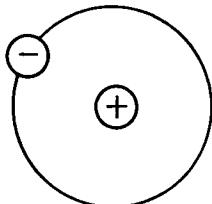
Στον πίνακα 12.2.1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των στοιχειωδών σωματιδίων της ύλης και, όπως φαίνεται, η μάζα ενός πρωτονίου είναι 1847 φορές περισσότερη από τη μάζα του ηλεκτρονίου.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 12.2.1.**  
**Χαρακτηριστικά των στοιχειωδών σωματιδίων της ύλης.**

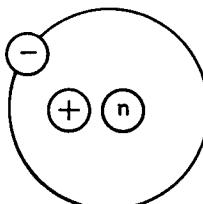
| ΣΩΜΑΤΙΔΙΟ  | ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ | ΑΤΟΜΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΑΖΑΣ |
|------------|------------------|------------------------|
| Πρωτόνιο   | +1               | 1,00758                |
| Νετρόνιο   | 0                | 1,00894                |
| Ηλεκτρόνιο | -1               | 0,00055                |

Σε αρκετές περιπτώσεις, άτομα του ίδιου χημικού στοιχείου έχουν διαφορετικό αριθμό νετρονίων και συνεπώς διαφορετική μάζα. Τα άτομα αυτά, που έχουν τον ίδιο αριθμό πρωτονίων (ίδιο ατομικό αριθμό) αλλά διαφορετικές μάζες (διαφορετικά νετρόνια) λέγονται **ισότοπα**. Τα διαφορετικά ισότοπα του ίδιου χημικού στοιχείου προσδιορίζονται από τον αριθμό ατομικής μάζας (ΑΑΜ), που είναι ο συνολικός αριθμός νετρονίων και πρωτονίων του πυρήνα τους.

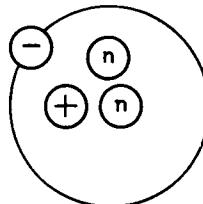
Το στοιχείο υδρογόνο έχει τρία γνωστά ισότοπα, τα οποία φαίνονται στο σχήμα 12.2β. Η απλούστερη μορφή υδρογόνου αποτελείται από ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο, ενώ οι άλλες μορφές, που ονομάζονται δευτέριο και τρίτο, έχουν στον πυρήνα τους, εκτός από το ένα πρωτόνιο, ένα και δύο νετρόνια αντίστοιχα.



Α Κοινό υδρογόνο



Β Δευτέριο



Γ Τρίτο

**Σχ. 12.2β.**

Το υδρογόνο και τα ισότοπά του.

Ο καθιερωμένος τρόπος γραφής των τριών ισοτόπων είναι:

Κοινό υδρογόνο

${}_1^1H$

Δευτέριο

${}_1^2H$

Τρίτο

${}_1^3H$

Γενικότερα, σύμφωνα με αυτό τον τρόπο γραφής, ο δείκτης που προηγείται του γράμματος του χημικού στοιχείου φανερώνει τον ατομικό αριθμό του στοιχείου, ενώ ο δείκτης (εκθέτης) που ακολουθεί το γράμμα του στοιχείου είναι ο αριθμός ατομικής μάζας. Φανερώνει δηλαδή για ποιο ισότοπο του στοιχείου πρόκειται. Είναι δηλαδή:

$$_A X^B$$

όπου:  $X$  = σύμβολο του στοιχείου,

$A$  = ατομικός αριθμός, δηλαδή αριθμός πρωτονίων και

$B$  = αριθμός ατομικής μάζας (ΑΑΜ), δηλαδή άθροισμα πρωτονίων και νετρονίων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι από τα γνωστά 103 χημικά στοιχεία υπάρχουν περίπου 1000 ισότοπα, τα περισσότερα από τα οποία είναι από τη φύση τους ραδιενεργά.

Ακριβέστερα, όλα τα ισότοπα με ατομικό αριθμό μεγαλύτερο από 83, εκλύουν φυσική ραδιενέργεια· δύσα δεν έχουν την ιδιότητα αυτή μπορούν να την αποκτήσουν, «βομβαρδίζομενα» με νετρόνια, τα οποία διαταράσσουν την ισορροπία νετρονίων – πρωτονίων του πυρήνα.

Τα από τη φύση τους ραδιενέργα ισότοπα υφίστανται **ραδιενέργος αποσύνθεση**, εκπέμποντας σωματίδια, τα λεγόμενα **άλφα, βήτα και γάμμα**. Έτσι, μετά την εκπομπή των σωματιδίων, οι πυρήνες καθίστανται ελαφρότεροι και σταθερότεροι. Η διαδικασία αυτή του μετασχηματισμού, του ισοτόπου με ακτινοβολία σωματιδίων, διέρχεται από πολλές διαδοχικές φάσεις μέχρις ότου σταθεροποιηθεί.

