

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

**"ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ
ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΩΝ - ΚΥΚΛΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
ΤΟΥΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥΣ"**



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ : 1) ΓΩΓΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

2) ΤΣΙΚΟΛΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ : 1) ΜΑΥΡΙΔΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

2) ΓΙΑΝΝΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΠΑΤΡΑ - ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας και αναφέρεται στους αεριοστροβίλους και τη μελέτη χαρακτηριστικών τους.

Στην αρχή γίνεται μια γενική επισκόπηση των αεριοστροβίλων. Αναφέρονται και μελετούνται οι διάφορες κατηγορίες αυτών, καθώς και των κυρίων εξαρτημάτων τους. Υλικά, καύσιμα, θερμική ανάκτηση κτλ. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι διάφοροι κύκλοι λειτουργίας των αεριοστροβίλων και τέλος αναλύονται οι αεροθερμικές εξισώσεις, οι αποδόσεις και τα χαρακτηριστικά αυτών για συμπιεστή και αεριοστροβίλο καθώς και ο υπολογισμός απόδοσής τους. Αυτά αποτελούν και τον σκοπό της εργασίας μας, μια γενικότερη θεωρητική μελέτη πάνω στους αεριοστροβίλους.

Ευχαριστούμε θερμά τους επιβλέποντες καθηγητές μας κ. Κωνσταντίνο Μαυρίδη και κ. Ιωάννη Γιαννάκη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μας προσέφεραν για την πραγματοποίηση της πτυχιακής εργασίας.

ΓΩΓΟΣ ΚΩΝ/ΝΟΣ-ΤΣΙΚΟΛΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία αναφέρεται στη μελέτη βασικών χαρακτηριστικών λειτουργίας και σχεδιασμού ενός αεριοστροβίλου κυρίως βιομηχανικής χρήσης και μεγάλων απαιτήσεων στις εφαρμογές που έχει χρησιμοποιηθεί.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε τρία κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά και σχετική ανάλυση στις κατηγορίες των αεριοστροβίλων, των εξαρτημάτων τους, των καυσίμων που χρησιμοποιούν και τις περιβαλλοντικές επιδράσεις που θα υπάρξουν από τη λειτουργία τους σε διάφορες εφαρμογές. Επίσης ανάλυση γίνεται για χρήση κατάλληλων υλικών και επιστρώσεων σε διάφορα μέρη της δομής του αεριοστροβίλου καθώς και στη δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας από το αεριοστροβίλο.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση του θεωρητικού και του πραγματικού κύκλου λειτουργίας ενός αεριοστροβίλου και αναλύονται μέθοδοι ψύξης μερών του αεριοστροβίλου και επαύξησης ισχύος του μέσω διαφόρων τεχνικών.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αναλύονται οι βασικές εξισώσεις υπολογισμού ενός στροβίλου και αναλύονται τα χαρακτηριστικά απόδοσης του.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σελίδα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^Ο: ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ	6
1.1. Κύκλος αεριοστρόβιλου σε συνδυασμένο κύκλο ή μέθοδο συμπαραγωγής.....	6
1.2. Απόδοση αεριοστρόβιλου.....	8
1.3. Θεωρήσεις σχεδιασμού αεριοστρόβιλου.....	10
1.4. Κατηγορίες αεριοστρόβιλων.....	15
1.4.1. Βαρέων υπηρεσιών τύπου πλαισίου αεριοστρόβιλοι.....	15
1.4.2. Αεριοστρόβιλοι αεροσκαφών.....	17
1.4.3. Βιομηχανικοί αεριοστρόβιλοι.....	19
1.4.4. Μικροί αεριοστρόβιλοι.....	21
1.4.5. Μικροστρόβιλοι.....	23
1.5. Σημαντικά εξαρτήματα των αεριοστρόβιλων.....	24
1.5.1. Συμπιεστές.....	24
1.5.2. Αναγεννητές.....	30
1.5.3. Καυστήρες.....	31
1.5.4. Τυπικές ρυθμίσεις καυστήρα.....	33
1.6. Τύπος καυσίμων.....	38
1.7. Περιβαλλοντικές επιδράσεις.....	40
1.8. Τμήμα διαστολέα στρόβιλου.....	41
1.8.1. Στρόβιλος ακτινικής εισροής.....	41

1.8.2. Στρόβιλος μικτής ροής.....	42
1.8.3. Στρόβιλος αξονικής ροής.....	43
1.9. Υλικά.....	45
1.10. Επιστρώσεις.....	47
1.11. Ανάκτηση θερμότητας αεροστροβίλου.....	47
1.12. Συμπληρωματική τροφοδότηση των συστημάτων ανάκτησης θερμότητας.....	50
1.12.1. Όργανα μέτρησης και έλεγχοι.....	51

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ ΚΑΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ.....

2.1. Ο κύκλος Brayton.....	54
2.1.1. Επίδραση αναγέννησης.....	57
2.1.2. Αύξηση του έργου εξόδου του απλού κύκλου αεροστροβίλου.....	60
2.2. Ανάλυση πραγματικού κύκλου.....	62
2.2.1. Ο απλός κύκλος.....	63
2.2.2. Απλός κύκλος με χωρισμένο άξονα.....	64
2.2.3. Ο αναγεννητικός κύκλος.....	65
2.2.4. Απλός κύκλος με ενδιάμεση ψύξη.....	67
2.2.5. Κύκλος με αναθέρμανση.....	68
2.2.6. Αναγεννητικός κύκλος αεροστροβίλου με ενδιάμεση ψύξη και αναθέρμανση.....	69
2.2.7. Κύκλος έγχυσης ατμού.....	69
2.2.8. Αναγεννητικός κύκλος με εξατμιστή.....	73
2.3. Ο κύκλος Brayton - Rankine.....	75
2.4. Σύνοψη της ανάλυσης των κύκλων.....	77
2.5. Γενική επισκόπηση των μονάδων συνδυασμένου κύκλου.....	79
2.6. Κύκλος αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα.....	84
2.7. Επαύξηση ισχύος.....	85
2.7.1. Ψύξη εισόδου.....	85
2.7.2. Έγχυση συμπιεσμένου αέρα, ατμού ή νερού.....	86

2.7.3. Τεχνικές ψύξης εισόδου.....	86
2.7.4. Συνδυασμός συστημάτων εξατμιστικής ψύξης και ψύξης εισόδου.....	89
2.7.5. Συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.....	90
2.7.6. Έγχυση συμπιεσμένου αέρα, ατμού ή νερού για την αύξηση της ισχύος.....	90
2.8. Σύνοψη στα συστήματα επαύξησης ισχύος.....	94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΔΟΣΕΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΚΑΙ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ.....

3.1. Αεροθερμodynamική στροβιλομηχανών.....	98
3.1.1. Ιδανικό αέριο.....	99
3.1.2. Επίδραση συμπίεστος.....	100
3.2. Αεροθερμικές εξισώσεις.....	102
3.2.1. Εξίσωση συνέχειας.....	102
3.2.2. Εξίσωση ορμής.....	103
3.2.3. Εξίσωση ενέργειας.....	105
3.3. Αποδόσεις.....	105
3.3.1. Αδιαβατική απόδοση.....	105
3.3.2. Πολυτροπική απόδοση.....	107
3.4. Διαστατική Ανάλυση.....	107
3.5. Χαρακτηριστικά απόδοσης συμπιεστή.....	110
3.6. Χαρακτηριστικά απόδοσης στροβίλου.....	112
3.7. Υπολογισμός απόδοσης αεριοστροβίλου.....	113
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	120

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Επισκόπηση των αεριοστρόβιλων.

Ο αεριοστρόβιλος είναι μια μονάδα παραγωγής ενέργειας, ο οποίος παράγει μια μεγάλη ποσότητα ενέργειας για το μέγεθος και το βάρος του. Η παροχή υπηρεσιών του αεριοστρόβιλου, έχει βρεθεί πως αυξάνεται τα τελευταία 40 χρόνια, στον τομέα της ενέργειας, τόσο μεταξύ των επιχειρήσεων κοινής ωφελείας και εμπορικών εγκαταστάσεων, όσο και στην πετροχημική βιομηχανία, σε επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας σε όλο τον κόσμο. Η πυκνότητα, το μικρό βάρος και η πολλαπλή εφαρμογή-χρήση καυσίμων, το καθιστούν φυσική μονάδα παραγωγής ενέργειας για τις υπεράκτιες (off-shore) πλατφόρμες. Σήμερα υπάρχουν αεριοστρόβιλοι, που λειτουργούν με φυσικό αέριο, ντίζελ, νάφθα, μεθάνιο, αργό πετρέλαιο, χαμηλά-BTU αέρια, αεριοποιημένα καύσιμα πετρέλαια και αέρια βιομάζας.

Τα τελευταία 20 χρόνια, υπάρχει μια μεγάλη ανάπτυξη στον τομέα της τεχνολογίας αεριοστρόβιλων. Ανάπτυξη, με αιχμή του δόρατος την ανάπτυξη της τεχνολογίας υλικών, των νέων επενδύσεων και των νέων συστημάτων ψύξης. Αυτό, σε συνδυασμό με την αύξηση στην αναλογία πίεσης του συμπιεστή, αύξησε την θερμική απόδοση του αεριοστρόβιλου από περίπου 15% σε πάνω από 45%.

Επειδή η κατανομημένη παραγωγή έχει πολύ συγκεκριμένο χώρο, το κόστος θα ποικίλει και η αιτιολόγηση της εγκατάστασης αυτών των τύπων των συστημάτων θα διαφέρει. Οι τοποθεσίες για κατανομημένη παραγωγή ενέργειας διαφέρουν, από τις μεγάλες μητροπολιτικές περιοχές έως τις πλαγιές της οροσειράς των Ιμαλαΐων. Τα οικονομικά από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτώνται από το κόστος των καυσίμων, την ταχύτητα της αποδοτικότητας, το κόστος συντήρησης (και το αρχικό κόστος), όλα με αυτή τη σειρά. Η επιλογή της τοποθεσίας εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές ανησυχίες, όπως είναι οι εκπομπές θορύβου, η διαθεσιμότητα των καυσίμων, το μέγεθος και το βάρος.

1.1. Κύκλος αεριοστρόβιλου σε συνδυασμένο κύκλο ή μέθοδο συμπαραγωγής.

Η χρησιμοποίηση των καυσαερίων του αεριοστρόβιλου, για παραγωγή ατμού ή τη θέρμανση των άλλων μέσων μεταφοράς θερμότητας, ή ακόμα και για την χρήση της ψύξης ή θέρμανσης κτιρίων και τμημάτων πόλεων, δεν είναι μια νέα έννοια και αυτή τη στιγμή αξιοποιούνται στο μέγιστο των δυνατοτήτων τους.

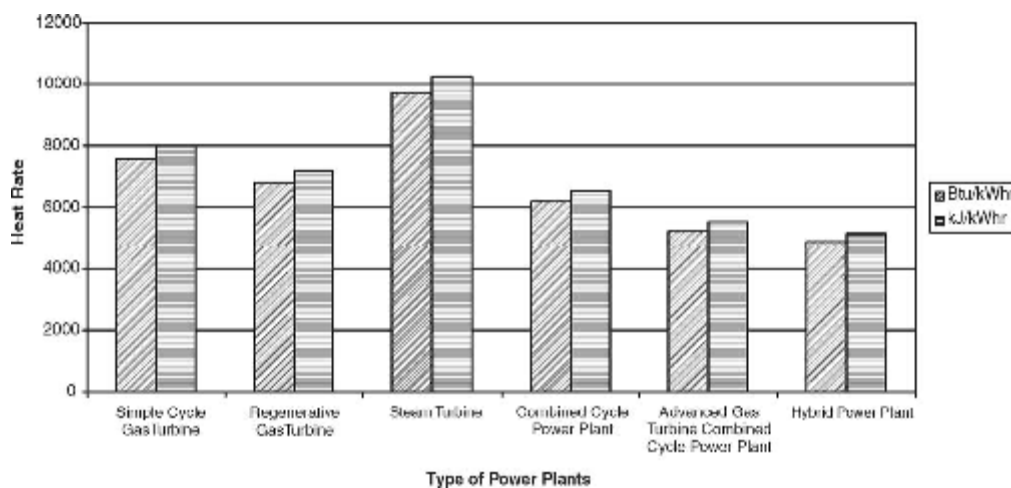
Οι μονάδες παραγωγής ενέργειας που καίνε ορυκτά καύσιμα, της δεκαετίας του 1990 και έως τις αρχές της νέας χιλιετίας, θα είναι οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου, με τον αεριοστρόβιλο να είναι το επίκεντρο της μονάδας. Εκτιμάται ότι μεταξύ 1997-2012 θα υπάρχουν επιπλέον 150GW ηλεκτρικής ενέργειας περίπου. Αυτές οι εγκαταστάσεις έχουν αντικαταστήσει τις μεγάλες μονάδες ατμοστρόβιλων, που ήταν οι κύριες μονάδες παραγωγής ενέργειας με ορυκτά καύσιμα, τη δεκαετία του 1980. Η μονάδα παραγωγής συνδυασμένου κύκλου δεν είναι νέα σαν έννοια, δεδομένου ότι ορισμένες είχαν τεθεί σε λειτουργία από τα μέσα της δεκαετίας του 1950. Αυτές οι μονάδες έγιναν με νέους αεριοστρόβιλους υψηλής δυναμικότητας και απόδοσης .

Η νέα αγορά της μετατροπής ενέργειας θα έχει πολλές νέες και καινοτόμες ιδέες σε εγκαταστάσεις συνδυασμένου κύκλου ισχύος. Η Εικόνα 1-1 δείχνει τα ποσοστά θερμότητας αυτών των εργοστασίων, σε παρόν και μέλλον και η Εικόνα 1-2 δείχνει τις αποδόσεις των

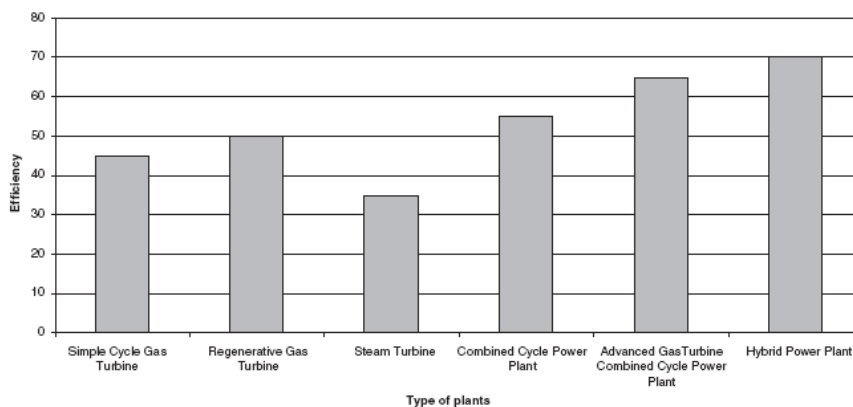
ιδίων μονάδων. Οι μονάδες που αναφέρονται είναι οι αεριοστρόβιλοι απλού κύκλου (Simple Cycle Gas Turbine, SCGT) με θερμοκρασίες ανάφλεξης των 2400°F (1315°C), αναγεννητικοί αεριοστρόβιλοι (Regenerative Gas Turbines, RGT), οι ατμοστρόβιλοι (Steam Turbines, ST), οι μονάδες παραγωγής συνδυασμένου κύκλου (Combined Cycle Power Plants, CCGP), οι μονάδες παραγωγής ενέργειας με προκεχωρημένο συνδυασμένο κύκλο (Advanced Combined Cycle Power Plants, ACCPP), όπως μονάδες παραγωγής ενέργειας με χρήση συνδυασμένου κύκλου αεριοστρόβιλου και τέλος, τους υβριδικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας (Hybrid Power Plants, HPP).

Πρέπει να σημειωθεί ότι είναι γενικά απαραίτητη (πριν την κάθε επιλογή μεθόδου) μια ανάλυση της ανταγωνιστικής κατάστασης των διαφόρων τύπων των σταθμών παραγωγής ενέργειας, του κόστους κεφαλαίου, του ποσοστού θερμότητας, του κόστους λειτουργίας και συντήρησης, της διαθεσιμότητας και αξιοπιστίας τους καθώς και του χρόνου που απαιτείται για το σχεδιασμό τους. Εξετάζοντας (μέσα από σχετικές διεθνείς έρευνες) το κόστος κεφαλαίου και τον χρόνο εγκατάστασης των νέων σταθμών παραγωγής ενέργειας, είναι προφανές ότι ο αεριοστρόβιλος είναι η καλύτερη επιλογή για την μέγιστη δυνατή ενέργεια. Οι μονάδες ατμοστρόβιλου είναι περίπου 50% υψηλότερες σε αρχικό κόστος 800 \$ ~ 1000 \$/KW - από εγκαταστάσεις συνδυασμένου κύκλου, που είναι περίπου 400 \$ ~ 900 \$/KW. Οι πυρηνικοί σταθμοί είναι οι πιο ακριβοί. Το υψηλό αρχικό τους κόστος καθώς και το μεγάλο χρονικό διάστημα στον τομέα των κατασκευών τους, καθιστούν μια τέτοια μονάδα μη ρεαλιστική για μια ακανόνιστη λειτουργία.

Στον τομέα της απόδοσης, οι μονάδες παραγωγής ενέργειας ατμοστρόβιλου έχουν απόδοση περίπου 35%, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες του συνδυασμένου κύκλου, οι οποίες έχουν μια απόδοση της τάξης του 55%. Η νεώτερη τεχνολογία αεριοστρόβιλων θα έχει συνδυασμένο κύκλο απόδοσης μεταξύ 60-65%. Ως γενικός κανόνας, μια αύξηση της απόδοσης του 1% θα μπορούσε να σημαίνει ότι 3,3% περισσότερα κεφάλαια μπορούν να επενδυθούν.



Εικόνα 1-1 : Τυπικά ποσοστά θερμότητας των διαφόρων τύπων μονάδων.



Εικόνα 1-2 : Τυπικές αποδόσεις των διαφόρων τύπων μονάδων.

Ο χρόνος που απαιτείται για να εγκαταστήσει κανείς μια μονάδα ατμού από την αρχή μέχρι την παραγωγή είναι περίπου 42-60 μήνες σε σύγκριση με τους 22-36 μήνες για μονάδες συνδυασμένου κύκλου. Ο πραγματικός χρόνος κατασκευής είναι περίπου 18 μήνες, ενώ οι περιβαλλοντικές άδειες σε πολλές περιπτώσεις διαρκούν 12 μήνες και οι αντίστοιχες μηχανικές 6-12 μήνες. Ο χρόνος που απαιτείται για να τεθεί η μονάδα σε λειτουργία επηρεάζει τα οικονομικά της, με το μεγαλύτερο κεφάλαιο να χρησιμοποιείται χωρίς επιστροφή, το εργοστάσιο να συσσωρεύει τόκους, ασφάλιση και φόρους. Είναι προφανές από αυτό, ότι όσο το φυσικό αέριο ή το πετρέλαιο είναι διαθέσιμο, η επιλογή των μονάδων συνδυασμένου κύκλου είναι κάτι παραπάνω από προφανής.