Ιδιαίτερη σημασία έχει ο λεγόμενος **χρόνος ημιζωής**, που είναι ο χρόνος που απαιτείται για την «αποσύνθεση» της μισής ποσότητας δεδομένου ραδιενέργου υλικού. Ο χρόνος ημιζωής διαφόρων ισοτόπων κυμαίνεται από μερικά μικροδευτέρωντα μέχρι και δισεκατομμύρια χρόνια, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στον πίνακα 12.2.2.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 12.2.2.**

| ΣΤΟΙΧΕΙΟ | ΙΣΟΤΟΠΟ                             | ΧΡΟΝΟΣ ΗΜΙΖΩΗΣ            |
|----------|-------------------------------------|---------------------------|
| Ουράνιο  | $^{92}_{\text{U}} \text{U}^{238}$   | $4,51 \times 10^9$ χρόνια |
| Ουράνιο  | $^{92}_{\text{U}} \text{U}^{235}$   | $7,13 \times 10^8$ χρόνια |
| Ράδιο    | $^{88}_{\text{Ra}} \text{Ra}^{228}$ | 1620 χρόνια               |
| Ιώδιο    | $^{53}_{\text{I}} \text{I}^{135}$   | 6,7 ώρες                  |
| Πολώνιο  | $^{84}_{\text{Po}} \text{Po}^{214}$ | $10^{-6}$                 |

Μεγάλη σημασία για την πυρηνική φυσική έχει η αρχή της διατηρήσεως της μάζας και της ενέργειας, θεωρουμένων ως σύνολο, δηλαδή (μάζα **και** ενέργεια) πριν τη μεταβολή = (Μάζα **και** ενέργεια) μετά τη μεταβολή, όπου η μάζα συνδέεται με την ενέργεια, από την περίφημη εξίσωση του Αϊνστάιν με τη σχέση:

$$E = mc^2$$

όπου:  $E$  = ενέργεια σε έργια,

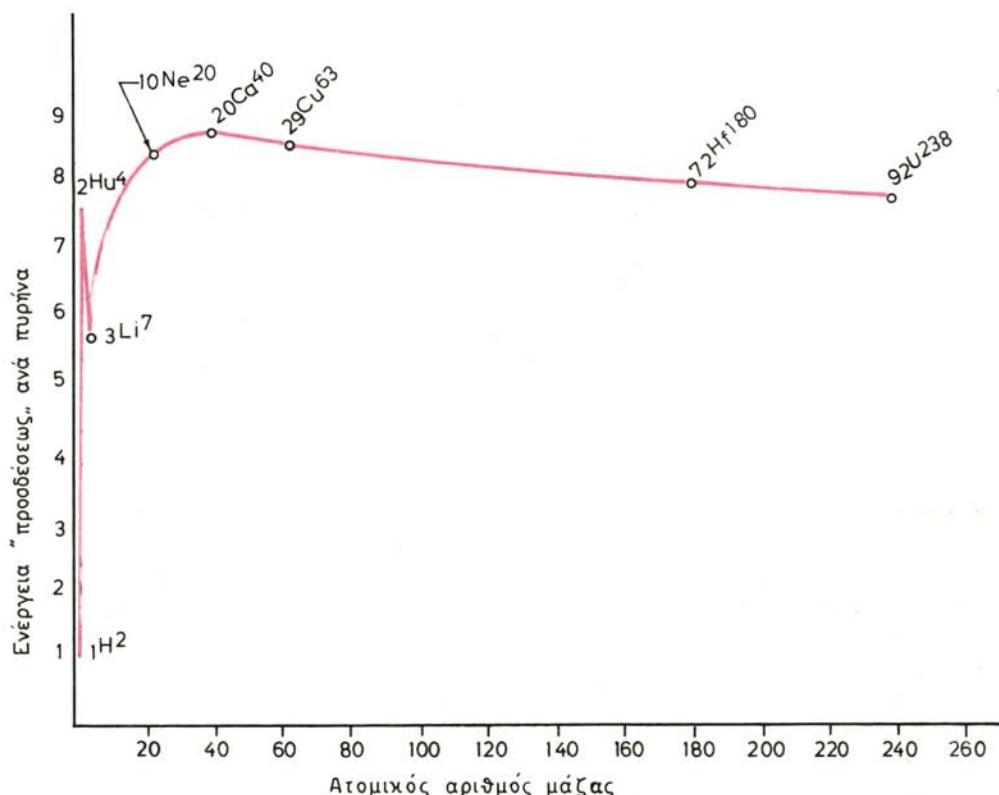
$m$  = μάζα σε γραμμάρια και

$c$  = ταχύτητα φωτός =  $3 \times 10^{10}$  cm/sec.

Στην πυρηνική φυσική, ως μονάδα μετρήσεως της ενέργειας χρησιμοποιείται το ηλεκτρονιοβόλτ (1 ev) και το πολλαπλάσιό του μεγαλεκτρονιοβόλτ (1 Mev =  $10^6$  ev).

Όπως φαίνεται στο σχήμα 12.2γ, υπάρχει συγκεκριμένη σχέση μεταξύ ατομικού αριθμού μάζας και ενέργειας. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται **ενέργεια προσδέσεως**, γιατί ισούται με την ενέργεια που αποδεσμεύεται κατά το σχηματισμό του πυρήνα από τα συστατικά του.

Αφού λοιπόν αποδεσμεύεται ενέργεια κατά το σχηματισμό του πυρήνα, θα πρέπει αντίστροφα να προσδίνεται ενέργεια κατά τη διάσπασή του. Κατά τη σχάση του ισοτόπου ουράνιο 235, η απαιτούμενη ενέργεια προσδίνεται από τα βομβαρίζοντα το ουράνιο νετρόνια. Το ουράνιο 235 μετασχηματίζεται σε ουράνιο 236 που με τη σειρά του υφίσταται αμέσως νέα σχάση σε νέο ισότοπο. Με τις διαδοχικές αυτές σχέσεις, μερικές από τις οποίες γίνονται αυτόματα, αποδεσμεύεται ένα ποσό ενέργειας αρχικά υπό μορφή κινητικής ενέργειας των σωματιδίων και στη συνέχεια υπό μορφή θερμότητας.



Σχ. 12.2γ.

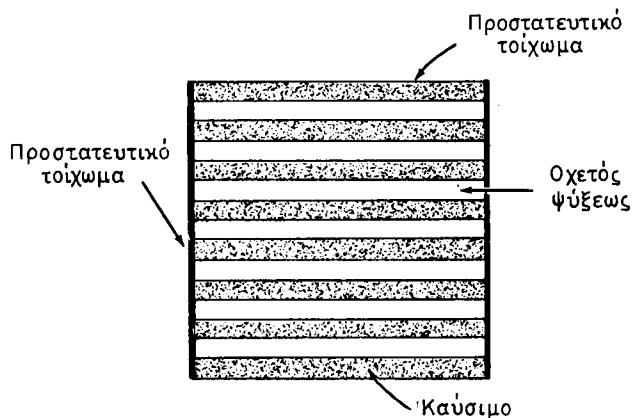
Σχέση μεταξύ ατομικού αριθμού μάζας και ενέργειας.

### 12.3 Αρχές λειτουργίας πυρηνικών εγκαταστάσεων.

Μία πυρηνική εγκατάσταση, και συγκεκριμένα ο πυρηνικός της αντιδραστήρας, πρέπει να περιέχει αρκετή ποσότητα υλικού σχάσεως, ώστε να μπορεί να διατηρήσει μόνος του τις αλυσιδωτές αντιδράσεις της σχάσεως και συνεπώς συνεχή λειτουργία. Το υλικό σχάσεως, που αποτελεί το «καύσιμο» του αντιδραστήρα, διαφέρει σε μορφή, είδος και σύνθεση, ανάλογα με τη χρήση του αντιδραστήρα. Οι περισσότεροι αντιδραστήρες εμπορικής χρήσεως χρησιμοποιούν ως «καύσιμο» εμπλούτισμένο ουράνιο σε συνδυασμό με αλουμίνιο, ζιρκόνιο και ανοξείδωτο χάλυβα διατεταγμένο σε στρώματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 12.3α.

Με τη διάταξη αυτή δημιουργείται μεγάλη επιφάνεια μεταδόσεως θερμότητας μεταξύ του «καυσίμου» και του χρησιμοποιούμενου ψυκτικού μέσου. Η εξωτερική επιφάνεια του «καυσίμου» περιορίζει την κίνηση των προϊόντων της σχάσεως και χρησιμεύει κυρίως για τη μετάδοση θερμότητας, αποτελείται δε, όπως προαναφέρθηκε, συνήθως από αλουμίνιο, ζιρκόνιο και ανοξείδωτο χάλυβα.

Ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο του πυρηνικού αντιδραστήρα είναι οι ράβδοι ελέγχου που συνήθως έχουν διπλό προορισμό: ρυθμίζουν τη ροή των νετρονίων σε επιθυμητά επίπεδα και σταματούν τη λειτουργία του αντιδραστήρα, δηλαδή



Σχ. 12.3a.

«Καύσιμο» πυρηνικού αντιδραστήρα.

διακόπουν τις αλυσιδωτές αντιδράσεις της σχάσεως. Ως υλικό κατασκευής των ράβδων ελέγχου, συνήθως, χρησιμοποιείται κάδμιο και βόριο.

Μεγάλη σημασία για τη λειτουργία του αντιδραστήρα έχει το χρησιμοποιούμενο ψυκτικό μέσο, βασικός σκοπός του οποίου είναι η απορρόφηση της δημιουργούμενης θερμότητας. Ως ψυκτικό μέσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί υγρό ή αέριο που ικανοποιεί τις εξής βασικές απαιτήσεις:

- Έχει καλούς συντελεστές μεταδόσεως θερμότητας.
- Δεν δημιουργεί οξειδώσεις στα υλικά κατασκευής.
- Δεν καθίσταται εύκολα ραδιενέργη.
- Δεν είναι υψηλού κόστους.

Με βάση τις παραπάνω απαιτήσεις, έχουν χρησιμοποιηθεί ως ψυκτικό μέσο νερό, υγρό νάτριο και διοξείδιο του άνθρακα.

Στα κατασκευαστικά στοιχεία του πυρηνικού αντιδραστήρα περιλαμβάνονται ο ανακλαστήρας, που εμποδίζει την απομάκρυνση των νετρονίων από τον κεντρικό πυρήνα, καθώς και το σύστημα προσδόσεως θερμότητας στα νετρόνια που χρησιμοποιούνται για το βομβαρδισμό της ραδιενέργου ύλης.

Τέλος, είναι αυτονόητος ο σοβαρός ρόλος του συστήματος μονώσεως - προστασίας του αντιδραστήρα, το οποίο εξυπηρετεί διπλό σκοπό, δηλαδή:

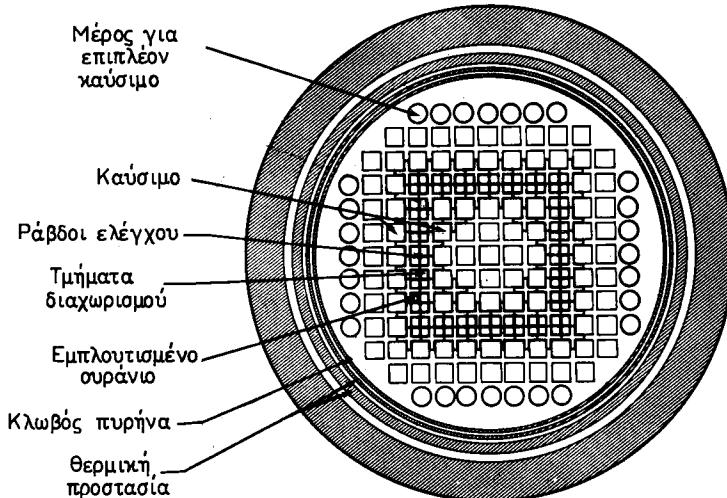
- Ελαττώνει την ακτινοβολία, ώστε να μην επηρεάζει τα όργανα ελέγχου.
- Προστατεύει το προσωπικό από την ακτινοβολία.