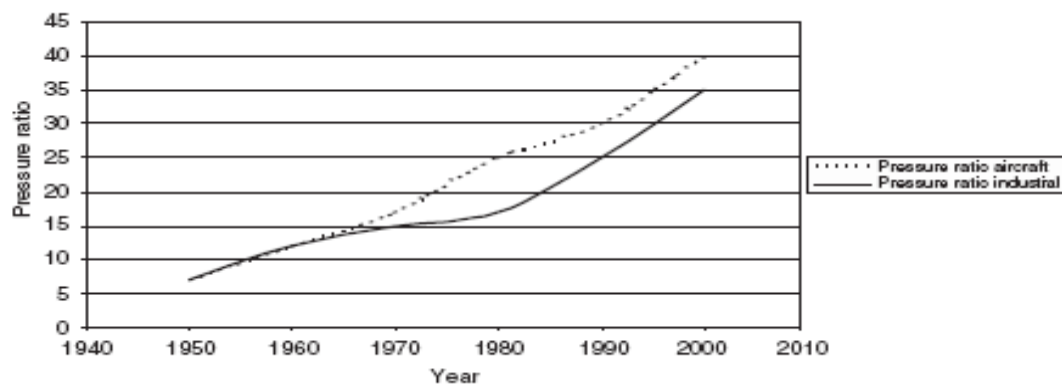
1.2. Απόδοση αεριοστροβίλου.

Οι αεροδιαστημικοί κινητήρες είναι οι ηγέτες στο μεγαλύτερο μέρος της τεχνολογίας του αεριοστροβίλου. Τα κριτήρια σχεδιασμού για τις μηχανές αυτές ήταν η υψηλή αξιοπιστία, η υψηλή απόδοση, με πολλές εκκινήσεις και ευέλικτη λειτουργία σε όλο τον φάκελο πτήσης. Η διάρκεια ζωής του κινητήρα των περίπου 3500 ωρών μεταξύ των μεγάλων γενικών επισκευών θεωρήθηκε καλή. Η απόδοση του αεροδιαστημικού κινητήρα πάντα ήταν αξιολογημένη κατά κύριο λόγο στην αναλογία ώθησης/ βάρους του. Η αύξηση στην αναλογία ώθησης/βάρους του κινητήρα, επιτυγχάνεται με την δημιουργία υψηλής ποιότητας περυγίων στο συμπιεστή καθώς και με τη βελτιστοποίηση της αναλογίας της πίεσης και θερμοκρασίας ανάφλεξης του στροβίλου για μέγιστη απόδοση έργου εξόδου ανά μονάδα ροής.

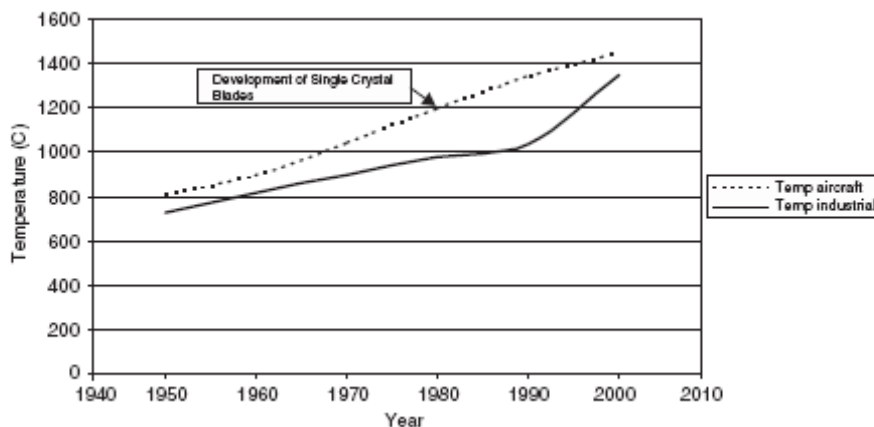
Ο βιομηχανικός αεριοστροβίλος (Industrial Gas Turbine) έδωσε έμφαση στη μακρά διάρκεια ζωής και αυτή η συντηρητική προσέγγιση είχε ως αποτέλεσμα, σε πολλές απόψεις, να εγκαταλειφθεί η υψηλή απόδοση σε μη ομαλή λειτουργία. Ο βιομηχανικός αεριοστροβίλος ήταν συντηρητικός με την αναλογία πίεσης και τις αρχικές θερμοκρασίες ανάφλεξης. Βέβαια αυτό έχει αλλάξει τα τελευταία 10 χρόνια, από την εισαγωγή των "Αεροδηγούμενου Αεριοστροβίλου" (Aero-Derivative Gas Turbine), ο βιομηχανικός αεριοστροβίλος έχει βελτιώσει σημαντικά τις επιδόσεις του σε όλα τα λειτουργικά θέματα. Αυτό έχει οδηγήσει σε δραματική μείωση του χάσματος των επιδόσεων μεταξύ των δύο

αυτών τύπων αεροστροβίλων. Ο αεροστρόβιλος μέχρι σήμερα στη συνδυασμένη λειτουργία κύκλου, αντικαθιστά ταχύτατα τον ατμοστρόβιλο ως κύριος πάροχος του φορτίου βάσης της ηλεκτρικής ενέργειας σε ολόκληρο τον κόσμο. Αυτό ισχύει ακόμη και στην Ευρώπη και στις Η.Π.Α., όπου οι μεγάλοι ατμοστρόβιλοι ήταν το μόνο είδος ενέργειας φορτίου βάσης στον τομέα της ενέργειας από ορυκτά καύσιμα. Ο αεροστρόβιλος από τη δεκαετία του 1960 ως τα τέλη της δεκαετίας του 1980 είχε χρησιμοποιηθεί μόνο ως ενέργεια αιχμής στις χώρες αυτές. Είχε χρησιμοποιηθεί ως φορτίο βάσης, κυρίως στις "αναπτυσσόμενες χώρες", όπου η ανάγκη για ενέργεια αυξάνονταν ραγδαία, έτσι ώστε η αναμονή του από τρία έως έξι χρόνια για μια μονάδα ατμού να μην είναι αποδεκτή.

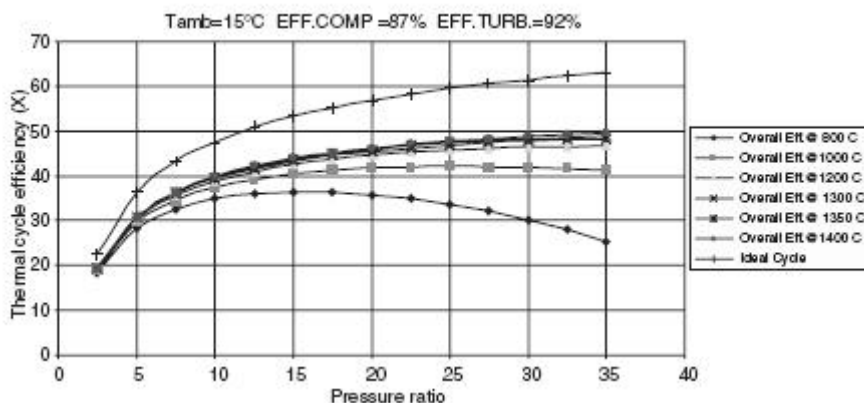
Οι Εικόνες 1-3 και 1-4 δείχνουν την αύξηση της αναλογίας πίεσης και θερμοκρασίας ανάφλεξης. Η αύξηση τόσο του λόγου πίεσης όσο και της θερμοκρασίας ανάφλεξης που είναι παράλληλες μεταξύ τους, καθώς και οι δύο αυξήσεις είναι αναγκαίες για την επίτευξη της βέλτιστης θερμικής απόδοσης.



Εικόνα 1-3 : Ανάπτυξη της αναλογίας πίεσης του κινητήρα με την πάροδο των ετών.



Εικόνα 1-4 : Η τάση στη βελτίωση της θερμοκρασίας ανάφλεξης.



Εικόνα 1-5 : Συνολική απόδοση κύκλου.

Η αύξηση στην αναλογία πίεσης αυξάνει την θερμική απόδοση του αεριοστροβίλου όταν συνοδεύεται με αύξηση της θερμοκρασίας όπτησης στροβίλου. Η Εικόνα 1-5 δείχνει την επίδραση στην συνολική απόδοση του κύκλου καθώς αυξάνεται η αναλογία πίεσης και η θερμοκρασία ανάφλεξης. Η αύξηση της αναλογίας πίεσης αυξάνει τη συνολική απόδοση σε μια δεδομένη θερμοκρασία, εντούτοις αυξάνοντας την αναλογία πίεσης πέραν μιας ορισμένης τιμής σε οποιαδήποτε δεδομένη θερμοκρασία ανάφλεξης μπορεί πραγματικά να οδηγήσει στη μείωση της συνολικής απόδοσης του κύκλου.

Κατά το παρελθόν, ο αεριοστρόβιλος θεωρούνταν ως σχετικά μη αποδοτική πηγή ενέργειας σε σύγκριση με άλλες. Η απόδοση της ήταν τόσο χαμηλή, περίπου 15% στις αρχές του 1950. Σήμερα η απόδοσή της είναι της τάξης του 45-50%, το οποίο μεταφράζεται σε ένα ποσοστό θερμότητας της τάξεως των 7852 BTU/kW-hr (8000 kJ/kW-hr). Ο περιοριστικός παράγοντας για τους περισσότερους αεριοστροβίλους ήταν η θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου. Με νέα συστήματα ψύξης με τη χρήση ατμού ή κλιματιζόμενου αέρα και σημαντικές ανακαλύψεις στη μεταλλουργία περυγίων, υψηλότερες θερμοκρασίες στροβίλου έχουν επιτευχθεί. Οι νέοι αεριοστρόβιλοι έχουν θερμοκρασίες εισόδου της τάξης των 2600°F (1427°C), αναλογίες πίεσης 40:1 με απόδοση 45% και άνω.

1.3. Θεωρήσεις σχεδιασμού αεριοστροβίλου.

Ο αεριοστρόβιλος είναι η καταλληλότερη κινητήρια δύναμη όταν λαμβάνονται υπόψη ανάγκες, όπως το κόστος κεφαλαίου, ο χρόνος από τον σχεδιασμό μέχρι την ολοκλήρωση, το κόστος συντήρησης και το κόστος των καυσίμων. Έχει το χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου και συντήρησης σε σύγκριση με τις άλλες σημαντικές κινητήριες δυνάμεις. Επίσης έχει τον ταχύτερο χρόνο ολοκλήρωσης μέχρι την πλήρη λειτουργία του σε μια μονάδα. Μειονέκτημα του ήταν ο υψηλός ρυθμός θερμότητας, ωστόσο αυτό έχει αντιμετωπιστεί και οι νέες τουρμπίνες είναι μεταξύ των πλέον αποδοτικών τύπων των κινητήριων μηχανών. Ο συνδυασμός των κύκλων της εγκατάστασης αυξάνει περαιτέρω την απόδοση σε επίπεδα κοντά στο 60%.

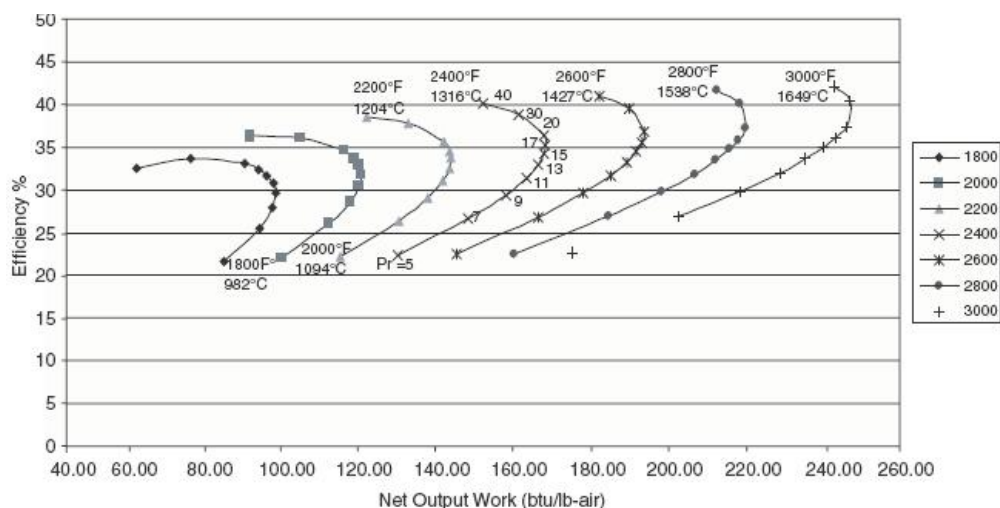
Ο σχεδιασμός του κάθε αεριοστροβίλου πρέπει να ανταποκρίνεται σε βασικά κριτήρια με βάση λειτουργικούς λόγους. Τα σημαντικότερα από αυτά τα κριτήρια είναι τα εξής:

1. Υψηλή απόδοση.
2. Υψηλή αξιοπιστία και κατά συνέπεια μεγάλη διαθεσιμότητα.
3. Ευκολία στη συντήρηση
4. Ευκολία της εγκατάστασης και της προμήθειας του.
5. Συμμόρφωση με τα περιβαλλοντικά πρότυπα.
6. Ενσωμάτωση των βοηθητικών και συστημάτων ελέγχου, που έχουν υψηλό βαθμό αξιοπιστίας.
7. Ευελιξία για την ικανοποίηση διαφόρων αναγκών σε συντήρηση και καύσιμα.

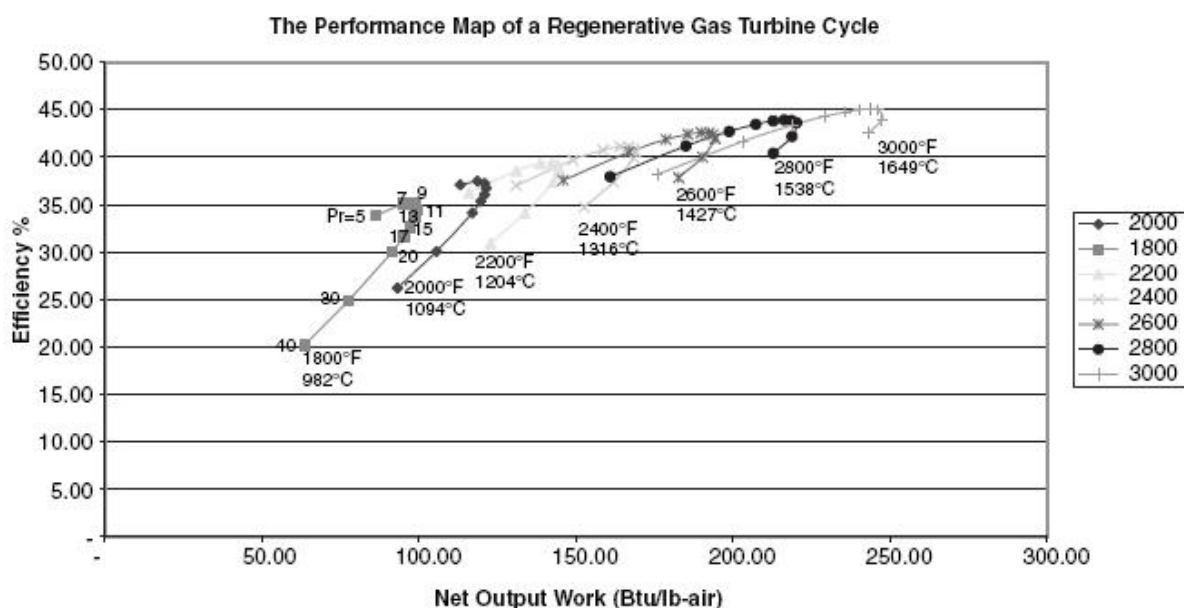
Μια ματιά σε κάθε ένα από τα κριτήρια αυτά, θα επιτρέπουν στον χρήστη να κατανοήσει καλύτερα τις απαιτήσεις.

Οι δύο παράγοντες, οι οποίοι επηρεάζουν περισσότερο την υψηλή απόδοση ενός στροβίλου, είναι οι αναλογίες πίεσης και η θερμοκρασία. Ο συμπιεστής αξονικής ροής, που παράγει το αέριο υψηλής πίεσης στον στροβίλο, έχει δει δραματική αλλαγή καθώς η αναλογία πίεσης του αεριοστροβίλου αυξήθηκε από 7:1 έως 40:1. Η αύξηση στην αναλογία πίεσης αυξάνει τη θερμική απόδοση του αεριοστροβίλου όταν συνοδεύεται με αύξηση της θερμοκρασίας ανάφλεξης του στροβίλου. Η αύξηση της αναλογίας πίεσης αυξάνει τη συνολική απόδοση σε μια δεδομένη θερμοκρασία, εντούτοις αυξάνοντας την αναλογία πίεσης πέραν μιας ορισμένης τιμής σε οποιαδήποτε δεδομένη θερμοκρασία ανάφλεξης μπορεί πραγματικά να οδηγήσει σε μείωση της συνολικής απόδοσης του κύκλου. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι πολύ υψηλές αναλογίες πίεσης τείνουν να μειώνουν την αυτονομία λειτουργίας του συμπιεστή στροβίλου. Αυτό αναγκάζει τον συμπιεστή στροβίλου να μην είναι πολύ ανεκτικός στην συσσώρευση ρύπων στο φίλτρο εισροής αέρος και στα πτερύγια του συμπιεστή και έτσι δημιουργεί μεγάλες πτώσεις στην απόδοση και την απόδοση του κύκλου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να οδηγήσει σε απότομη αύξηση του συμπιεστή, η οποία με τη σειρά της μπορεί να οδηγήσει σε σβήσιμο του κινητήρα, ή ακόμα και σε σοβαρές ζημιές και σε αστοχία των πτερυγίων του συμπιεστή και των ακτινικών εδράνων και εδράνων ώθησης του αεριοστροβίλου.

Η επίδραση της θερμοκρασίας ανάφλεξης είναι σημαντική - για κάθε 100°F (55,5°C), αύξηση της θερμοκρασίας, το έργο εξόδου αυξάνεται κατά 10% και δίνει περίπου 1% αύξηση της απόδοσης. Υψηλότερες αναλογίες πίεσης και θερμοκρασίες εισόδου του στροβίλου βελτιώνουν την απόδοση του απλού κύκλου του αεριοστροβίλου. Η Εικόνα 1-6 δείχνει την απόδοση ενός απλού κύκλου αεριοστροβίλου ως συνάρτηση της αναλογίας πίεσης και της θερμοκρασίας εισόδου.



Εικόνα 1-6 : Χάρτης απόδοσης απλού κύκλου αεριοστροβίλου.



Εικόνα 1-7 : Χάρτης απόδοσης αναγεννητικού αεριοστροβίλου.