Το είδος του χρησιμοποιούμενου προστατευτικού υλικού εξαρτάται από τη χρήση του αντιδραστήρα και από το είδος της χρησιμοποιούμενης ακτινοβολίας. Έτσι, ενώ η προστασία από ακτινοβολία σωματίδιων άλφα επιτυγχάνεται με ένα απλό στρώμα αέρα, τα σωματίδια βήτα χρειάζονται ένα προστατευτικό τοίχωμα από αλουμίνιο ή πλαστικό υλικό και τα νετρόνια και τα σωματίδια γάμμα χρειάζονται για μόνωση μόλυβδο αρκετού πάχους. Αν και κοινός σκοπός όλων των πυρηνικών αντιδραστήρων είναι η παροχή θερμικής ενέργειας που εύκολα μετατρέπεται σε μηχανικό έργο, η σχεδίασή του διαφέρει από τύπο σε τύπο, ανάλογα με τον κατασκευαστή. Μεταξύ των διαφόρων ειδών περιλαμβάνονται:

- Ο αντιδραστήρας πίεσεως νερού (PWR).
- Ο αντιδραστήρας ψύξεως με νάτριο.

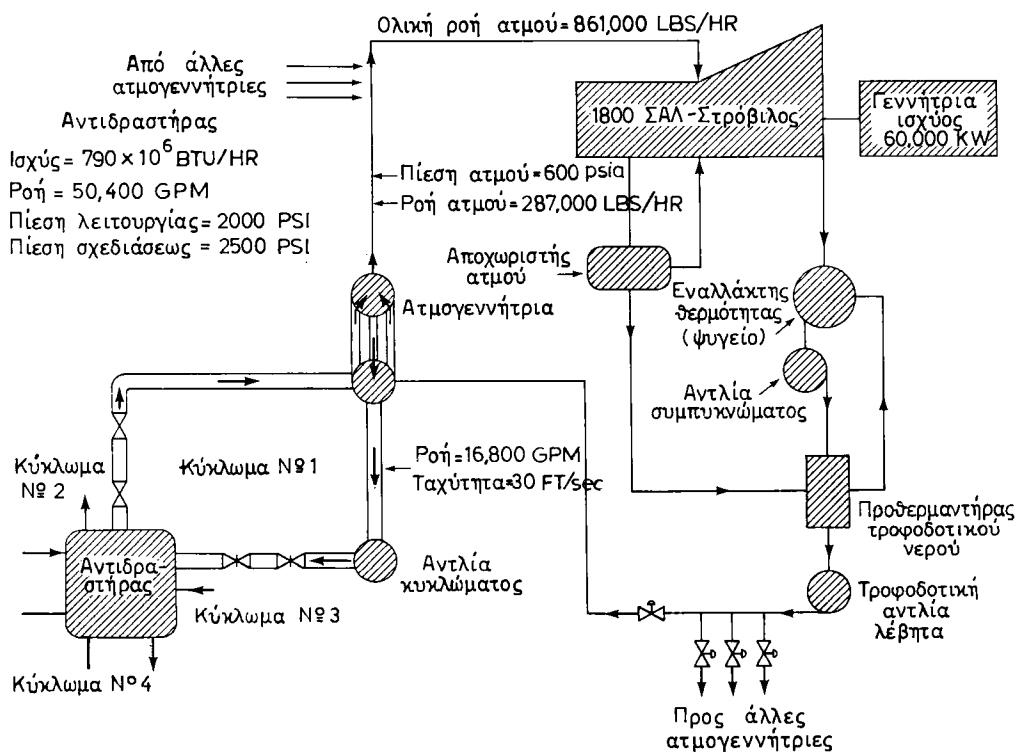
- Ο αντιδραστήρας ζέοντας νερού.
- Ο αντιδραστήρας πολλαπλασιασμού.
- Ο αντιδραστήρας ψύξεως με αέρια.

Από τους τύπους αυτούς, ο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος είναι ο αντιδραστήρας πιέσεως νερού (PWR), εγκάρσια τομή του οποίου φαίνεται στο σχήμα 12.3β. Ως «καύσιμο» χρησιμοποιεί εμπλουτισμένο ουράνιο – 235, το οποίο βρίσκεται στη θέση του τετραγώνου του σχήματος περιβαλλόμενο από ουράνιο –238. Ο τύπος αυτός του αντιδραστήρα ονομάζεται **μετατροπέας**, γιατί το ουράνιο –238 μετατρέπεται στο υλικό σχάσεως πλουτώνιο –239.