Ένας άλλος τρόπος για να επιτευχθούν υψηλότερες αποδόσεις είναι με αναγεννητές. Η Εικόνα 1-7 δείχνει την επίδραση της αναλογίας πίεσης και θερμοκρασίας στην απόδοση και στο έργο για έναν αναγεννητικό κύκλο. Η επίδραση της αναλογίας πίεσης για τον κύκλο αυτό είναι αντίθετη με αυτή που σημειώθηκε στον απλό κύκλο. Οι αναγεννητές μπορούν να αυξήσουν την απόδοση μέχρι και 15-20% στις τωρινές θερμοκρασίες λειτουργίας. Οι βέλτιστες αναλογίες πίεσης είναι περίπου 20:1 για ένα τέτοιο σύστημα σε σύγκριση με το 40:1 για τον απλό κύκλο στις σημερινές υψηλότερες θερμοκρασίες εισόδου στροβίλου που αρχίζουν να προσεγγίζουν τους 3000°F (1649°C).

Η υψηλή διαθεσιμότητα και αξιοπιστία είναι οι πιο σημαντικές παράμετροι κατά τον σχεδιασμό ενός αεριοστροβίλου. Η διαθεσιμότητα μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας είναι το ποσοστό του χρόνου όπου η μονάδα είναι διαθέσιμη για την παραγωγή ενέργειας σε οποιαδήποτε χρονική περίοδο. Η αξιοπιστία της μονάδας είναι το ποσοστό του χρόνου μεταξύ των προγραμματισμένων γενικών επισκευών.

Ο βασικός ορισμός της διαθεσιμότητας μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας ορίζεται ως:

$$A=(P-S-F)/P \quad (1-1)$$

όπου:

P = Το χρονικό διάστημα, σε ώρες, συνήθως αυτό υποτίθεται ως ένα έτος, το οποίο ανέρχεται σε 8760 ώρες.

S = Προβλεπόμενες ώρες διακοπής λειτουργίας για προγραμματισμένη συντήρηση.

F = Αναγκαστική διακοπή λειτουργίας (ή απρόβλεπτη) εξαιτίας επισκευών.

Ο βασικός ορισμός της αξιοπιστίας μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας ορίζεται ως:

$$R=(P-F)/P \quad (1-2)$$

Η διαθεσιμότητα και η αξιοπιστία έχουν πολύ σημαντικό αντίκτυπο στην οικονομία των μονάδων. Η αξιοπιστία είναι απαραίτητη, όταν η ενέργεια που απαιτείται θα πρέπει να υπάρχει. Όταν η ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη θα πρέπει να παράγεται ή να αγοράζεται και μπορεί να είναι πολύ δαπανηρή κατά τη λειτουργία της μονάδας. Οι προγραμματισμένες διακοπές λειτουργίας έχουν προγραμματιστεί για τις περιόδους εκτός αιχμής. Αυτές είναι όταν παράγεται το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας και συνήθως δημιουργούνται ποικίλες δεσμεύσεις τιμολόγησης ανάλογα με τη ζήτηση. Πολλές συμφωνίες αγοράς ενέργειας έχουν ρήτρες, οι οποίες περιλαμβάνουν πληρωμές δυνατότητας της μονάδας, καθιστώντας έτσι τη διαθεσιμότητα της μονάδας κρίσιμη για τα οικονομικά της.

Η αξιοπιστία μιας μονάδας εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως είναι το είδος του καυσίμου, τα προγράμματα προληπτικής συντήρησης, ο τρόπος λειτουργίας, τα συστήματα ελέγχου και οι θερμοκρασίες ανάφλεξης.

Για να επιτευχθεί υψηλή διαθεσιμότητα και αξιοπιστία, ο σχεδιαστής πρέπει να λάβει υπόψη πολλούς παράγοντες. Μερικά από τα πιο σημαντικά ζητήματα, τα οποία διέπουν το σχεδιασμό, είναι οι τάσεις πτερυγίων και άξονα, οι φορτίσεις των πτερυγίων, η ακεραιότητα του υλικού (δεν υπάρχουν ρωγμές), τα βοηθητικά συστήματα και τα συστήματα ελέγχου. Οι υψηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται για υψηλές αποδόσεις έχουν καταστροφικές συνέπειες στη ζωή των πτερυγίων του στροβίλου. Πρέπει να παρέχεται κατάλληλη ψύξη για την επίτευξη θερμοκρασιών των μεταλλικών πτερυγίων μεταξύ 1000°F (537°C) και 1300°F (704°C) κάτω από τα επίπεδα της έναρξης της εν θερμώ διάβρωσης. Συνεπώς, ο κατάλληλος τύπος συστημάτων ψύξης με κατάλληλες επιστρώσεις πτερυγίων και τα υλικά, απαιτούνται για να διασφαλιστεί η υψηλή αξιοπιστία του στροβίλου.

Η λειτουργικότητα αποτελεί σημαντικό μέρος οποιουδήποτε σχεδιασμού, αφού γρήγορες επαναφορές έχουν ως αποτέλεσμα την υψηλή διαθεσιμότητα σε ένα στρόβιλο και μειώνουν

τη συντήρηση και τις λειτουργικές δαπάνες. Η παροχή υπηρεσιών μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλους ελέγχους, όπως είναι η παρακολούθηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων, η παρακολούθηση των κραδασμών του άξονα και ο έλεγχος για κύματα αέριων ρύπων. Επίσης, ο σχεδιαστής θα πρέπει να περιλαμβάνει μικρές πύλες για γρήγορους οπτικούς ελέγχους των θερμών μερών του συστήματος. Διάσπαση περιβλημάτων για γρήγορη αποσυναρμολόγηση, δίοδοι ισορροπίας πεδίου για εύκολη πρόσβαση στα επίπεδα ισορροπίας και δεξαμενές καυστήρα, τα οποία μπορούν εύκολα να αποσυναρμολογηθούν χωρίς την αφαίρεση ολόκληρου του θερμού τμήματος, είναι μερικοί από τους πολλούς τρόπους που διευκολύνουν την παροχή σωστών συντηρήσεων.

Η ευκολία εγκατάστασης και προμήθειας των απαιτούμενων μερών είναι ένας ακόμη λόγος για τη χρήση αεριοστροβίλων. Μία μονάδα αεριοστροβίλου μπορεί να ελεγχθεί και να συσκευαστεί στο εργοστάσιο. Η χρήση της μονάδας πρέπει να προγραμματίζεται προσεκτικά έτσι ώστε να προκαλεί όσο το δυνατόν λιγότερους κύκλους εκκίνησης. Οι συχνές εκκινήσεις και διακοπές λειτουργίας μπορούν να μειώσουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής της μονάδας.

Οι περιβαλλοντικές εκτιμήσεις είναι κρίσιμες κατά το σχεδιασμό του κάθε συστήματος. Ο αντίκτυπος του συστήματος στην περιβαλλοντική πρέπει να είναι εντός των νόμιμων ορίων και επομένως πρέπει να αντιμετωπιστεί από τον σχεδιαστή προσεκτικά. Οι καυστήρες είναι το πιο κρίσιμο συστατικό και ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να ληφθεί για τον σχεδιασμό τους για να έχουμε παροχή ελάχιστης αιθάλης και χαμηλής εκπομπής NO_x. Οι υψηλές θερμοκρασίες οδηγούν σε αύξηση των εκπομπών NO_x από τους αεριοστροβίλους. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα αρχικά να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα των εκπομπών NO_x με έγχυση νερού ή ατμού στον καυστήρα. Το επόμενο στάδιο ήταν η δημιουργία των καυστήρων ξηρών χαμηλών NO_x (Dry Low NO_x Combustors). Η ανάπτυξη των νέων Dry Low NO_x καυστήρων υπήρξε ένα πολύ κρίσιμο συστατικό για τη μείωση της παραγωγής NO_x καθώς η θερμοκρασία ανάφλεξης του αεριοστροβίλου είναι αυξημένη. Οι νέοι χαμηλοί σε NO_x καυστήρες αυξάνουν τον αριθμό των ακροφυσίων των καυσίμων και την πολυπλοκότητα των ελεγκτικών αλγορίθμων.

Μειώνοντας τις ταχύτητες εισόδου και παρέχοντας κατάλληλους σιγαστήρες εισόδου μπορούμε να μειώσουμε το θόρυβο του αέρα. Σημαντικό είναι το έργο από τη NASA για περιβλήματα αεροσυμπιεστή που έχουν μειώσει σημαντικά το θόρυβο.

Τα βοηθητικά συστήματα και τα συστήματα ελέγχου πρέπει να σχεδιάζονται προσεκτικά, δεδομένου ότι είναι συχνά υπεύθυνα για τις διακοπές στην λειτουργία πολλών μονάδων. Τα συστήματα λίπανσης, ένα από τα κρίσιμα βοηθητικά συστήματα, θα πρέπει να σχεδιάζονται με ένα εφεδρικό σύστημα και θα πρέπει να είναι όσο πιο κοντά στην απόδειξη αποτυχίας το δυνατό. Οι προκεχωρημένοι αεριοστροβίλοι ελέγχονται όλοι ψηφιακά και έχουν ενσωματωμένη την παρακολούθηση σε απευθείας σύνδεση της κατάστασης σε κάποιο βαθμό. Η προσθήκη παρακολούθησης των νέων συνεχούς ροής δεδομένων, απαιτεί νέα όργανα μέτρησης. Τα συστήματα ελέγχου παρέχουν επιτάχυνση χρόνου και θερμοκρασίας-χρόνου ελέγχους για τις εκκινήσεις, καθώς και τον έλεγχο των ποικίλων βαλβίδων έναντι των αναρροφήσεων. Σε ταχύτητες λειτουργίας πρέπει να ρυθμίζουν εφοδιασμό καυσίμων και εμφάνιση δονήσεων, θερμοκρασίες και πιέσεις σε ολόκληρο το εύρος.

Η ευελιξία στην συντήρηση και στα καύσιμα είναι κριτήρια, τα οποία ενισχύουν ένα σύστημα στροβίλου, αλλά δεν είναι αναγκαία για κάθε εφαρμογή. Η έλλειψη ενέργειας απαιτεί από τους στροβίλους να λειτουργούν στη μέγιστη απόδοσή τους. Αυτή η ευελιξία ενδέχεται να επιφέρει το σχεδιασμό δύο αξόνων με ενσωματωμένο στροβίλο ισχύος που είναι ξεχωριστός και δεν είναι συνδεδεμένος με τη μονάδα αεριοποιητή. Πολλαπλές εφαρμογές

καυσίμων είναι τώρα σε μεγαλύτερη ζήτηση, ιδίως όταν διάφορα καύσιμα μπορεί να είναι σε έλλειψη σε διαφορετικές περιόδους του έτους.

1.4. Κατηγορίες αεριοστροβίλων.

Ο απλός κύκλος αεριοστροβίλου ταξινομείται σε πέντε μεγάλες κατηγορίες:

1. **Frame Type Heavy-Duty Gas Turbines (Βαρέων υπηρεσιών τύπου πλαισίου αεριοστροβίλοι).** Οι μονάδες πλαισίου είναι οι μεγάλες μονάδες παραγωγής ενέργειας που κυμαίνονται από 3 MW έως 480 MW στον απλό κύκλο, με αποδόσεις που κυμαίνονται από 30-46%.
2. **Aircraft-Derivative Gas Turbines Aero-derivative (Αεροδηγούμενοι αεριοστροβίλοι αεροσκαφών).** Όπως αναφέρει και η ονομασία τους, αυτοί είναι μονάδες παραγωγής ενέργειας, οι οποίοι προέρχονται από την αεροδιαστημική βιομηχανία όντας η κινητήρια δύναμη των αεροσκαφών. Οι μονάδες αυτές έχουν προσαρμοστεί στην βιομηχανία ηλεκτροπαραγωγής με την αφαίρεση των παρακαμπτήριων ανεμιστήρων και την προσθήκη ενός στροβίλου ισχύος στην έξοδό τους. Οι μονάδες αυτές κυμαίνονται σε ισχύ από 2,5 MW έως περίπου 50 MW. Οι αποδόσεις αυτών των μονάδων μπορεί να κυμαίνεται από 35-45%.
3. **Industrial Type-Gas Turbines (Βιομηχανικού τύπου αεριοστροβίλοι).** Αυτοί κυμαίνονται σε εύρος από περίπου 2,5 MW-15 MW. Αυτός ο τύπος του στροβίλου χρησιμοποιείται εκτενώς σε πολλές εγκαταστάσεις πετροχημικών για συστήματα κίνησης αεροσυμπιεστή. Οι αποδόσεις αυτών των μονάδων είναι περίπου στο 30%.
4. **Small Gas Turbines (Μικροί αεριοστροβίλοι).** Αυτοί οι αεριοστροβίλοι κυμαίνονται από περίπου 0,5 MW-2,5 MW. Έχουν συχνά φυγοκεντρικούς συμπιεστές και στροβίλους ακτινικής εισροής. Οι αποδόσεις σε εφαρμογές απλού κύκλου κυμαίνονται από 15-25%.
5. **Micro-Turbines (Μικροστροβίλοι).** Αυτοί οι στροβίλοι κυμαίνονται από 20 kW-350 kW. Η αύξηση αυτών των στροβίλων ήταν δραματική από τα τέλη της δεκαετίας του 1990, δεδομένου ότι υπάρχει μια άνοδος στην αγορά κατανεμημένης παραγωγής.

1.4.1. Αεριοστροβίλοι βαρέων υπηρεσιών τύπου πλαισίου.

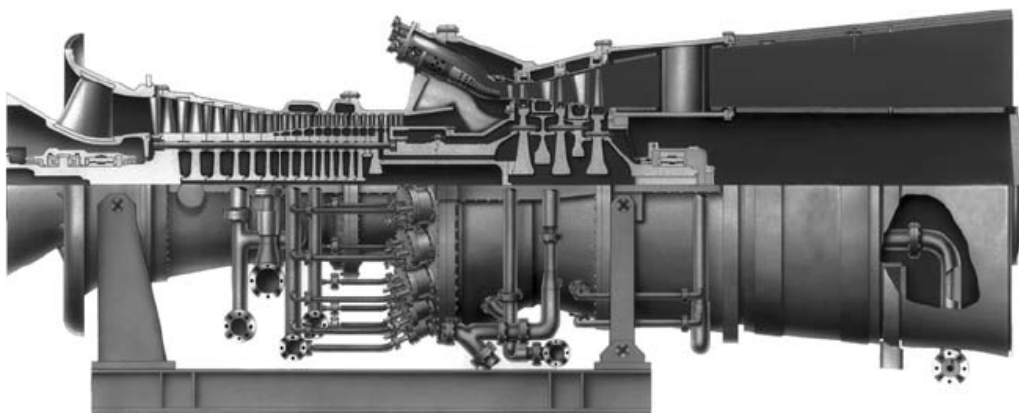
Αυτοί οι αεριοστροβίλοι είχαν σχεδιαστεί λίγο μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο και εισήχθησαν στην αγορά στις αρχές του 1950. Η πρώτη σχεδίαση βαρέως τύπου αεριοστροβίλου ήταν σε μεγάλο βαθμό μια επέκταση του σχεδιασμού ατμοστροβίλου. Οι περιορισμοί του βάρους και του χώρου δεν ήταν σημαντικοί παράγοντες για αυτές τις επίγειες μονάδες και έτσι τα χαρακτηριστικά του σχεδιασμού που περιλαμβάνονται είναι περιβλήματα βαριών τοιχωμάτων που χωρίζονται σε οριζόντιες κεντρικές γραμμές, ρουλεμάν, μεγάλης

διαμέτρου καυστήρες, τμήματα παχιών αεροτομών για πτερύγια και στάτορες και μεγάλες μετωπικές περιοχές. Η συνολική αναλογία πίεσης αυτών των μονάδων ποικίλει από 5:1 για τις προγενέστερες μονάδες έως 35:1 για τις μονάδες σήμερα. Οι θερμοκρασίες εισόδου στροβίλου έχουν αυξηθεί και είναι τόσο υψηλές όσο 2500°F (1371°C) για ορισμένες από αυτές τις μονάδες. Το γεγονός αυτό καθιστά τον αεριοστρόβιλο μια από τις αποδοτικότερες κινητήριες δυνάμεις στην αγορά σήμερα, φθάνοντας αποδόσεις του 50%. Οι προβλεπόμενες θερμοκρασίες πλησιάζουν τους 3000°F (1649°C) και, εάν επιτευχθούν, θα κάνουν τον αεριοστρόβιλο ακόμη πιο αποδοτική μονάδα. Για την επίτευξη αυτών των υψηλών θερμοκρασιών, η ψύξη ατμού χρησιμοποιείται στα τελευταία σχέδια για την επίτευξη των στόχων της διατήρησης των θερμοκρασιών των μεταλλικών πτερυγίων κάτω από 1300°F (704°C) και για να εμποδίζουν προβλήματα διάβρωσης.

Οι βιομηχανικοί αεριοστρόβιλοι βαρέως τύπου απασχολούν συμπιεστές αξονικής ροής και στροβίλους. Ο βιομηχανικός στρόβιλος αποτελείται από 15-17 στάδια συμπιεστών αξονικής ροής, με πολλαπλούς δακτυλιοειδείς καυστήρες τον καθένα συνδεδεμένο με τον άλλο με διασταυρούμενους σωλήνες. Οι διασταυρούμενοι σωλήνες βοηθούν στο να μεταδίδουν τις φλόγες από τον ένα καυστήρα σε όλους τους άλλους θαλάμους και επίσης εξασφαλίζουν ισοστάθμιση της πίεσης μεταξύ κάθε θαλάμου του καυστήρα. Τα προγενέστερα βιομηχανικά ευρωπαϊκά σχέδια είχαν πλευρικούς καυστήρες με ένα στάδιο. Τα νέα ευρωπαϊκά σχέδια δεν χρησιμοποιούν τον πλευρικό καυστήρα στα περισσότερα από τα νεώτερα σχέδια τους. Τα νεότερα ευρωπαϊκά σχέδια έχουν can (σχήματος κουτιού)-δακτυλιοειδείς ή δακτυλιοειδείς καυστήρες δεδομένου ότι οι πλευρικοί (τύπου σιλό) καυστήρες είχαν την τάση να αλλοιώνουν το περίβλημα. Η Εικόνα 1-8 είναι μία όψη εγκάρσιας τομής αντιπροσωπευτική του τύπου GE βιομηχανικού αεριοστροβίλου, με can-δακτυλιοειδείς καυστήρες και η Εικόνα 1-9 είναι μία όψη τομής αντιπροσωπευτική του τύπου Siemens σιλό αεριοστροβίλου καυστήρα. Ο διαστολέας στροβίλου αποτελείται από ένα 2-4 στάδια στροβίλου αξονικής ροής, ο οποίος κινεί τόσο το συμπιεστή αξονικής ροής όσο και τη γεννήτρια.

Οι μεγάλοι πρόσθιοι τομείς των μονάδων αυτών μειώνουν τις ταχύτητες εισόδου, μειώνοντας έτσι το θόρυβο του αέρα. Η άνοδος της πίεσης σε κάθε στάδιο του συμπιεστή μειώνεται, δημιουργώντας μια μεγάλη ζώνη σταθερής λειτουργίας.

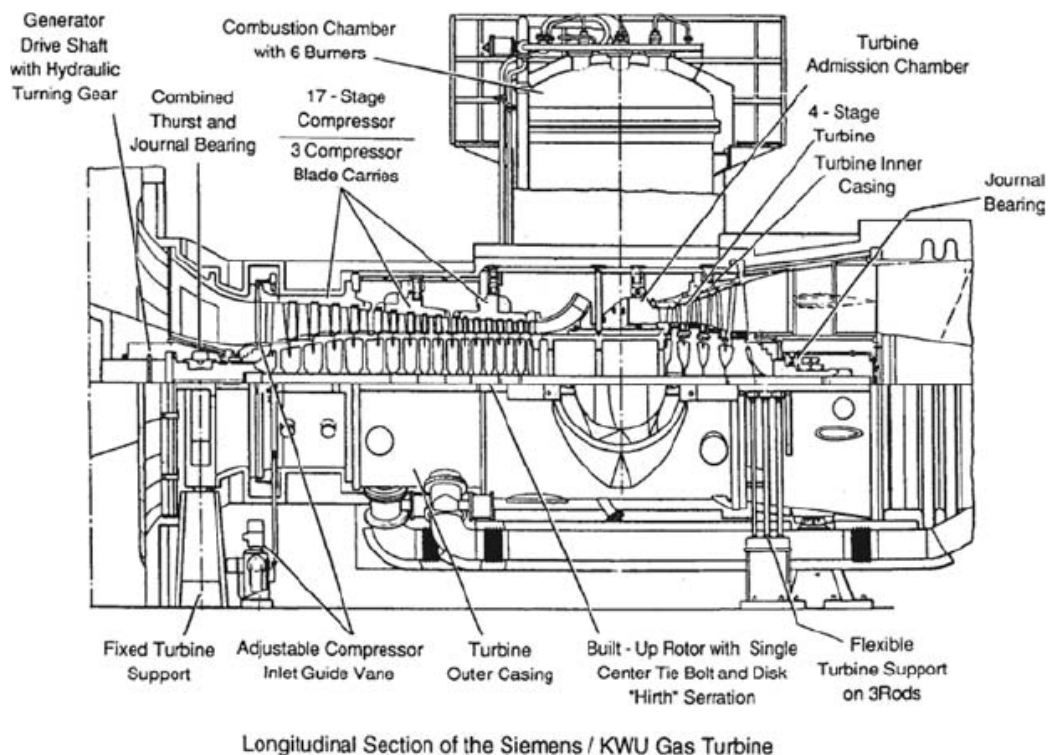
Οι βοηθητικές μονάδες που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες από αυτές τις μονάδες έχουν περάσει από έναν μεγάλο αριθμό ωρών δοκιμών και είναι βαρέως τύπου αντλίες και κινητήρες.



Εικόνα 1-8 : Αεριοστρόβιλος τύπου πλαισίου με can-δακτυλιοειδείς καυστήρες.

Τα πλεονεκτήματα των βαρέων τύπου αεριοστροβίλων είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής τους, η υψηλή διαθεσιμότητα και η ελαφρώς υψηλότερη συνολική απόδοση τους. Το επίπεδο θορύβου από αυτόν τον τύπο του στροβίλου είναι σημαντικά χαμηλότερο σε σχέση με ένα στρόβιλο τύπου αεροσκάφους. Σημαντική ζήτηση για βαρέως τύπου αεριοστροβίλους υπάρχει από ηλεκτρικές επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και ανεξάρτητους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας. Από τη δεκαετία του 1990 οι βιομηχανικοί στρόβιλοι ήταν τα προπύργια των περισσότερων μονάδων συνδυασμένου κύκλου.

Οι τελευταίες μονάδες τύπου πλαισίου που εισήχθησαν είναι οι 480 MW μονάδες με χρήση ψύξης ατμού στη λειτουργία συνδυασμένου κύκλου, ώστε οι θερμοκρασίες ανάφλεξης να φθάσουν τους 2600°F (1427°C). Αυτό επιτρέπει στη λειτουργία συνδυασμένου κύκλου, απόδοση της τάξεως του 60% και παραπάνω.

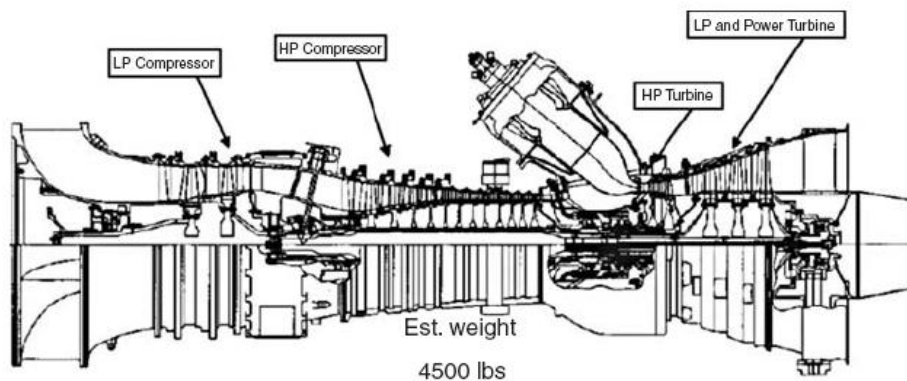


Εικόνα 1-9 : Αεριοστρόβιλος τύπου πλαισίου με καυστήρες τύπου σιλό.

1.4.2. Αεροδηγούμενοι αεριοστρόβιλοι αεροσκαφών.

Οι αεριοστρόβιλοι αεροσκαφών αποτελούνται από δύο βασικά μέρη: μια γεννήτρια αεροσκάφους-αερίωσης (aircraft-derivative) και έναν αυτοδύναμο στρόβιλο. Η γεννήτρια αερίου λειτουργεί ως παραγωγός ενέργειας από φυσικό αέριο ή αέρια ιπποδύναμη. Η γεννήτρια αερίου προέρχεται από έναν κινητήρα αεροσκάφους, που έχει τροποποιηθεί για να καίει βιομηχανικά καύσιμα. Οι σχεδιαστικές καινοτομίες ενσωματώνονται συνήθως για να εξασφαλίζουν μεγάλη διάρκεια ζωής στα απαιτούμενα χαρακτηριστικά στο επίγειο περιβάλλον. Στην περίπτωση των σχεδίων δεσμών του ανεμιστήρα, ο ανεμιστήρας αφαιρείται και ένα ζευγάρι βαθμίδων συμπίεσης προστίθενται μπροστά από τον υπάρχον χαμηλής πίεσης

συμπιεστή. Ο συμπιεστής αξονικής ροής σε πολλές περιπτώσεις διαιρείται σε δύο τμήματα: σε ένα χαμηλής πίεσης συμπιεστή που ακολουθείται από ένα συμπιεστή υψηλής πίεσης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, υπάρχουν συνήθως ένας στρόβιλος υψηλής πίεσης και ένα στρόβιλος χαμηλής πίεσης, οι οποίοι κινούν τα αντίστοιχα τμήματα του συμπιεστή. Οι άξονες είναι συνήθως ομόκεντροι, έτσι ώστε οι ταχύτητες των υψηλής και χαμηλής πίεσης τμημάτων να μπορούν να βελτιστοποιηθούν. Στην περίπτωση αυτή, ο στρόβιλος ισχύος είναι ξεχωριστός και δεν συνδέεται μηχανικά, η μόνη σύνδεση είναι μέσω μιας αεροδυναμικής σύζευξης. Στις περιπτώσεις αυτές, οι στρόβιλοι έχουν τρεις άξονες, όπου όλοι λειτουργούν σε ανεξάρτητες ταχύτητες. Η γεννήτρια αερίου χρησιμεύει για την αύξηση των προϊόντων καύσης του αερίου με τις συνθήκες να είναι περίπου 45-75 psi (3-5 Bar) και οι θερμοκρασίες περίπου 1300-1700°F (704-927°C) στη φλάντζα. Η Εικόνα 1-10 δείχνει μια διατομή ενός κινητήρα αεριοστρόβιλου αεριώθησης.



Εικόνα 1-10 : Διατομή ενός κινητήρα αεριοστρόβιλου αεριώθησης.

Οι βιομηχανίες ενέργειας και πετροχημικών χρησιμοποιούν το στρόβιλο τύπου αεροσκάφους. Η βιομηχανία ενέργειας χρησιμοποιεί αυτές τις μονάδες συνδυασμένου κύκλου λειτουργίας για την παραγωγή ενέργειας, ιδίως σε απομακρυσμένες περιοχές όπου οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι λιγότερο από 100 MW. Η πετροχημική βιομηχανία χρησιμοποιεί αυτούς τους τύπους των στρόβιλων στις υπεράκτιες πλατφόρμες, ιδίως για επανέγχυση αερίου και ως μονάδες για αυτές τις υπεράκτιες πλατφόρμες, κυρίως λόγω του ότι είναι συμπαγείς και αντικαθίστανται εύκολα και στη συνέχεια αποστέλλονται για να επισκευαστούν. Ο αεριοστρόβιλος αεριώθησης επίσης χρησιμοποιείται ευρέως από τις επιχειρήσεις μεταφοράς αερίου και τις βιομηχανίες πετροχημικών, ειδικά για πολλά μηχανικά συστήματα με μεταβαλλόμενες ταχύτητες. Οι στρόβιλοι επίσης χρησιμοποιούνται ως κύριες μονάδες για αντιτορπικά και κρουαζιερόπλοια. Τα οφέλη των αεριοστρόβιλων αεριώθησης είναι τα εξής:

1. **Κόστος εγκατάστασης.** Ο σχετικός εξοπλισμός είναι ενός μεγέθους και βάρους έτσι ώστε να μπορεί να συσκευαστεί και να ελέγχεται ως μία πλήρης μονάδα εντός του εργοστασίου του κατασκευαστή. Γενικώς, το πακέτο θα περιλαμβάνει είτε μια γεννήτρια ή ένα συμπιεστή αγωγού και όλα τα βοηθητικά και τους πίνακες ελέγχου που ορίζονται από τον χρήστη. Η άμεση εγκατάσταση στο εργοτάξιο διευκολύνεται από την αντιστοίχιση και την επισκευή των βλαβών που παρουσιάζονται.
2. **Προσαρμογή σε τηλεπισκόπηση.** Οι χρήστες προσπαθούν να μειώσουν το κόστος λειτουργίας με την αυτοματοποίηση των συστημάτων τους. Πολλές νέες υπεράκτιες

εφαρμογές όπως και σε αγωγούς, έχουν σχεδιαστεί σήμερα για απομακρυσμένη λειτουργία χωρίς επίβλεψη του εξοπλισμού συμπίεσης. Ο αεριοθούμενος (jet) εξοπλισμός αεριοστροβίλου προσφέρεται για αυτόματο έλεγχο, αφού τα βοηθητικά συστήματα δεν είναι πολύπλοκα, η ψύξη νερού δεν απαιτείται (ψύξη με ανταλλαγές λάδι-αέρα) και η συσκευή εκκίνησης (κινητήρας διαστολής αερίου) απαιτεί μικρή ενέργεια και είναι αξιόπιστη. Οι διατάξεις ασφαλείας και τα όργανα μέτρησης προσαρμόζονται εύκολα για σκοπούς απομακρυσμένου ελέγχου και την παρακολούθηση της απόδοσης του εξοπλισμού.

3. Έννοια συντήρησης. Το πρόγραμμα συντήρησης εκτός των εγκαταστάσεων ταιριάζει καλά με αυτά τα συστήματα, όπου οι στόχοι είναι το ελάχιστο προσωπικό λειτουργίας και οι σταθμοί χωρίς παρακολούθηση. Τεχνικοί διεξάγουν μικρές λειτουργικές προσαρμογές και εκτελούν βαθμονομήσεις οργάνων. Σε αντίθετη περίπτωση, ο αεριοστροβίλος αερίωσης λειτουργεί χωρίς έλεγχο μέχρι ο εξοπλισμός παρακολούθησης να δείξει ότι διατρέχουν κίνδυνο ή πως υπάρχει κάποια αιφνίδια αλλαγή απόδοσης. Το σχέδιο αυτό απαιτεί την αφαίρεση του τμήματος αεριοποιητή (αεροκινητήρες) και την αποστολή του πίσω στο εργοστάσιο για επισκευή, ενώ μια άλλη μονάδα εγκαθίσταται. Ο στροβίλος ισχύος δεν έχει συνήθως προβλήματα καθώς η θερμοκρασία εισόδου του είναι πολύ χαμηλότερη. Τα διαστήματα διακοπής που οφείλονται στην αφαίρεση και αντικατάσταση του αεριοποιητή είναι περίπου οκτώ ώρες.

1.4.3. Βιομηχανικοί αεριοστροβίλοι.

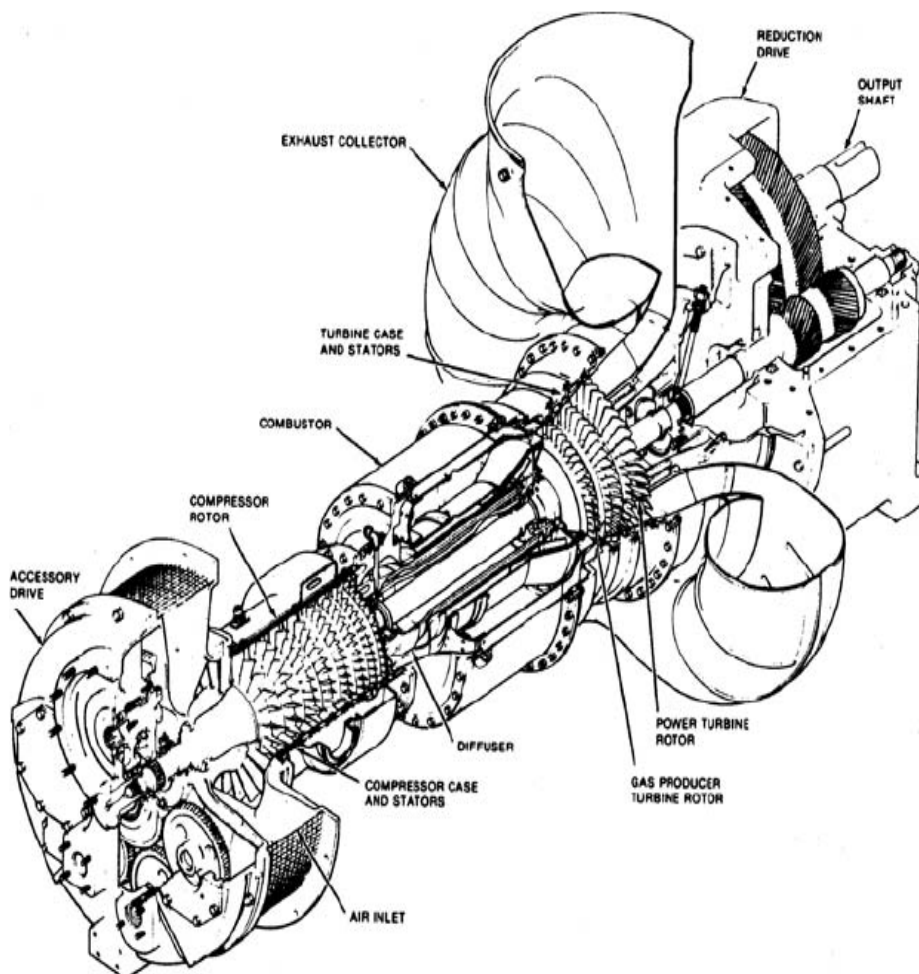
Ο τύπος βιομηχανικών αεριοστροβίλων είναι μεσαίας κλίμακας και συνήθως μεταξύ 5-15 MW. Αυτές οι μονάδες είναι παρόμοιες στο σχεδιασμό με τους βαρέως τύπου αεριοστροβίλους. Το περίβλημα τους είναι παχύτερο από το περίβλημα των αεροοδηγούμενων αλλά πιο λεπτό από τους βιομηχανικούς αεριοστροβίλους. Συνήθως είναι σχέδια χωρισμένου άξονα που είναι αποδοτικά στη λειτουργία μερικού φορτίου. Η απόδοση επιτυγχάνεται αφήνοντας το τμήμα του αεριοποιητή (το τμήμα που παράγει το ζεστό αέριο) να λειτουργήσει στη μέγιστη απόδοση, ενώ ο στροβίλος λειτουργεί πάνω από μια μεγάλη κλίμακα ταχυτήτων. Ο συμπιεστής αποτελείται συνήθως από 10-16 στάδια υποηχητικού αξονικού συμπιεστή, που παράγει αναλογία πίεσης από περίπου 5:1-15:1. Τα περισσότερα αμερικάνικα σχέδια χρησιμοποιούν cap-δακτυλοειδείς (περίπου 5-10 δοχεία καυστήρα τοποθετημένα σε ένα κυκλικό δακτύλιο) ή τύπος δακτυλοειδών καυστήρων. Τα περισσότερα Ευρωπαϊκά σχέδια χρησιμοποιούν πλευρικούς καυστήρες και έχουν χαμηλότερες θερμοκρασίες εισόδου στροβίλων σε σύγκριση με τους αμερικανούς ομολόγους τους. Η Εικόνα 1-11 παρουσιάζει ένα τύπο βιομηχανικού αεριοστροβίλου.

Ο στροβίλος εξαερωτή είναι συνήθως ένας 2-3 σταδίων αξονικός στροβίλος με ένα αερόψυκτο πρώτου σταδίου ακροφύσιο και πτερύγιο. Ο στροβίλος είναι συνήθως ενός μόνο ή δύο σταδίων αξονικής ροής στροβίλος. Οι μεσαίου μεγέθους στροβίλοι χρησιμοποιούνται στις υπεράκτιες πλατφόρμες και έχουν αυξανόμενη χρήση σε εργοστάσια πετροχημικών. Ο απλός κύκλος στροβίλου είναι χαμηλός σε απόδοση, αλλά με τη χρήση αναθερμαντήρων να καταναλώνουν καυσάερια, αυτές οι αποδόσεις μπορούν να βελτιωθούν σημαντικά. Στις μονάδες αυτά τα καυσάερια χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ατμού. Η μονάδα

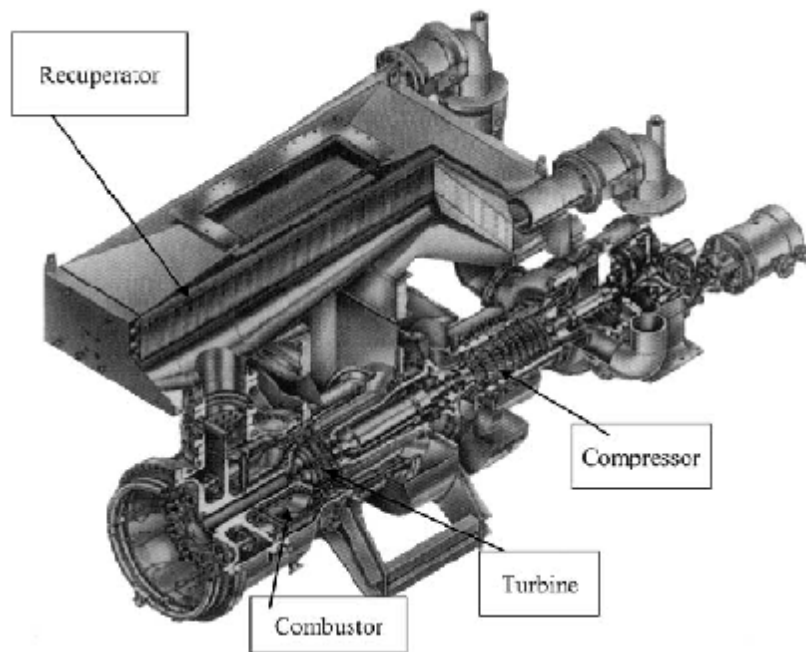
συμπαγωγής με συνδυασμένο κύκλο (αέρα-ατμού) έχει πολύ υψηλές αποδόσεις και είναι η τάση του μέλλοντος.