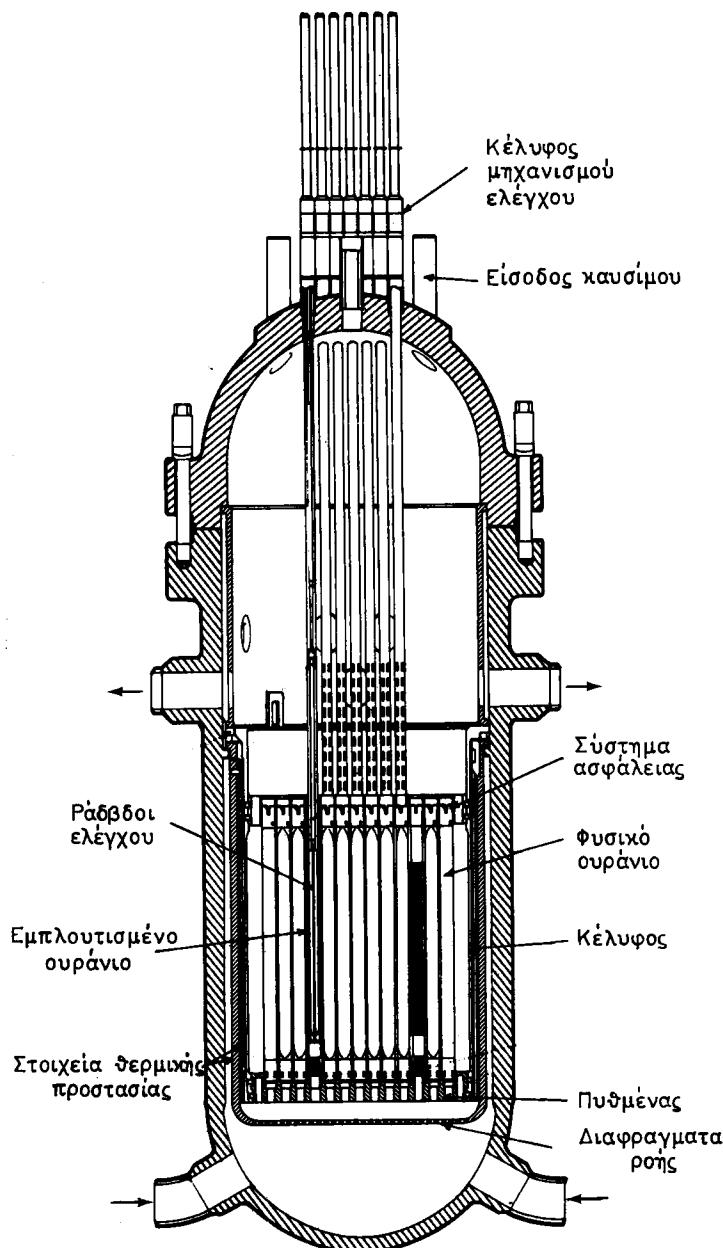
**Σχ. 12.3β.**  
Εγκάρσια τομή πυρηνικού αντιδραστήρα.

Στο σχήμα 12.3γ φαίνεται ένα σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας εγκαταστάσεως του αντιδραστήρα αυτού. Όπως φαίνεται, υπάρχουν τέσσερα κυκλώματα ψύξεως (βρόγχοι), ενώ για την πλήρη ισχύ απαιτείται η λειτουργία μόνον τριών. Κάθε βρόγχος περιλαμβάνει μια ατμογεννήτρια, μια αντλία και τις αντίστοιχες σωληνώσεις. Ως ψυκτικό μέσο χρησιμοποιείται νερό με αυξημένες απαιτήσεις καθαρότητας, πιέσεως 2000 psi, με θερμοκρασία εισόδου στον αντιδραστήρα  $T_1 = 508^{\circ}\text{F}$  και εξόδου  $T_2 = 542^{\circ}\text{F}$ . Όπως φαίνεται στο σχήμα 12.3δ, το ψυκτικό μέσο εισέρχεται από τον πυθμένα του αντιδραστήρα και το μεγαλύτερο ποσοστό οδεύει προς τα άνω μεταξύ των πλακών του «καυσίμου», ενώ το υπόλοιπο ψύχει το μονωτικό υλικό του αντιδραστήρα και τα πλευρικά του τοιχώματα. Αφού προσλάβει θερμότητα, το νερό εξέρχεται από την κορυφή του αντιδραστήρα και διά μέσου προφυσίων οδεύει προς την ατμογεννήτρια. Η ατμογεννήτρια είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας με αυλούς, εσωτερικώς των οποίων διέρχεται το νερό μετά την έξοδό του από τον αντιδραστήρα και εξωτερικώς το προς ατμοποίηση νερό που ατμοποιείται και, ως ατμός πια, κινεί τον ατμοστρόβιλο. Το νερό ψύξεως, αφού προσδώσει θερμότητα, ρέει από την ατμογεννήτρια σε μια ερμητικά κλειστή αντλία, όπως του σχήματος 12.3ε, όπου αυξάνεται ξανά η πίεσή του και ξαναρχίζει τον κλειστό κύκλο λειτουργίας του προς τον πυθμένα του αντιδραστήρα κ.ο.κ.