Αυτοί οι αεριοστρόβιλοι έχουν σε πολλές περιπτώσεις αναγεννητές ή ανακτητές για να ενισχυθεί η απόδοση αυτών των στροβίλων. Η Εικόνα 1-12 δείχνει ένα τέτοιο νέο σχέδιο αεριοστρόβιλου ανάκτησης, που έχει απόδοση 38%.

Ο όρος «αναγεννητικός εναλλάκτης θερμότητας» χρησιμοποιείται για αυτό το σύστημα στο οποίο η μεταφορά θερμότητας μεταξύ των δύο ρευμάτων επηρεάζεται από την έκθεση ενός τρίτου μέσου εναλλάξ στις δύο ροές. Η θερμότητα ρέει διαδοχικά μέσα και έξω του τρίτου μέσου, το οποίο υφίσταται μία κυκλική θερμοκρασία. Σε έναν ανακτητικό εναλλάκτη θερμότητας κάθε στοιχείο στην επιφάνεια όπου γίνεται η μεταφορά θερμότητας έχει μια σταθερή θερμοκρασία και με την διευθέτηση των διαδρομών αερίου σε αντίθετη ροή, η κατανομή της θερμοκρασίας προς την κατεύθυνση της ροής δίνει βέλτιστη απόδοση για τις δεδομένες συνθήκες μεταφοράς θερμότητας. Αυτή η βέλτιστη κατανομή θερμοκρασίας μπορεί να επιτευχθεί ιδανικά σε έναν αναγεννητή αντίθετης ροής και να προσεγγιστεί πολύ κοντά σε έναν αναγεννητή διασταυρούμενης ροής.



Εικόνα 1-11 : Βιομηχανικός αεριοστρόβιλος μεσαίου μεγέθους.



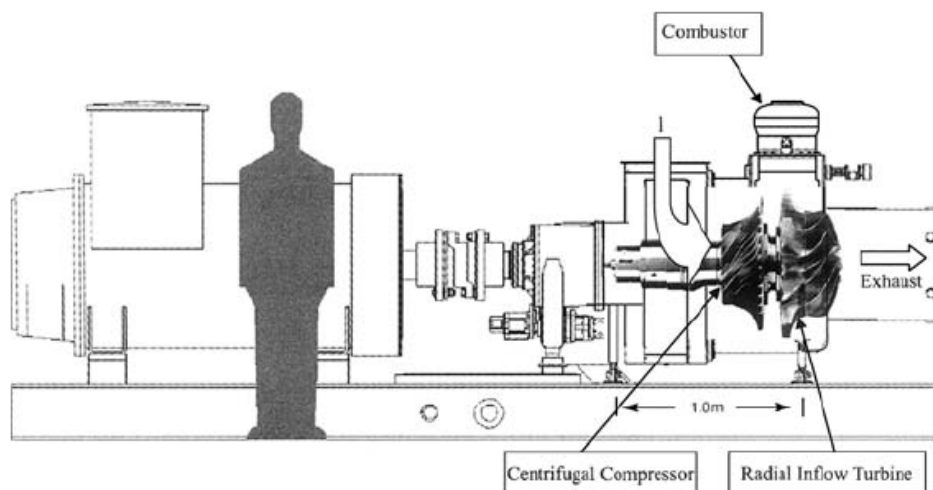
Εικόνα 1-12 : Ανακτητικός βιομηχανικός αεριοστρόβιλος μεσαίου μεγέθους.

1.4.4. Μικροί αεριοστρόβιλοι.

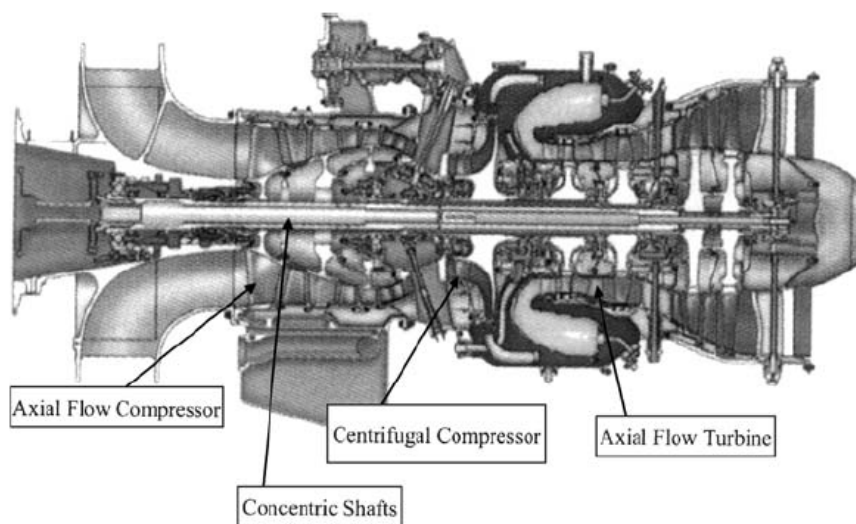
Πολλοί μικροί αεριοστρόβιλοι που παράγουν κάτω από 5 MW έχουν σχεδιασθεί κατά τον ίδιο τρόπο με τους μεγαλύτερους στρόβιλους που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Ωστόσο, υπάρχουν πολλά σχέδια που ενσωματώνουν φυγοκεντρικούς συμπιεστές ή συνδυασμούς φυγοκεντρικών και αξονικών συμπιεστών καθώς επίσης και στρόβιλους ακτινικής εισροής. Ένας μικρός στρόβιλος συχνά θα αποτελείται από ένα μόνο στάδιο φυγοκεντρικού συμπιεστή που παράγει αναλογία πίεσης τόσο υψηλή όσο 6:1, από έναν απλό πλευρικό καυστήρα όπου οι θερμοκρασίες των περίπου 1800°F (982°C) επιτυγχάνονται και από στρόβιλους ακτινικής εισροής. Η Εικόνα 1-13 απεικονίζει έναν τέτοιο τυπικό στρόβιλο. Ο αέρας εισέρχεται μέσω αγωγού εισόδου στο φυγοκεντρικό συμπιεστή, ο οποίος περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα και μεταδίδει ενέργεια στον αέρα. Κατά την έξοδό του ο αέρας της πτερωτής με αυξημένη πίεση και ταχύτητα διέρχεται μέσω ενός διαχύτη υψηλής απόδοσης, ο οποίος μετατρέπει την ενέργεια ταχύτητας σε στατική πίεση. Ο πεπιεσμένος αέρας, που περιέχεται σε ένα περίβλημα πίεσης, ρέει σε χαμηλή ταχύτητα προς το θάλαμο καύσεως, ο οποίος είναι ένας πλευρικός καυστήρας. Ένα τμήμα του αέρα εισέρχεται στην κεφαλή του καυστήρα, αναμιγνύεται με το καύσιμο και καίει συνεχώς. Το υπόλοιπο μέρος του αέρα εισέρχεται δια μέσου του τοιχώματος του καυστήρα και αναμιγνύεται με τα θερμά αέρια. Η καλή εξαέρωση καυσίμου και η ελεγχόμενη μίξη εξασφαλίζουν μια ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας στα θερμά αέρια, τα οποία διέρχονται μέσω του ελικοειδούς τμήματος ώστε να εισέλθουν στα ακροφύσια του στρόβιλου ακτινικής εισροής. Η υψηλή επιτάχυνση και διαστολή των αερίων διαμέσου των περασμάτων του ακροφυσίου και του στρόβιλου συνδυάζονται για να

μεταδώσουν περιστροφική ενέργεια, η οποία χρησιμοποιείται για να οδηγήσει το εξωτερικό φορτίο και τα βοηθητικά στην ψυχρή πλευρά του στροβίλου. Η απόδοση ενός μικρού στροβίλου είναι συνήθως πολύ μικρότερη από ό, τι μια μεγαλύτερη μονάδα εξαιτίας του περιορισμού της θερμοκρασίας εισόδου του στροβίλου και των χαμηλότερων αποδόσεων των συνιστωσών. Η θερμοκρασία εισόδου στροβίλου είναι περιορισμένη, επειδή δεν ψύχονται τα πτερύγια του στροβίλου. Οι συμπιεστές ακτινικής ροής και οι πτερωτές έχουν εκ φύσεως μικρότερη απόδοση από τους αξονικούς ομολόγους τους. Αυτές οι μονάδες είναι τραχείς και η απλότητα στο σχεδιασμό τους εξασφαλίζει πολλές ώρες χωρίς προβλήματα στην λειτουργία τους. Ένας τρόπος για τη βελτίωση των συνολικά χαμηλότερων αποδόσεων του κύκλου, 18-23%, είναι η χρήση της περισσευούμενης θερμότητας από τη μονάδα στροβίλου. Υψηλές θερμικές αποδόσεις (30-35%) μπορούν να ληφθούν, δεδομένου ότι σχεδόν όλη η θερμότητα που δεν μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια είναι διαθέσιμη στην έξοδο και το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ενέργειας μπορεί να μετατραπεί σε χρήσιμο έργο. Οι μονάδες αυτές όταν τοποθετούνται σε μια μικτή εφαρμογή θερμικής ισχύος μπορούν να φθάσουν την απόδοση της συνολικής διαδικασίας τόσο υψηλά όσο 60-70%.

Η Εικόνα 1-14 δείχνει ένα μικρό αεριοστρόβιλο αερίωσης. Αυτή η μονάδα διαθέτει τρία ανεξάρτητα περιστρεφόμενα συγκροτήματα τοποθετημένα σε τρεις ομόκεντρους άξονες. Αυτό ο στρόβιλος διαθέτει συμπιεστή αξονικής ροής με διαδικασία τριών σταδίων ακολουθούμενο από ένα φυγοκεντρικό συμπιεστή, όπου το καθένα οδηγείται από ένα συμπιεστή αξονικής ροής με διαδικασία ενός μόνο σταδίου. Η ενέργεια προκύπτει από ένα στρόβιλο αξονικής ροής δύο σταδίων και παραδίδεται στο άκρο εισόδου της μηχανής από έναν από τους ομόκεντρους άξονες. Το σύστημα καύσης περιλαμβάνει ένα δακτυλιοειδή θάλαμο καύσης αντίστροφης ροής με πολλαπλά ακροφύσια καυσίμων και αναφλεκτήρα σπινθήρων. Αυτός ο κινητήρας αερίωσης παράγει 4,9 MW και έχει απόδοση 32%.



Εικόνα 1-13 : Ένας μικρός αεριοστρόβιλος ακτινικής ροής, για την παρουσίαση του ρότορα στροβίλου.



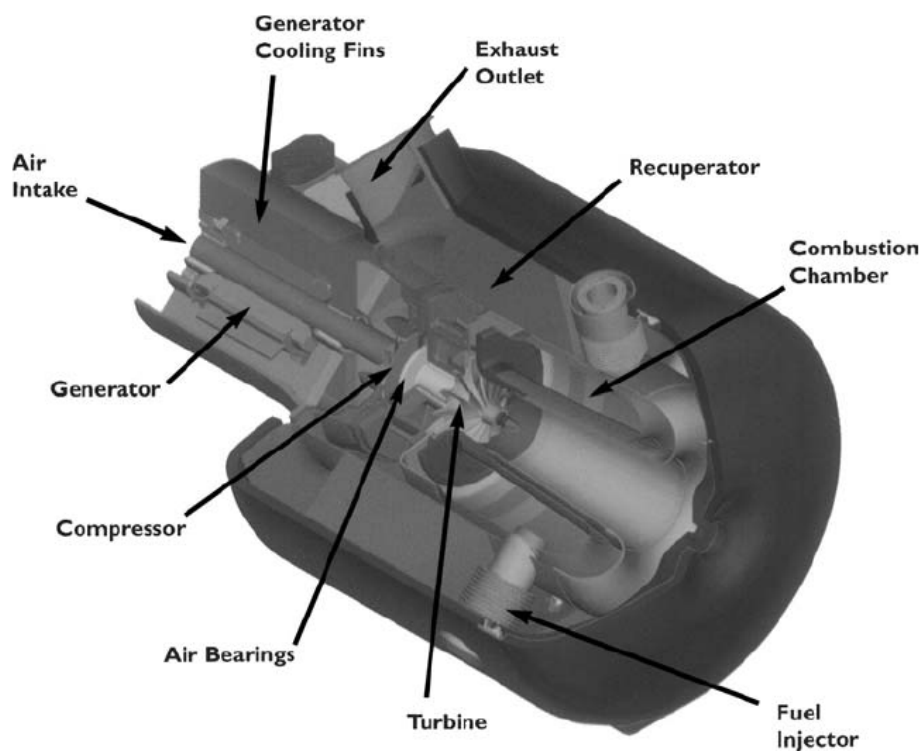
Εικόνα 1-14 : Αεριοστρόβιλος αερίωσης μικρού μεγέθους.

1.4.5. Μικροστρόβιλοι.

Οι μικροστρόβιλοι παραπέμπουν συνήθως σε μονάδες λιγότερο από 350 KW. Αυτές οι μονάδες συνήθως τροφοδοτούνται είτε από καύσιμο diesel ή από φυσικό αέριο. Χρησιμοποιούν την τεχνολογία που έχει ήδη αναπτυχθεί. Οι μικροστρόβιλοι μπορεί να είναι είτε αξονικής ροής ή φυγοκεντρικές μονάδες ακτινικής εισροής. Το αρχικό κόστος, η απόδοση και οι εκπομπές θα είναι τα τρία πιο σημαντικά κριτήρια στον σχεδιασμό αυτών των μονάδων.

Οι μικροστρόβιλοι, για να είναι επιτυχημένοι, πρέπει να είναι συμπαγείς σε μέγεθος, να έχουν χαμηλό κόστος παρασκευής, υψηλές αποδόσεις, αθόρυβη λειτουργία, γρήγορες εκκινήσεις και ελάχιστες εκπομπές ρύπων. Αυτά τα χαρακτηριστικά, αν επιτευχθούν, θα κάνουν τους μικροστρόβιλους εξαιρετικούς υποψήφιους για την παροχή βασικού φορτίου και παραγωγής θερμότητας σε μια σειρά από εμπορικούς πελάτες. Οι μικροστρόβιλοι σε μεγάλο βαθμό θα είναι μια συλλογή από τεχνολογίες που έχουν ήδη αναπτυχθεί. Οι προκλήσεις επικεντρώνονται στην οικονομική συσκευασία των εν λόγω τεχνολογιών.

Οι μικροστρόβιλοι στην αγορά σήμερα κυμαίνονται από περίπου 20-350 kW. Σήμερα ο μικροστρόβιλος χρησιμοποιεί ακτινικής ροής στρόβιλους και συμπιεστές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-15. Για να βελτιωθεί η συνολική θερμική απόδοση, οι αναγεννητές χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό του μικροστρόβιλου και σε συνδυασμό με ψύκτες απορρόφησης ή άλλα θερμικά φορτία, πολύ υψηλές αποδόσεις μπορούν να επιτευχθούν. Η Εικόνα 1-16 παρουσιάζει ένα τυπικό πακέτο συστήματος συμπαραγωγής με χρήση ενός μικροστρόβιλου. Αυτή η συμπαγής μορφή των κατανεμημένων συστημάτων ενέργειας θα έχει μεγάλες δυνατότητες στο μέλλον.



Εικόνα 1-15 : Συμπαγής μικροστρόβιλος.

1.5. Σημαντικά εξαρτήματα των αεριοστροβίλων.

1.5.1. Συμπιεστές.

Ένας συμπιεστής είναι μια συσκευή, η οποία πιέζει ένα εργαζόμενο ρευστό. Οι τύποι των συμπιεστών εμπίπτουν σε τρεις κατηγορίες, όπως δείχνει και η Εικόνα 1-17. Οι συμπιεστές θετικής μετατόπισης χρησιμοποιούνται για χαμηλή ροή και υψηλή πίεση της κεφαλής, οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές είναι μέσης ροής και μέσης κεφαλής και της μεσαίας αξονικής ροής συμπιεστές είναι υψηλής ροής και χαμηλής πίεσης. Στους αεριοστροβίλους οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές ροής και αξονικής ροής, οι οποίοι είναι συνεχείς συμπιεστές ροής, είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται για τη συμπίεση του αέρα. Οι συμπιεστές θετικής μετατόπισης όπως ο τύπος μειωτήρων, χρησιμοποιούνται για τα συστήματα λίπανσης στους αεριοστροβίλους.

Τα χαρακτηριστικά αυτών των συμπιεστών δίνονται στον Πίνακα 1-1. Η αναλογία πίεσης των αξονικών και φυγοκεντρικών συμπιεστών έχουν ταξινομηθεί σε τρεις ομάδες: αυτή της βιομηχανικής, της αεροδιαστημικής και της έρευνας. Οι αεριοστροβίλοι αεροσκαφών λόγω της ώθησης τους σε αναλογία βάρους εκτιμήσεις έχουν πολύ υψηλή φόρτιση για κάθε στάδιο του συμπιεστή. Η αναλογία πίεσης για κάθε στάδιο μπορεί να φτάσει και το 1,4 ανά στάδιο. Στους βιομηχανικούς αεριοστροβίλους, η φόρτιση ανά στάδιο είναι σημαντικά μικρότερη και

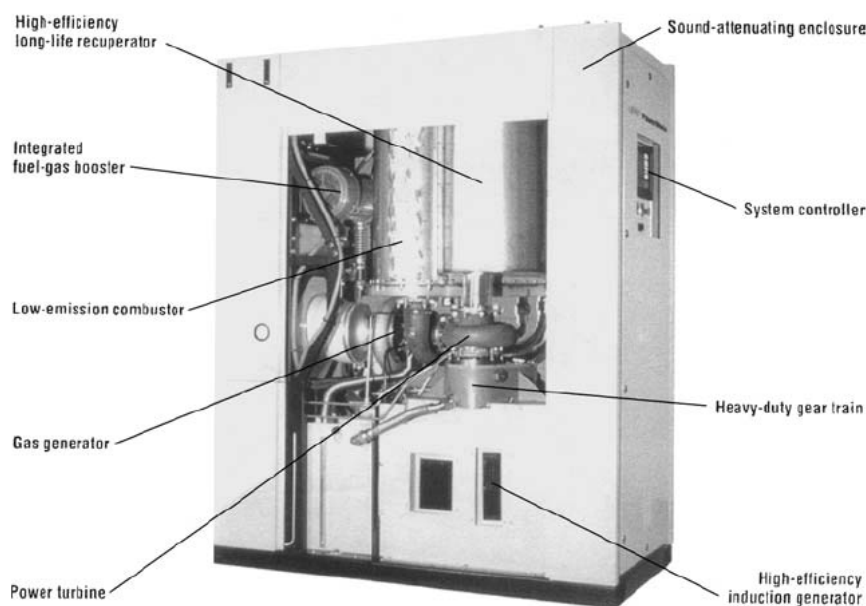
κυμαίνεται μεταξύ 1,05-1,3 ανά στάδιο. Η αδιαβατική απόδοση των συμπιεστών έχει επίσης αυξηθεί και οι αποδόσεις της τάξεως του 80% έχουν επιτευχθεί. Η απόδοση του συμπιεστή είναι πολύ σημαντική στη συνολική απόδοση του αεριοστρόβιλου καθώς καταναλώνει 55-60% της ενέργειας που παράγεται από τον αεριοστρόβιλο.