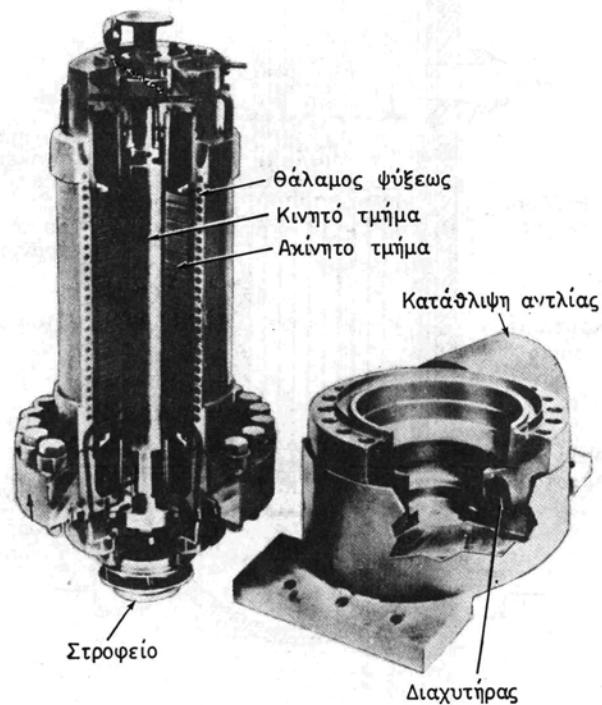
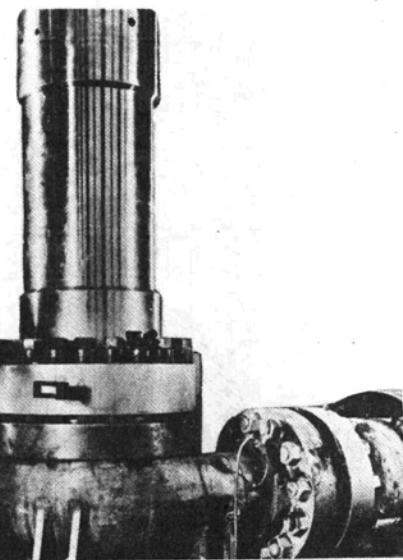


**Σχ. 12.3γ.**

Η πίεση τόσο στον αντιδραστήρα όσο και στο υπόλοιπο κύκλωμα διατηρείται με τη βοήθεια μιας δεξαμενής πιέσεως, που φαίνεται στο σχήμα 12.3στ.

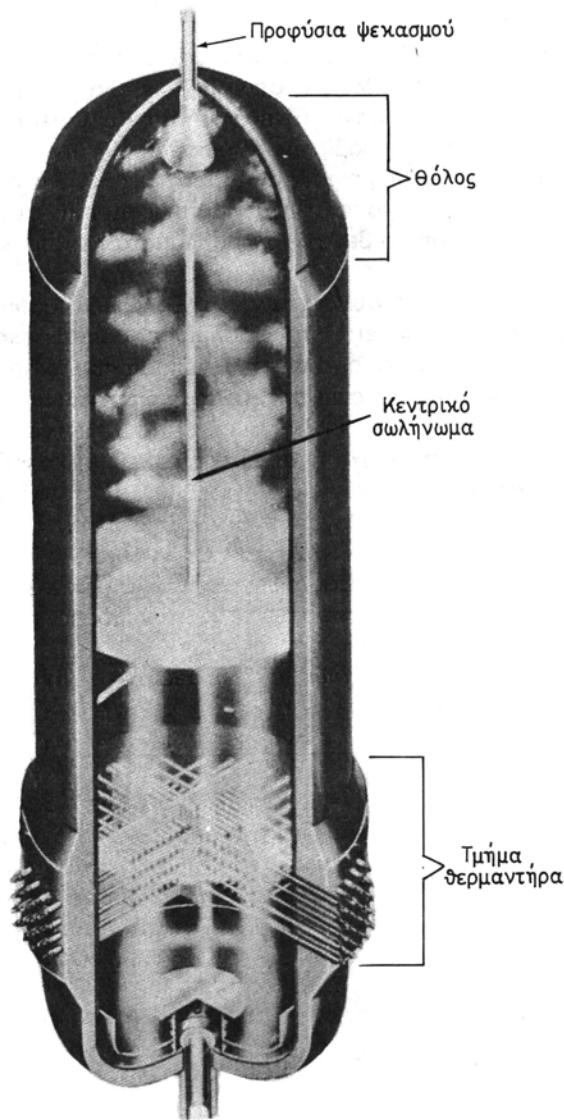


**Σχ. 12.36.**  
Διαμήκης τομή πυρηνικού αντιδραστήρα.



Σχ. 12.3ε.

Κλειστή τροφοδοτική αντλία κυκλώματος πυρηνικού αντιδραστήρα.



**Σχ. 12.3στ.**  
Δεξαμενή πιέσεως κυκλώματος πυρηνικού αντιδραστήρα.

#### 12.4 Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες στα πλοία.

Οι λεπτομέρειες εγκαταστάσεως πυρηνικών αντιδραστήρων σε πλοία τόσο πολεμικά όσο και εμπορικά αποτελούν επιμελώς φυλασσόμενο μυστικό των ενδιαφερομένων.

Σημείο που λαμβάνεται υπ' όψη για την εγκατάσταση των αντιδραστήρων σε πλοία είναι το συγκεντρωμένο βάρος της εγκαταστάσεως και οι ιδιάτερα μεγάλες

απαιτήσεις αξιοπιστίας του υλικού.

Ο θερμοδυναμικός κύκλος της εγκαταστάσεως έχει πολλές ομοιότητες με τον κύκλο ατμοστροβιλοκινήτων πλοίων, όπου βέβαια, αντί λέβητα, χρησιμοποιείται ο αντιδραστήρας και ο ατμοπαραγωγός εναλλάκτης θερμότητας, για την παραγωγή του ατμού που κινεί τους στροβίλους προώσεως.