Η αναλογία της βιομηχανικής πίεσης είναι χαμηλή επειδή το εύρος λειτουργίας πρέπει να είναι μεγάλο. Το εύρος λειτουργίας είναι η περιοχή μεταξύ του σημείου αναρρόφησης και του σημείου στραγγαλισμού. Η Εικόνα 1-18 δείχνει τα χαρακτηριστικά λειτουργίας ενός συμπιεστή. Το σημείο της απότομης αύξησης είναι το σημείο όπου η ροή αντιστρέφεται στον συμπιεστή. Στο σημείο στραγγαλισμού η ροή έχει φτάσει σε ένα $Mach = 1$, όπου δεν μπορεί να περάσει περισσότερη ροή μέσω της μονάδας, θα το αποκαλούσαμε έναν "πέτρινο τοίχο". Όταν εμφανίζεται απότομη αύξηση, η ροή αντιστρέφεται, όπως και όλες οι δυνάμεις που ενεργούν επί του συμπιεστή, ιδιαίτερα οι δυνάμεις ώθησης, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε ολοκληρωτική καταστροφή του συμπιεστή. Έτσι, μια ενδεχόμενη απότομη αύξηση πρέπει να αποφευχθεί. Οι συνθήκες στραγγαλισμού προκαλούν μεγάλη πτώση στην απόδοση, αλλά δεν οδηγούν σε καταστροφή της μονάδας.

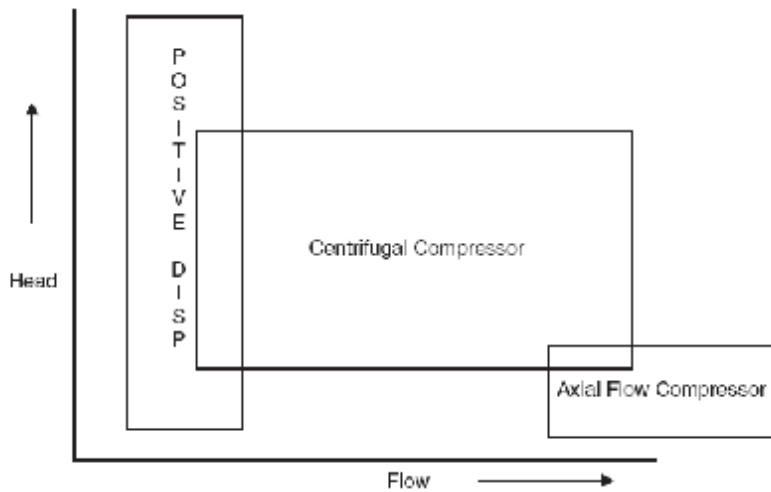
Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι με την αύξηση της αναλογίας πίεσης και τον αριθμό βαθμίδων το εύρος λειτουργίας στενεύει.

Οι turbo-συμπιεστές μεταφέρουν ενέργεια με δυναμικά μέσα από ένα περιστρεφόμενο μέλος στο υγρό που ρέει συνεχώς. Οι δύο τύποι των συμπιεστών που χρησιμοποιούνται σε αεριοστρόβιλους είναι οι αξονικοί και οι φυγοκεντρικοί. Σχεδόν όλοι οι αεριοστρόβιλοι που παράγουν πάνω από 5 MW έχουν συμπιεστές αξονικής ροής.

Ορισμένοι μικροί αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό από ένα αξονικό συμπιεστή με μια φυγοκεντρική μονάδα. Η Εικόνα 1-19 δείχνει ένα συμπιεστή αξονικής ροής ακολουθούμενο από ένα φυγοκεντρικό συμπιεστή, ένα δακτυλιοειδή καυστήρα και ένα στρόβιλο αξονικής ροής, πολύ παρόμοιο με την μηχανή που απεικονίζεται στην Εικόνα 1-14.



Εικόνα 1-16 : Ένα τυπικό πακέτο συστήματος συμπαραγωγής με χρήση μικροστρόβιλου.



Εικόνα 1-17 : Χαρακτηριστικά απόδοσης διάφορων τύπων συμπιεστών.

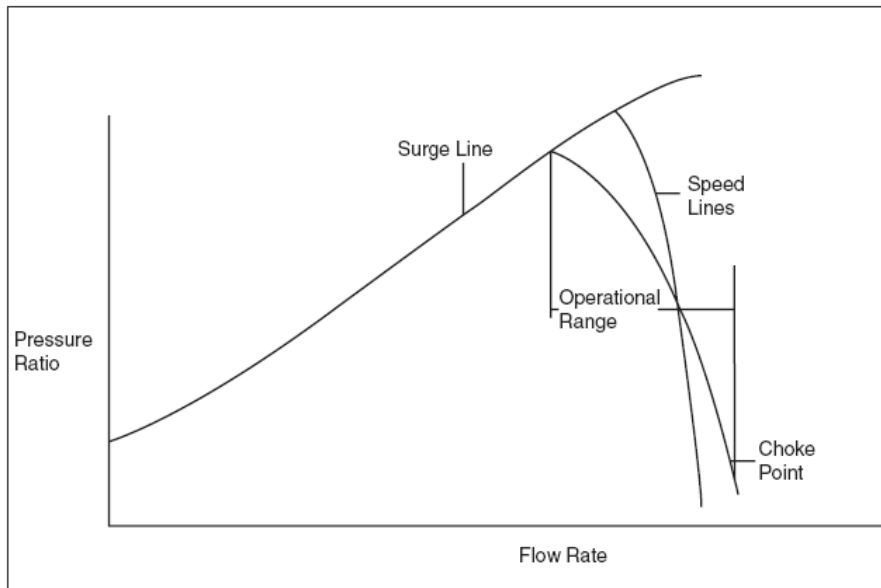
Types of Compressors	Pressure Ratio			Efficiency	Operating Range
	Industrial	Aerospace	Research		
Positive displacement	Up to 30	–	–	75–82%	–
Centrifugal	1.2–1.9	2.0–7.0	13	75–87%	Large 25%
Axial	1.05–1.3	1.1–1.45	2.1	80–91%	Narrow 3–10%

Πίνακας 1-1 : Χαρακτηριστικά συμπιεστή.

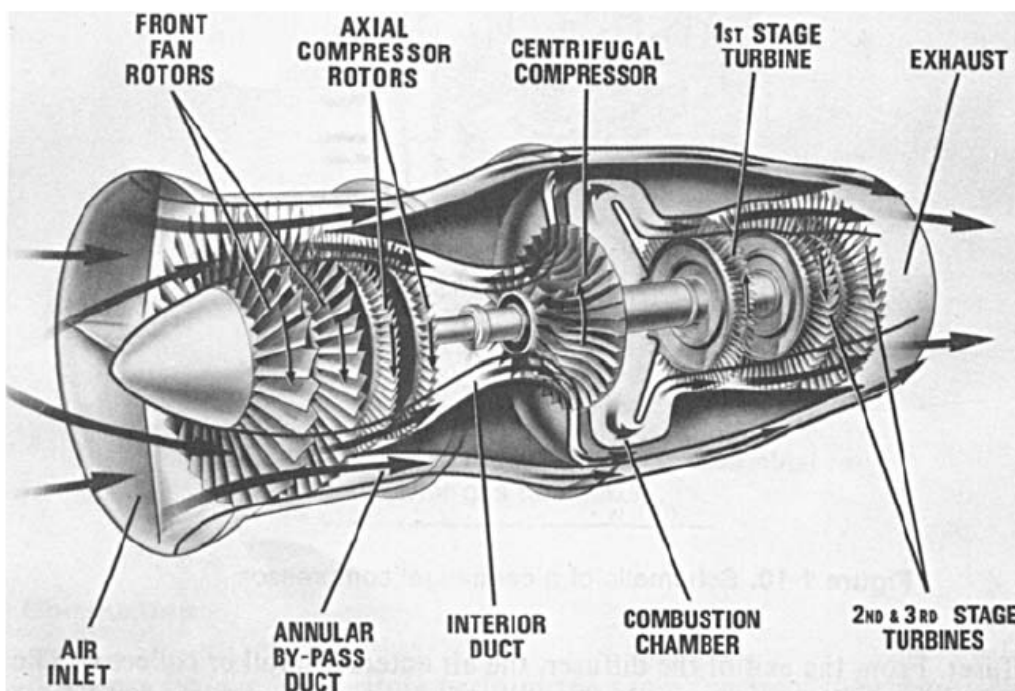
Συμπιεστές αξονικής ροής. Ένας συμπιεστής αξονικής ροής συμπιέζει το εργαζόμενο ρευστό, επιταχύνοντας πρώτα το ρευστό και στη συνέχεια διαχέοντας το ώστε να επιτύχει μια αύξηση της πίεσης. Το υγρό επιταχύνεται από μια σειρά περιστρεφόμενων αεροτομών ή πτερυγίων (ο ρότορας) και διαχέεται από μια σειρά σταθερών πτερυγίων (ο στάτορας). Η διάχυση στο στάτορα μετατρέπει την αύξηση ταχύτητας που αποκτήθηκε στο ρότορα σε μια αύξηση της πίεσης. Ένας ρότορας και ένα στάτορας συνθέτουν ένα στάδιο σε ένα συμπιεστή. Ένας συμπιεστής αποτελείται συνήθως από πολλαπλά στάδια. Μία επιπλέον σειρά σταθερών πτερυγίων (βάνες εισόδου) χρησιμοποιούνται συχνά στην είσοδο του συμπιεστή για να εξασφαλιστεί ότι ο αέρας εισέρχεται στους ρότορες του πρώτου σταδίου στην επιθυμητή γωνία. Επιπλέον στους στάτορες, ένας πρόσθετος διαχύτης στην έξοδο του συμπιεστή διαχέει περαιτέρω το ρευστό και ελέγχει την ταχύτητά του κατά την είσοδο του στους καυστήρες.

Σε ένα συμπιεστή αξονικής ροής ο αέρας διέρχεται από το ένα στάδιο στο επόμενο, με καθένα από αυτά να αυξάνει ελαφρώς την πίεση. Με την παραγωγή αυξήσεων χαμηλής πίεσης της τάξεως των 1.1:1 – 1.4:1, πολύ υψηλές αποδόσεις μπορούν να επιτευχθούν. Η χρήση πολλαπλών σταδίων επιτρέπει τη συνολική πίεση να αυξάνεται έως 40:1. Ο κανόνας

για ένα συμπιεστή αεροστροβίλου πολλαπλών σταδίων είναι πως η αύξηση της ενέργειας ανά στάδιο θα είναι σταθερή και όχι η αύξηση της πίεσης ανά στάδιο.

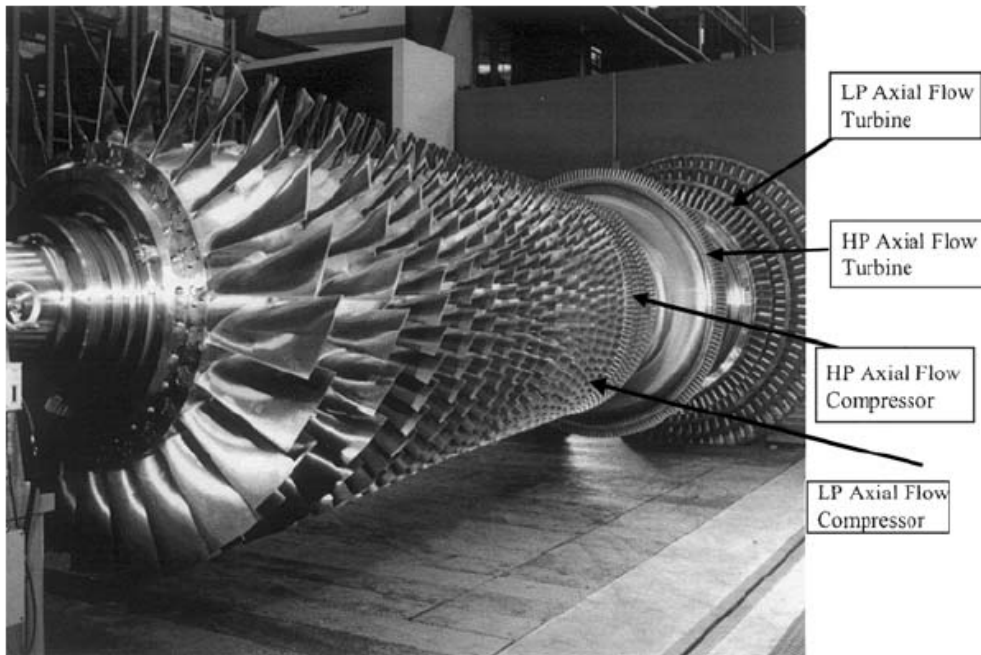


Σχήμα 1-18 : Χάρτης απόδοσης ενός συμπιεστή.



Σχήμα 1-19 : Τομή σε έναν μικρό αεροστροβίλο που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές οχημάτων ή ελικοπτέρων.

Η Εικόνα 1-20 δείχνει έναν ρότορα αξονικής ροής στροβίλου πολλαπλών σταδίων και υψηλής πίεσης. Ο ρότορας στροβίλου που απεικονίζεται σε αυτό το σχήμα έχει έναν συμπιεστή χαμηλής πίεσης και έναν υψηλής πίεσης. Υπάρχουν επίσης δύο τμήματα στροβίλων και ο λόγος που υπάρχει ένας μεγάλος χώρος μεταξύ των δύο τμημάτων του στροβίλου είναι ότι πρόκειται για στρόβιλο αναθέρμανσης και οι καυστήρες της δεύτερης σειράς βρίσκονται μεταξύ των υψηλής και χαμηλής πίεσης τμημάτων του στροβίλου. Ο συμπιεστής παράγει 30:1 πίεση σε 22 στάδια. Η αύξηση της χαμηλής πίεσης ανά στάδιο απλοποιεί επίσης υπολογισμούς κατά το σχεδιασμό του συμπιεστή έχοντας τον αέρα ως ασυμπίεστο ρευστό στη ροή του μέσω ενός μεμονωμένου σταδίου.



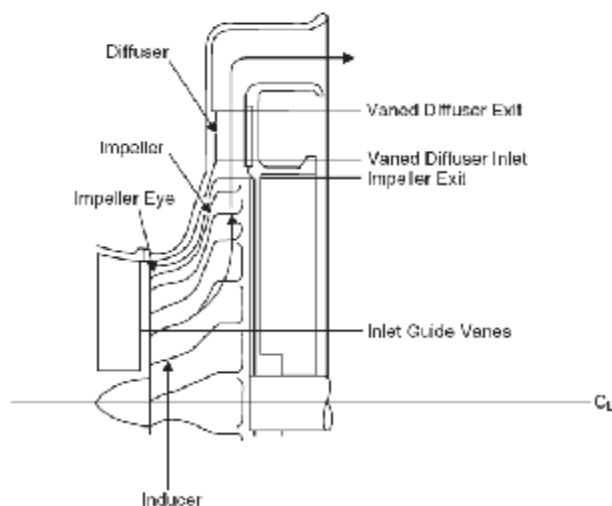
Εικόνα 1-20 : Ρότορας στροβίλου υψηλής αναλογίας πίεσης.

Συμπιεστές φυγοκεντρικής ροής. Οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές χρησιμοποιούνται σε μικρούς αεριοστροβίλους και είναι οι κινητήριες μονάδες στις περισσότερες εγκαταστάσεις συμπιεστών αεριοστροβίλων. Αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της πετροχημικής βιομηχανίας, βρίσκοντας εκτενή χρήση λόγω της ομαλής λειτουργίας τους, των μεγάλων ανοχών σε διακυμάνσεις της διαδικασίας και της μεγαλύτερης αξιοπιστίας τους σε σύγκριση με τους άλλους τύπους των συμπιεστών. Οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές έχουν εύρος σε μέγεθος από αναλογίες πίεσης 1,3:1 ανά στάδιο έως 13:1 για τα πειραματικά μοντέλα. Η μελέτη μας εδώ περιορίζεται στους συμπιεστές που χρησιμοποιούνται σε μικρούς αεριοστροβίλους. Αυτό σημαίνει ότι η αναλογία πίεσης του συμπιεστή πρέπει να είναι μεταξύ 3-7:1 ανά στάδιο. Αυτός θεωρείται ως ένας εξαιρετικά φορτωμένος φυγοκεντρικός συμπιεστής. Με αναλογίες πίεσης, οι οποίες υπερβαίνουν το 5:1, οι ροές που εισέρχονται στον διαχύτη από τον ρότορα είναι υπερηχητικές στον Mach αριθμό τους ($M > 1$). Αυτό απαιτεί ένα ειδικό σχεδιασμό του διαχύτη.

Σε έναν τυπικό φυγοκεντρικό συμπιεστή, το ρευστό αναγκάζεται να διέλθει μέσω της περωτής από τα ταχέως περιστρεφόμενα περύγιά της. Η ταχύτητα του ρευστού μετατρέπεται σε πίεση, μερικώς στην περωτή και μερικώς στους στάσιμους διαχύτες. Το μεγαλύτερο μέρος της ταχύτητας αφήνοντας την περωτή μετατρέπεται σε ενέργεια πίεσεως

στο διαχύτη. Ο διαχύτης αποτελείται ουσιαστικά από βάνες, οι οποίες είναι εφαπτόμενες στην πτερωτή. Αυτά τα περάσματά τους αποκλίνουν για να μετατρέψουν την ταχύτητα σε ενέργεια πίεσης. Το εσωτερικό άκρο των βανών είναι στην ευθεία με την κατεύθυνση της προκύπτουσας ροής αέρα από την πτερωτή.

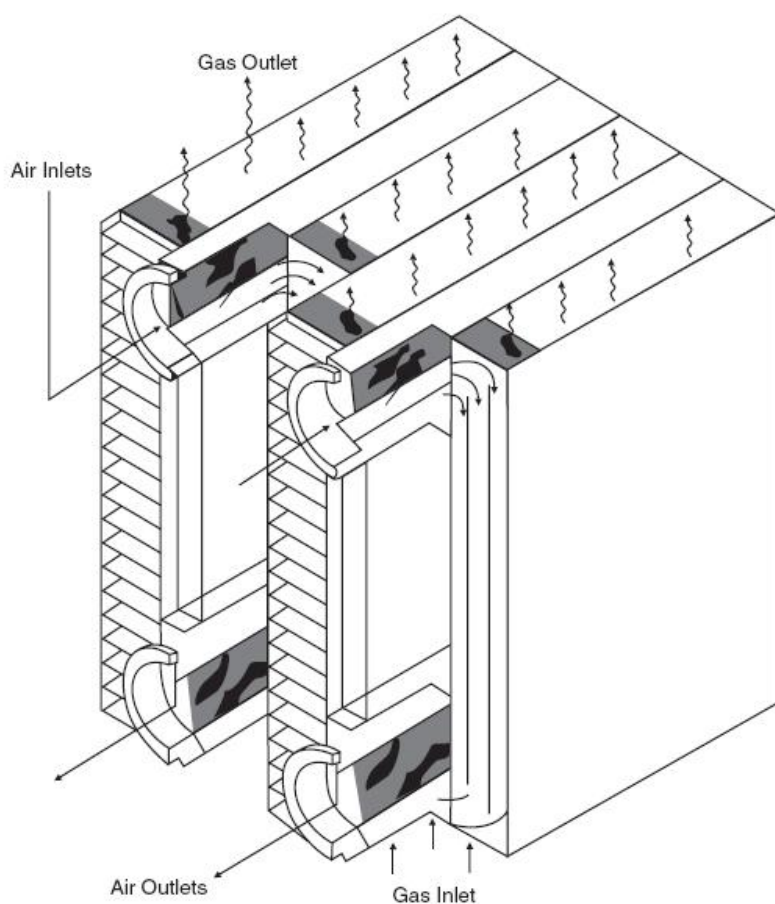
Στον φυγοκεντρικό ή μικτής ροής συμπιεστή ο αέρας εισέρχεται στο συμπιεστή σε αξονική διεύθυνση και εξέρχεται σε ακτινική σε ένα διαχύτη. Αυτός ο συνδυασμός του ρότορα (ή πτερωτής) και διαχύτη περιλαμβάνει ένα μόνο στάδιο. Ο αέρας εισέρχεται μέσα στο φυγοκεντρικό συμπιεστή μέσω ενός αγωγού εισαγωγής και μπορεί να του δοθεί ένας προ-τροβιλισμός όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 1-21. Τα πτερύγια εισόδου δίνουν περιφερειακή ταχύτητα στο ρευστό στην είσοδο του επαγωγέα. Οι οδηγοί βάνες εισαγωγής (Inlet Guide Vanes) εγκαθίστανται απευθείας μπροστά της πτερωτής του επαγωγέα ή όπου μία αξονική είσοδος δεν είναι δυνατή, που βρίσκεται ακτινικώς σε έναν αγωγό εισαγωγής. Ο σκοπός της εγκατάστασης των IGVs είναι συνήθως η μείωση του σχετικού αριθμού Mach στην είσοδο του άκρου του επαγωγέα διότι η υψηλότερη σχετική ταχύτητα στην είσοδο του επαγωγέα είναι στο κάλυμμα. Όταν η σχετική ταχύτητα είναι κοντά στην ηχητική ταχύτητα ή μεγαλύτερη από αυτή, ένα κρουστικό κύμα λαμβάνει χώρα στο τμήμα του επαγωγέα. Ένα κρουστικό κύμα προκαλεί απώλεια λόγω κρούσης και στραγγαλίζει το διεγέρτη. Ο αέρας εισέρχεται αρχικά στη φυγοκεντρική πτερωτή στον επαγωγέα. Ο επαγωγέας, που συνήθως αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της πτερωτής, μοιάζει πολύ σαν ένας ρότορας του συμπιεστή αξονικής ροής. Πολλά προηγούμενα σχέδια κράτησαν ξεχωριστά τον επαγωγέα. Ο αέρας διέρχεται τότε μέσω μιας στροφής 90° και εξέρχεται σε ένα διαχύτη, ο οποίος συνήθως αποτελείται από ένα χώρο χωρίς αγωγούς που ακολουθείται από ένα διαχύτη με πτερύγια. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα εάν η έξοδος του συμπιεστή είναι υπερηχητική όπως συμβαίνει και με τους υψηλής αναλογίας πίεσης συμπιεστές. Ο χώρος χωρίς αγωγούς χρησιμοποιείται για να μειώσει την ταχύτητα που εξέρχεται από τον ρότορα σε μια τιμή χαμηλότερη από τον αριθμό $Mach = 1$ ($M < 1$). Από την έξοδο του διαχύτη, ο αέρας εισέρχεται σε ένα συλλέκτη. Ο φυγοκεντρικός συμπιεστής είναι ελαφρώς λιγότερο αποδοτικός από το συμπιεστή αξονικής ροής, αλλά έχει μεγαλύτερη σταθερότητα. Μια μεγαλύτερη σταθερότητα σημαίνει ότι η περιοχή λειτουργίας του είναι μεγαλύτερη.



Εικόνα 1-21 : Στάδιο ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή.

1.5.2. Αναγεννητές.

Οι βαρέως τύπου αναγεννητές έχουν σχεδιαστεί για εφαρμογές σε μεγάλους αεριοστρόβιλους της τάξης 1-50 MW. Η χρήση των αναγεννητών σε συνδυασμό με τους βιομηχανικούς αεριοστρόβιλους αυξάνει σημαντικά την απόδοση του κύκλου και παρέχει μια ώθηση στην διαχείριση της ενέργειας με τη μείωση της κατανάλωσης του καυσίμου έως και 30%. Ο όρος «αναγεννητικός εναλλάκτης θερμότητας» χρησιμοποιείται για αυτό το σύστημα στο οποίο η μεταφορά θερμότητας μεταξύ των δύο ρευμάτων επηρεάζεται από την έκθεση ενός τρίτου μέσου εναλλάξ στις δύο ροές. Η θερμότητα ρέει διαδοχικά εντός και εκτός του τρίτου μέσου, το οποίο υφίσταται μία κυκλική θερμοκρασία. Σε έναν ανακτητικό εναλλάκτη θερμότητας κάθε στοιχείο της επιφανείας της μεταφοράς θερμότητας έχει μία σταθερή θερμοκρασία και με την διευθέτηση των διαδρομών αεριοστρόβιλου σε αντίθετης ροής, η κατανομή της θερμοκρασίας στον πίνακα κατά τη διεύθυνση της ροής δίνει βέλτιστη απόδοση για τις δεδομένες συνθήκες μεταφοράς θερμότητας. Αυτή η βέλτιστη κατανομή θερμοκρασίας μπορεί να επιτευχθεί ιδανικά σε αντίθετης ροής αναγεννητή και να προσεγγιστεί αρκετά σε εγκάρσιας ροής αναγεννητή.



Εικόνα 1-22 : Μια τυπική πλάκα και περύγιο τύπου αναγεννητή για έναν βιομηχανικό αεριοστρόβιλο.

Η Εικόνα 1-22 παρουσιάζει τον τρόπο που λειτουργεί ένας αναγεννητής. Στους περισσότερους σημερινούς αναγεννητικούς αεριοστροβίλους ο αέρας του περιβάλλοντος εισέρχεται στο φίλτρο εισόδου και συμπιέζεται σε περίπου 100 psi (6,8 bar) και θερμοκρασία 500°F (260°C). Ο αέρας στη συνέχεια οδηγείται στον αναγεννητή που θερμαίνει τον αέρα σε περίπου 900°F (482°C). Ο θερμός αέρας στη συνέχεια εισέρχεται τον καυστήρα, όπου θερμαίνεται περαιτέρω πριν εισέλθει στο στρόβιλο. Αφού το αέριο έχει υποστεί διαστολή στο στρόβιλο, είναι περίπου σε 1000°F (538°C) και ουσιαστικά σε πίεση περιβάλλοντος. Το αέριο διοχετεύεται μέσω του αναγεννητή όπου η απορριπτόμενη θερμότητα μεταφέρεται προς τον εισερχόμενο αέρα. Το αέριο στη συνέχεια εκχέεται εντός του αέρα του περιβάλλοντος μέσω της εξάτμισης τύπου στοίβας. Στην πραγματικότητα, η θερμότητα που θα μπορούσε αλλιώς να χαθεί, μεταφέρεται στον αέρα, μειώνοντας την ποσότητα του καυσίμου που πρέπει να καταναλώνεται για τη λειτουργία του στροβίλου. Για ένα στρόβιλο της τάξης των 25 MW, ο αναγεννητής θερμαίνει 5 εκατομμύρια λίτρα αέρα ανά ημέρα.

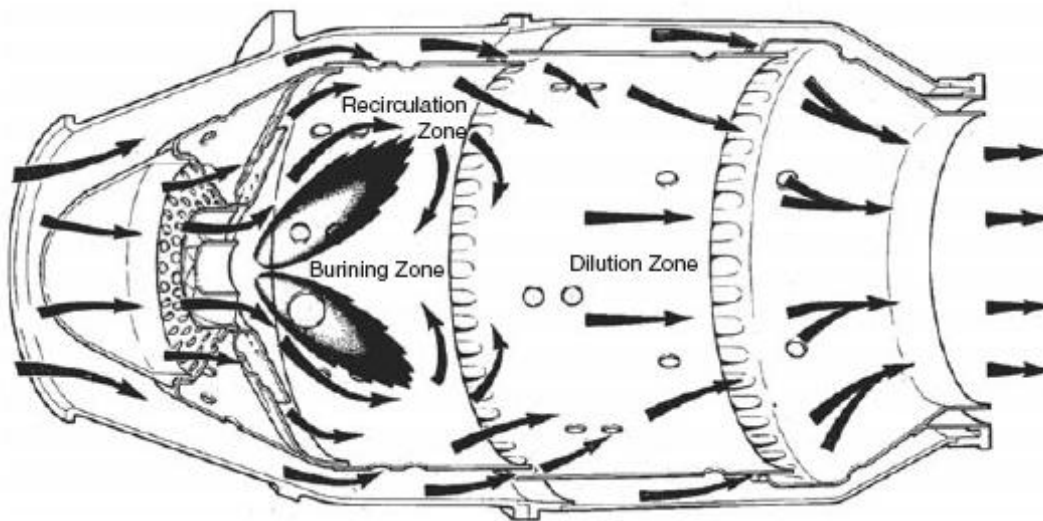
1.5.3. Καυστήρες.

Όλοι οι καυστήρες αεριοστροβίλων εκτελούν την ίδια λειτουργία: αυξάνουν τη θερμοκρασία του αερίου υψηλής πίεσης. Ο καυστήρας αεριοστροβίλου χρησιμοποιεί πολύ λίγο αέρα (10%) κατά τη διαδικασία καύσης. Το υπόλοιπο του αέρα χρησιμοποιείται για την ψύξη και ανάμειξη. Οι νέοι καυστήρες κυκλοφορούν τον ατμό εξυπηρετώντας έτσι σκοπούς ψύξης. Ο αέρας από το συμπιεστή, πρέπει να διαχυθεί πριν εισέλθει στον καυστήρα. Η ταχύτητα του αέρα που εξέρχεται από τον συμπιεστή είναι περίπου 400-600 ft/sec (122-183m/sec) και η ταχύτητα στον καυστήρα πρέπει να διατηρείται κάτω από 50 ft/sec (15.2m/sec). Ακόμη και σε αυτές τις χαμηλές ταχύτητες πρέπει να ληφθεί φροντίδα για να αποφευχθεί η φλόγα να ασκηθεί στην αντίθετη κατεύθυνση.

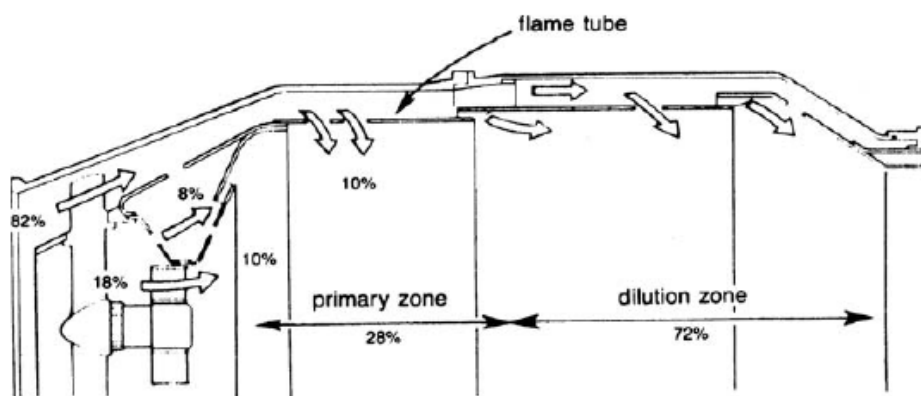
Ο καυστήρας είναι ένας θερμαντήρας αέρα άμεσης καύσης στον οποίο το καύσιμο καίγεται σχεδόν στοιχειομετρικά με το ένα τρίτο ή λιγότερο του εξαγόμενου αέρα του συμπιεστή. Τα προϊόντα καύσης στη συνέχεια αναμιγνύονται με τον υπόλοιπο αέρα ώστε να φθάσουν σε μία κατάλληλη θερμοκρασία εισόδου του αεριοστροβίλου. Παρά τις πολλές διαφορές σχεδιασμού σε καυστήρες, όλοι οι θάλαμοι καύσης αεριοστροβίλου έχουν τρία χαρακτηριστικά: (1) μια ζώνη επανακυκλοφορίας, (2) μια ζώνη καύσης (με μία ζώνη επανακυκλοφορίας, η οποία εκτείνεται στην περιοχή αραίωσης) και (3) μια ζώνη αραίωσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-23. Ο αέρας που εισέρχεται σε έναν καυστήρα διαιρείται έτσι ώστε η ροή να κατανομηθεί μεταξύ τριών μεγάλων περιοχών: Στις (1) Κύρια Ζώνη, (2) Ζώνη αραίωσης και (3) δακτυλιοειδή χώρο μεταξύ της επένδυσης και του περιβλήματος.

Η καύση σε ένα καυστήρα λαμβάνει χώρα στην κύρια ζώνη. Η καύση του φυσικού αερίου είναι μια χημική αντίδραση που γίνεται μεταξύ άνθρακα ή υδρογόνου και οξυγόνου. Θερμότητα εκπέμπεται καθώς η αντίδραση πραγματοποιείται. Τα προϊόντα της καύσης είναι το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό. Η αντίδραση είναι στοιχειομετρική, πράγμα που σημαίνει ότι οι αναλογίες των αντιδρώντων είναι τέτοιες ώστε να υπάρχουν ακριβώς αρκετά μόρια οξειδωτή για να επιτευχθεί μια πλήρης αντίδραση ώστε να σταθεροποιηθούν οι μοριακές μορφές στα προϊόντα. Ο αέρας εισέρχεται στον καυστήρα σε απευθείας ροή ή αντίστροφη ροή. Οι περισσότεροι αεριοκινητήρες έχουν απευθείας ροής τύπου καυστήρες. Οι περισσότερες από τις μεγάλες μονάδες τύπου πλαισίου έχουν αντίστροφης ροής. Η λειτουργία της ζώνης επανακυκλοφορίας είναι να εξατμίζει, εν μέρει να καίει και να προετοιμάζει το καύσιμο για την ταχεία καύση εντός του υπόλοιπου της ζώνης καύσης. Στην ιδανική περίπτωση, στο τέλος της ζώνης καύσης, όλα τα καύσιμα πρέπει να καούν έτσι ώστε

η λειτουργία της ζώνης αραιώσης να είναι αποκλειστικά να αναμιχθεί το θερμό αέριο με τον αέρα αραιώσης. Το μίγμα που αφήνει το θάλαμο θα πρέπει να έχει μια θερμοκρασία και κατανομή ταχύτητας αποδεκτή για τα περύγια και τον στρόβιλο. Γενικά, η προσθήκη του αέρα αραιώσης είναι τόσο απότομη ώστε εάν η καύση δεν έχει ολοκληρωθεί κατά το τέλος της ζώνης καύσης, ψύξη λαμβάνει χώρα η οποία εμποδίζει την ολοκλήρωση. Ωστόσο, υπάρχουν ενδείξεις με μερικούς θαλάμους ότι εάν η ζώνη καύσης λειτουργεί με υπερπλούσια μίγματα, ένα μέρος της καύσεως λαμβάνει χώρα εντός της περιοχής αραιώσης. Η Εικόνα 1-24 δείχνει την κατανομή του αέρα στις διάφορες περιοχές του καυστήρα. Η θεωρητική ταχύτητα αναφοράς είναι η ροή του αέρα εισαγωγής του καυστήρα διαμέσου μιας περιοχής ίσης με τη μέγιστη εγκάρσια τομή του περιβλήματος του καυστήρα. Η ταχύτητα ροής είναι 7.6 mps σε ένα καυστήρα αντίστροφης ροής και μεταξύ 24,4 mps και 41,1 mps σε έναν απευθείας ροής καυστήρα στροβιλοκινητήρα.



Εικόνα 1-23 : Ένας τυπικός can-καυστήρας με απευθείας ροή.



Εικόνα 1-24 : Κατανομή αέρα σε έναν τυπικό καυστήρα.

Η θερμοκρασία εισόδου του καυστήρα εξαρτάται από την αναλογία πίεσης του κινητήρα, το φορτίο και τον τύπο του και κατά πόσον ή όχι ο στρόβιλος είναι αναγεννητικός ή μη, ειδικά στις χαμηλές αναλογίες πίεσης. Οι αναλογίες πίεσης των νέων βιομηχανικών αεριοστροβίλων είναι μεταξύ 17:1 και 35:1, που σημαίνει ότι το εύρος θερμοκρασιών εισόδου του καυστήρα κυμαίνεται από 850°F (454°C) έως 1200°F (649°C). Οι νέοι κινητήρες αεροσκαφών έχουν αναλογίες πίεσης, που υπερβαίνουν το 40:1.