Βέβαια, παρά το ότι οι πυρηνικοί αντιδραστήρες έχουν συμπληρώσει αρκετά χρόνια από τότε που χρησιμοποιούνται για την πρόωση των πλοίων, εξακολουθούν να υπάρχουν σε κάποιο βαθμό τα προβλήματα που προκύπτουν από τη χρήση τους.

Το σοβαρότερο από αυτά συνδέεται με την αποφυγή ραδιενεργού μολύνσεως που θα μπορούσε να συμβεί είτε από σφάλμα του προσωπικού είτε από αστοχία του υλικού. Για το λόγο αυτό, απαιτείται μεγάλος βαθμός ποιοτικού ελέγχου του υλικού και προσωπικό υψηλής στάθμης, τόσο θεωρητικών γνώσεων όσο και πρακτικής εμπειρίας.

Πυρηνοκίνητα πλοία, πολεμικά ή και εμπορικά, έχουν οι ΗΠΑ, ΕΣΣΔ, Δυτ. Γερμανία, Αγγλία, Γαλλία και Ιαπωνία.



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

Ο αεριοστρόβιλος ως θερμική μηχανή σε ναυτικές εγκαταστάσεις

|   |    |
|---|----|
| 1.1 Γενικά .....  | 1  |
| 1.2 Επιλογή της εγκαταστάσεως προώσεως του πλοίου .....                         | 1  |
| 1.2.1 Οι κυριότεροι παράγοντες για την επιλογή της εγκαταστάσεως προώσεως ..... | 2  |
| 1.3 Τι είναι ο αεριοστρόβιλος. Συνοπτική περιγραφή .....                        | 8  |
| 1.4 Κατάταξη και είδη αεριοστροβίλων .....                                      | 11 |
| 1.4.1 Απαιτήσεις φορτίου .....  | 14 |
| 1.4.2 Απαιτήσεις περιβάλλοντος .....  | 15 |
| 1.4.3 Απαιτήσεις χρήσεως .....  | 16 |
| 1.5 Πλοία κινούμενα με αεριοστροβίλους .....                                    | 17 |
| 1.5.1 Εμπορικά πλοία .....  | 17 |
| 1.5.2 Μικρά πλοία .....   | 19 |
| 1.5.3 Πολεμικά πλοία .....  | 19 |

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

Θερμικοί κύκλοι

|   |    |
|---|----|
| 2.1 Παράμετρος λειτουργίας αεριοστροβίλων .....   | 26 |
| 2.2 Απλός λειτουργίας αεριοστροβίλων .....  | 29 |
| 2.2.1 Διαφορές μεταξύ ιδεατού και πραγματικού απλού κύκλου λειτουργίας αεριοστροβίλων ..... | 33 |
| 2.2.2 Συσκευές ανακτήσεως θερμότητας (αναγεννητήρες) .....                                  | 36 |
| 2.2.3 Ενδιάμεση ψύξη (intercooling) .....   | 38 |
| 2.2.4 Αναθέρμανση (Reheating) .....   | 40 |
| 2.3 Οι πρακτικές εφαρμογές των θερμικών κύκλων .....  | 43 |
| 2.3.1 Απαιτούμενη ποσότητα αέρα σε εγκατάσταση αεριοστροβίλων .....                         | 43 |
| 2.3.2 Λόγος των έργων .....   | 46 |
| 2.3.3 Συμπερασματικές παρατηρήσεις .....  | 48 |

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

Οι βασικές μηχανές των εγκαταστάσεων αεριοστροβίλων. Στρόβιλοι και συμπιεστές

|   |    |
|---|----|
| 3.1 Γενικά .....  | 55 |
| 3.2 Αρχές λειτουργίας των στροβιλομηχανών .....                       | 55 |
| 3.3 Φυγοκεντρικοί συμπιεστές .....                                    | 57 |
| 3.4 Συμπιεστές αξονικής ροής .....                                    | 64 |
| 3.5 Στρόβιλοι .....   | 71 |
| 3.5.1 Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά στροβίλων ναυτικών εγκαταστάσεων ..... | 73 |
| 3.5.2 Στοιχειώδης ανάλυση των στροβίλων .....                         | 76 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

### Θάλαμοι καύσεως

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 4.1   | Αρχές της καύσεως και θεμελιώδεις σχέσεις .....              | 82  |
| 4.2   | Θάλαμοι καύσεως .....  | 84  |
| 4.2.1 | Πολλαπλοί ξεχωριστοί θάλαμοι μορφής σωλήνα .....             | 85  |
| 4.2.2 | Ενιαίοι θάλαμοι καύσεως μορφής περιφερειακού δακτυλίου ..... | 88  |
| 4.2.3 | Παράμετροι καύσεως συνδυασμού (canannular type) .....        | 88  |
| 4.2.4 | Θάλαμοι καύσεως αντιστρεφόμενης ροής .....                   | 90  |
| 4.3   | Παράμετροι και στόχοι σχεδίασεως θαλάμου καύσεως .....       | 91  |
| 4.4   | Κατασκευαστικές λεπτομέρειες των θαλάμων καύσεως .....       | 94  |
| 4.5   | Καυστήρες των θαλάμων καύσεως (μπεκ) .....                   | 97  |
| 4.6   | Βοηθητικά συστήματα καύσεως .....                            | 100 |
| 4.6.1 | Σύστημα παρακολουθήσεως της καύσεως .....                    | 100 |
| 4.6.2 | Σύστημα αρχικής εναύσεως .....                               | 100 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

### Εναλλάκτες θερμότητας και συσκευές ανακτήσεως θερμότητας (αναγεννητήρες)

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 5.1   | Στοιχεία θεωρίας. Ροή θερμότητας .....  | 102 |
| 5.2   | Οι εναλλάκτες θερμότητας στις εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων .....                        | 105 |
| 5.3   | Πρακτική χρησιμοποίηση των εναλλακτών θερμότητας .....                                  | 109 |
| 5.4   | Θερμοδυναμική συμπεριφορά εναλλακτών και αναγεννητήρων θερμότητας .....                 | 113 |
| 5.4.1 | Πρακτικές εφαρμογές υπολογισμού στοιχείων εναλλακτών και αναγεννητήρων θερμότητας ..... | 114 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

### Η λειτουργία του αεριοστροβίλου σε ναυτικές εγκαταστάσιες προώσεως

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 6.1   | Γενικά .....   | 121 |
| 6.2   | Οι κυριότερες χαρακτηριστικές λειτουργίες των αεριοστροβίλων ..... | 122 |
| 6.2.1 | Χαρακτηριστικές στρεπτικής ροπής - ισχύος - αριθμού στροφών .....  | 122 |
| 6.2.2 | Χαρακτηριστικές καμπύλες καταναλώσεων .....                        | 125 |
| 6.2.3 | Καμπύλες διορθώσεως .....  | 128 |
| 6.3   | Χαρακτηριστικές λειτουργίας ελίκων .....                           | 131 |
| 6.4   | Συνεργασία έλικας και μηχανής προώσεως .....                       | 137 |
| 6.4.1 | Περίπτωση πολλών κινητηρίων μηχανών και διαφορετικών φορτίων ..... | 138 |
| 6.4.2 | Το θεμελιώδες πρόβλημα .....                                       | 140 |
| 6.5   | Σύνθετα κυκλώματα εγκαταστάσεων προώσεως .....                     | 145 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

### Καύσμα και λιπαντικά σε αεριοστροβίλους

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 7.1   | Γενικά .....                                | 148 |
| 7.2   | Ιδιότητες καυσίμων .....                    | 151 |
| 7.2.1 | Φυσικοχημικές ιδιότητες καυσίμων .....      | 151 |
| 7.2.2 | Ιδιότητες των προσμίξεων των καυσίμων ..... | 154 |
| 7.3   | Προδιαγραφές καυσίμων .....                 | 155 |
| 7.4   | Συστήματα καυσίμου .....                    | 160 |
| 7.4.1 | Υλικά δεξαμενών και δικτύων καυσίμων .....  | 164 |
| 7.4.2 | Επεξεργασίες των καυσίμων .....             | 165 |
| 7.5   | Τα αέρια καύσμα στους αεριοστροβίλους ..... | 166 |
| 7.6   | Τα λιπαντικά στους αεριοστροβίλους .....    | 169 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΟ

**Συστήματα προσαγωγής - απαγωγής αέρα και καυσαερίων σε εγκαταστάσεις  
ναυτικών αεριοστροβίλων**

|  |     |
|--|-----|
| 8.1 Γενικά .....   | 171 |
| 8.2 Πτώση πιέσεως στονς αγωγούς .....  | 174 |
| 8.3 Η ρύπανση του αέρα εισαγωγής από άλατα .....                                       | 176 |
| 8.4 Δημιουργία και αντιμετώπιση θορύβου στους οχετούς εγκαταστάσεων αεριοστροβίλων ... | 181 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΑΤΟ

**Η εγκατάσταση του αεριοστροβίλου στο σκάφος**

|   |     |
|---|-----|
| 9.1 Γενικά .....                                  | 185 |
| 9.2 Εκλογή της θέσεως της μηχανής .....           | 185 |
| 9.3 Σύνδεση του αεριοστροβίλου με την έλικα ..... | 193 |
| 9.4 Η έδραση του αεριοστροβίλου στο σκάφος .....  | 198 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ

**Βοηθητικά συστήματα αεριοστροβίλων**

|  |     |
|--|-----|
| 10.1 Γενικά .....                                  | 203 |
| 10.2 Συστήματα λιπάνσεως .....                     | 203 |
| 10.3 Προστασία από φωτιά .....                     | 208 |
| 10.4 Συστήματα προστασίας από παγετό .....         | 210 |
| 10.5 Συστήματα εκκινήσεως του αεριοστροβίλου ..... | 211 |
| 10.6 Δίκτυα του αεριοστροβίλου .....               | 215 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΔΕΚΑΤΟ

**Συντήρηση και επισκευές αεριοστροβίλων**

|   |     |
|---|-----|
| 11.1 Γενικά .....   | 216 |
| 11.2 Συνήθεις διαδικασίες συντηρήσεως .....                 | 217 |
| 11.3 Γενικές αρχές σχεδίου συντηρήσεως αεριοστροβίλων ..... | 225 |
| 11.4 Χαρακτηριστικές σοβαρές βλάβες αεριοστροβίλων .....    | 233 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΩΔΕΚΑΤΟ

**Πυρηνική πρόσωση σε πλοία**

|  |     |
|--|-----|
| 12.1 Γενικά .....                                    | 235 |
| 12.2 Βασικές αρχές πυρηνικής φυσικής .....           | 235 |
| 12.3 Αρχές λειτουργίας πυρηνικών εγκαταστάσεων ..... | 239 |
| 12.4 Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες στα πλοία .....      | 245 |

**COPYRIGHT ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ**

---