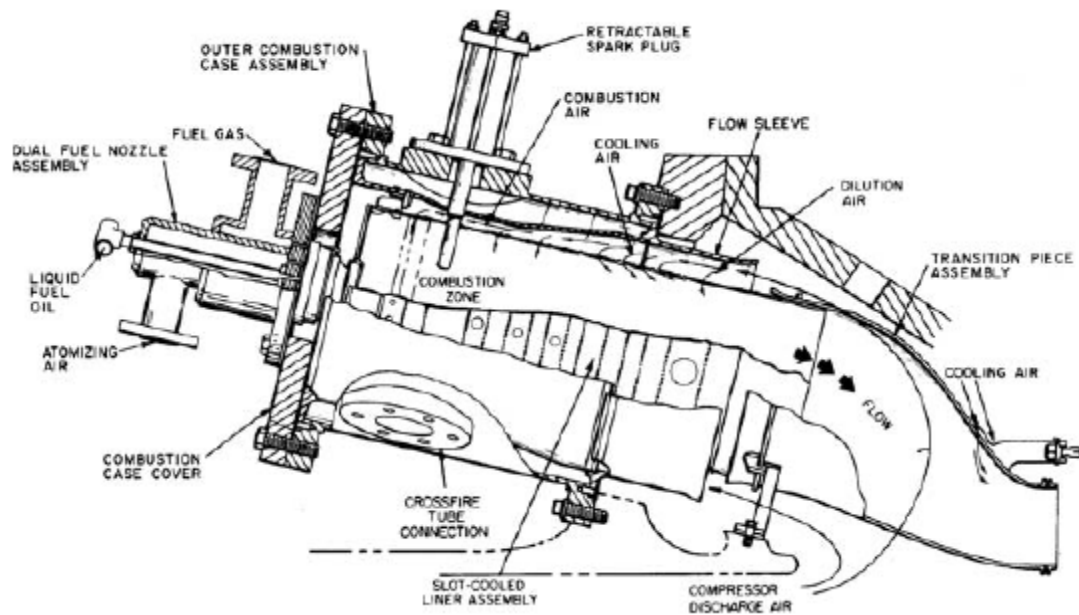
Η επίδοση του καυστήρα μετράται από την απόδοση, τη μείωση της πίεσης που συναντάται στον καυστήρα και την ομαλότητα της θερμοκρασίας εξόδου. Η απόδοση καύσης είναι ένα μέτρο της πληρότητας καύσης. Η πληρότητα καύσης επηρεάζει άμεσα την κατανάλωση καυσίμου, δεδομένου ότι η θερμαντική αξία κάθε άκαυστου καυσίμου δεν χρησιμοποιείται για να αυξήσει τη θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου. Οι κανονικές θερμοκρασίες καύσης έχουν εύρος από 3400°F (1871°C) έως 3500°F (1927°C). Στη θερμοκρασία αυτή, ο όγκος του νιτρικού οξειδίου στο αέριο καύσης είναι περίπου 0,01%. Εάν η θερμοκρασία καύσεως μειωθεί, η ποσότητα του νιτρικού οξειδίου μειώνεται σημαντικά.

1.5.4. Τυπικές ρυθμίσεις καυστήρα.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για να οργανώσουμε καυστήρες σε έναν αεροστρόβιλο. Τα σχέδια εμπίπτουν σε τέσσερις κατηγορίες:

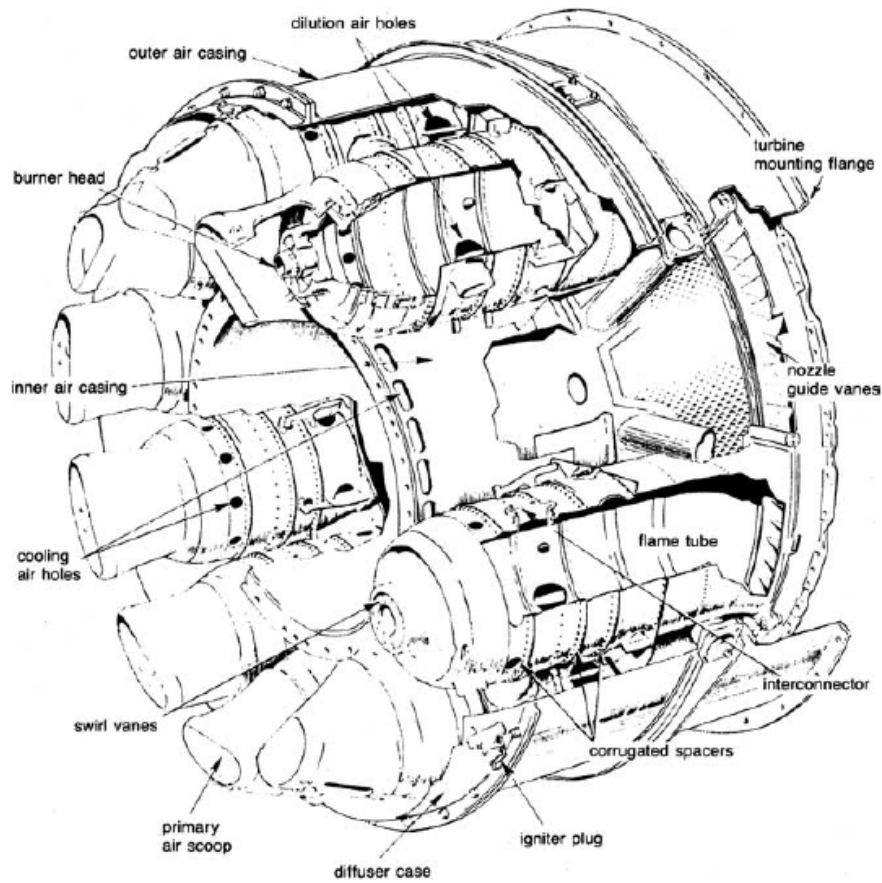
1. Σωληνοειδείς (πλευρικοί καυστήρες).
2. Can-δακτυλιοειδείς.
3. Δακτυλιοειδείς.
4. Εξωτερικοί (πειραματικοί).

Can-δακτυλιοειδείς και δακτυλιοειδείς. Σε εφαρμογές αεροσκαφών όπου η εμπρόσθια επιφάνεια είναι σημαντική, είτε can-δακτυλιοειδή ή δακτυλιοειδή σχέδια χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ευνοϊκών ακτινικών και περιφερειακών χαρακτηριστικών λόγω του μεγάλου αριθμού των ακροφυσίων του καυσίμου που απασχολούνται. Το δακτυλιοειδές σχέδιο είναι ιδιαίτερα δημοφιλές στα νέα σχέδια αεροσκαφών. Ωστόσο, ο can-δακτυλιοειδής σχεδιασμός χρησιμοποιείται ακόμα λόγω των αναπτυξιακών δυσκολιών που σχετίζονται με τα δακτυλιοειδή σχέδια. Ο δακτυλιοειδής καυστήρας είναι πιο δημοφιλής σε υψηλότερες θερμοκρασίες ή χαμηλά-Btu αέρια, δεδομένου ότι η ποσότητα του απαιτούμενου αέρα ψύξης είναι πολύ λιγότερη από ό,τι σε can-δακτυλιοειδή σχέδια εξαιτίας ενός πολύ μικρότερου εμβαδού επιφανείας. Η ποσότητα του απαιτούμενου αέρα ψύξης καθίσταται ένας σημαντικός παράγοντας σε εφαρμογές χαμηλών-Btu αερίων, δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος του αέρα χρησιμοποιείται στη κύρια ζώνη και λίγη ποσότητα αφήνεται για ψύξη του φίλμ. Η ανάπτυξη ενός can-δακτυλιοειδή σχεδιασμού απαιτεί πειράματα με ένα μόνο can, ενώ ο δακτυλιοειδής καυστήρας πρέπει να αντιμετωπίζεται ως μονάδα και απαιτεί πολύ περισσότερο υλικό και ροή συμπιεστή. Οι can-δακτυλιοειδείς καυστήρες μπορεί να είναι ευθέως διαμπερούς ή αντίστροφης ροής σχεδιασμού. Εάν οι can-δακτυλιοειδείς χρησιμοποιούνται σε αεροσκάφη, ο ευθέως διαμπερούς σχεδιασμός χρησιμοποιείται, ενώ ένας σχεδιασμός αντίστροφης ροής μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικούς κινητήρες. Οι δακτυλιοειδείς καυστήρες είναι σχεδόν πάντα ευθέως διαμπερούς σχεδιασμοί. Η Εικόνα 1-25 παρουσιάζει έναν τυπικό can-δακτυλιοειδή καυστήρα που χρησιμοποιείται σε μονάδες τύπου πλαισίου, με αντίστροφη ροή. Η Εικόνα 1-26 είναι ένας τουρμπο-δακτυλιοειδής καυστήρας που χρησιμοποιείται σε καυστήρες τύπου αεροσκαφών και η Εικόνα 1-27 παρουσιάζει ένα δακτυλιοειδή καυστήρα σε ένα αεριοστρόβιλο αεροσκάφους.

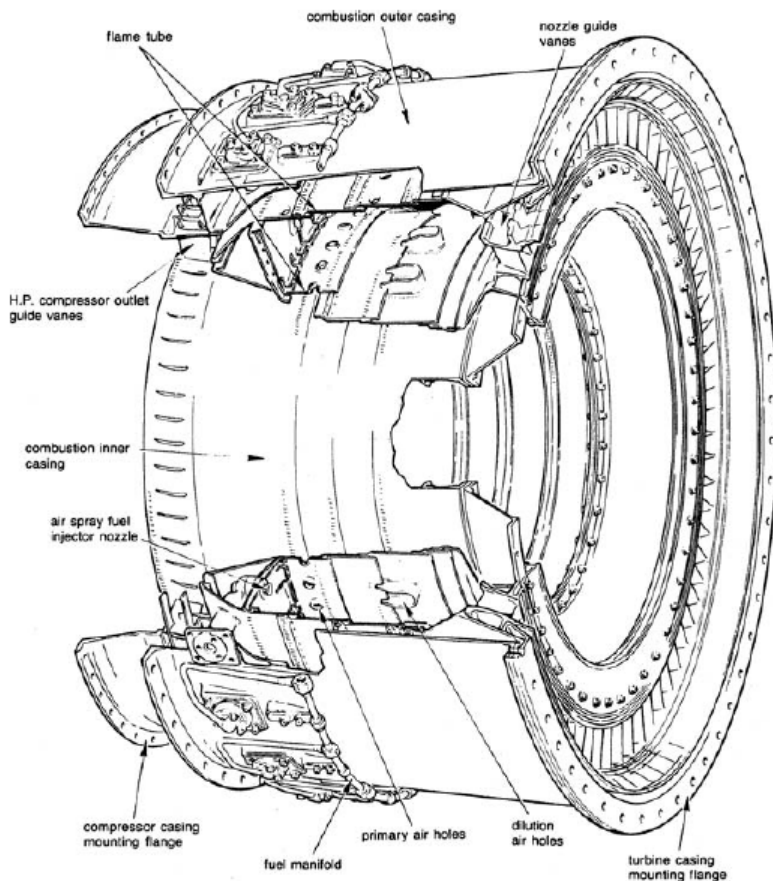


Εικόνα 1-25 : Ένας τυπικός can-δακτυλοειδής καυστήρας αντίστροφης ροής.

Σωληνοειδείς (πλευρικοί καυστήρες). Αυτά τα σχέδια βρέθηκαν σε μεγάλους βιομηχανικούς στροβίλους, ειδικά στα Ευρωπαϊκά σχέδια και σε μερικούς αεροστροβίλους μικρών οχημάτων. Προσφέρουν τα πλεονεκτήματα της απλότητας σχεδιασμού, της ευκολίας συντήρησης και της μακράς διάρκειας ζωής λόγω των χαμηλών ποσοστών απελευθέρωσης θερμότητας. Οι καυστήρες μπορεί να είναι «ευθείως διαμπερούς» ή «αντίστροφης ροής» σχεδιασμού. Στον σχεδιασμό αντίστροφης ροής ο αέρας εισέρχεται στον δακτύλιο μεταξύ του καυστήρα και του περιβλήματός του, συνήθως ένας θερμός σωλήνας αερίου στο στρόβιλο. Τα αντίστροφης ροής σχέδια έχουν ελάχιστο μήκος. Η Εικόνα 1-28 δείχνει έναν τέτοιο σχεδιασμό καυστήρα.



Εικόνα 1-26 : Ένας turbo-δακτυλιοειδής θάλαμος καύσης για αεριοστρόβιλους τύπου αεροσκαφών.



Εικόνα 1-27 : Ένας δακτυλοειδής θάλαμος καύσης.

Εξωτερικός καυστήρας (πειραματικός). Ο εναλλάκτης θερμότητας που χρησιμοποιείται σε έναν αεριοστρόβιλο εξωτερικής καύσεως είναι ένας θερμαντήρας άμεσης καύσης αέρα. Στόχος του θερμαντήρα αέρα είναι να επιτύχει υψηλές θερμοκρασίες με ελάχιστη μείωση της πίεσης. Αποτελείται από ένα ορθογώνιο κουτί με ένα στενό τμήμα μετάδοσης θερμότητας στην κορυφή. Τα εξωτερικά περιβλήματα του θερμαντήρα αποτελούνται από ανθρακούχο χάλυβα με επένδυση από στρώμα με ελαφρύ υλικό για τη μόνωση και θέρμανση με εκ νέου ακτινοβολία.

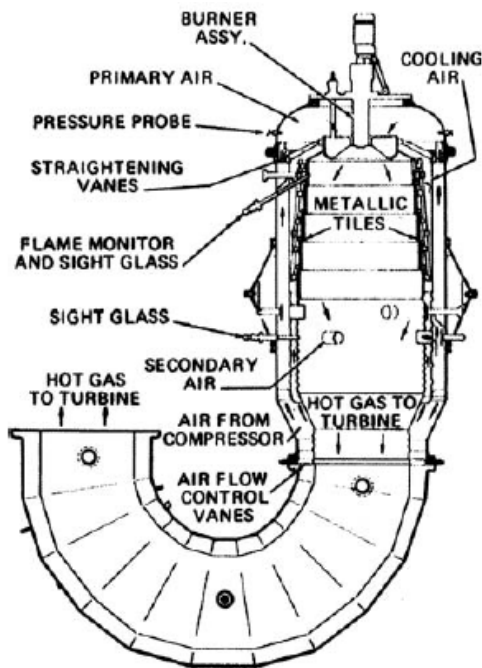
Το εσωτερικό του θερμαντήρα αποτελείται από πηνία τύπου αντεστραμμένου "U" που υποστηρίζεται από ένα σωλήνα εισόδου μεγαλύτερης διαμέτρου και μια κεφαλή επιστροφής που τρέχει σε όλη την απόσταση των δύο μηκών του θερμαντήρα. Ο θερμαντήρας μπορεί να έχει έναν αριθμό διόδων για τον αέρα. Το ένα που φαίνεται στην Εικόνα 1-29 έχει τέσσερις διόδους. Κάθε δίοδος αποτελείται από 11 πείρους συγκρατήσεως, δίνοντας συνολικά 44 πείρους συγκρατήσεως. Οι πείροι συγκρατήσεως κατασκευάζονται από διαφορετικά υλικά, δεδομένου ότι η θερμοκρασία αυξάνεται από περίπου 300-1700°F. Έτσι, οι πείροι συγκρατήσεως μπορεί να κυμαίνονται από 304 ανοξείδωτο χάλυβα έως RA330 στα υψηλής θερμοκρασίας άκρα. Το πλεονέκτημα αυτού του σχεδιασμού είναι ότι η ομαλή μετάβαση των σωλήνων "U" ελαχιστοποιεί τις πτώσεις πίεσης. Οι σωλήνες U-σχήματος επιτρέπουν επίσης τους πείρους συγκρατήσεως ελεύθερα να επεκταθούν με θερμική πίεση. Αυτό το χαρακτηριστικό καταργεί την ανάγκη για τις συνδέσμους απαλλαγής από την πίεση και αυτών των διαστολής. Οι πείροι συγκρατήσεως είναι συνήθως τοποθετημένοι σε ένα

συρόμενο τμήμα για να διευκολύνεται ο καθαρισμός, οι επισκευές ή και η αντικατάσταση του πηνίου ύστερα από μια μακρά περίοδο χρήσης.

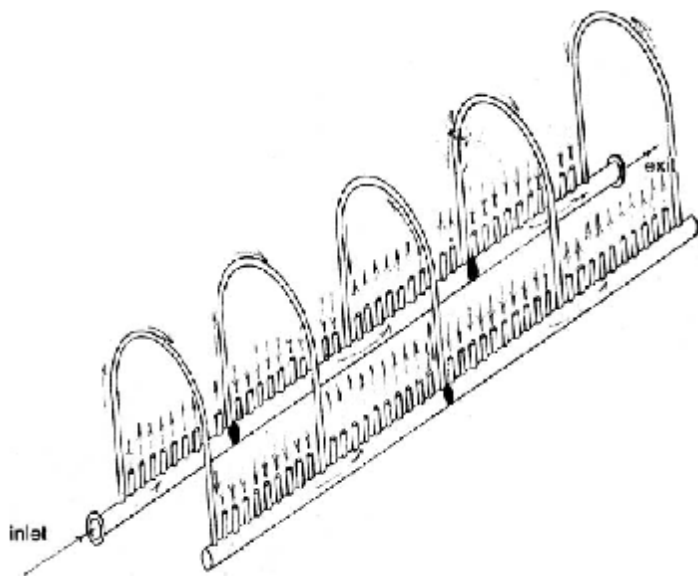
Ένας καυστήρας οριζόντιας καύσης βρίσκεται στο ένα άκρο του θερμαντήρα. Η φλόγα εκτείνεται κατά μήκος του κεντρικού διαμήκους άξονα του θερμαντήρα. Με τον τρόπο αυτό οι πείροι συγκρατήσεως είναι εκτεθειμένοι στην ανοιχτή φλόγα και μπορούν να υποβληθούν σε ένα μέγιστο ρυθμό ακτινοβολούμενης μεταφοράς θερμότητας. Οι σωλήνες πρέπει να είναι επαρκώς μακριά από την φλόγα για να εμποδίσουν τυχόν θερμά σημεία ή τσιμπήματα φλόγας.

Ο αέρας από το συμπιεστή εισέρχεται στο συλλέκτη εισόδου και διανέμεται μέσω του πρώτου σετ πείρων σπειρωμάτων. Ένα διάφραγμα στην είσοδο εμποδίζει τη ροή του αέρα από το να συνεχίσει πέρα από αυτό το σετ πείρων σπειρωμάτων. Ο αέρας στη συνέχεια μεταφέρεται στην κεφαλή επιστροφής και προχωρεί περαιτέρω μέχρι να συναντήσει ένα δεύτερο διάφραγμα. Αυτή η διάταξη δίνει διάφορα περάσματα και βοηθά στην ελαχιστοποίηση της πτώσης πίεσης που οφείλεται στην τριβή. Ο αέρας τελικά επιστρέφει στο ακραίο τμήμα του συλλέκτη εισόδου και εξέρχεται στην είσοδο του αεροστροβίλου.

Ο καυστήρας θα πρέπει να σχεδιασθεί για το χειρισμό προθερμασμένου αέρα καύσεως. Ο προθερμασμένος αέρας καύσης λαμβάνεται με εκτροπή μέρους των καυσαερίων από τον αεροστρόβιλο. Ο αέρας από τον στρόβιλο είναι καθαρός, θερμός αέρας. Για την ανάκτηση επιπλέον θερμικής ενέργειας από τα καυσαέρια καπναγωγού, ένα πηνίο ατμού τοποθετείται στο τμήμα μεταφοράς θερμότητας του θερμαντήρα. Ο ατμός χρησιμοποιείται για έγχυση ατμού εντός της κατάθλιψης του συμπιεστή ή για να οδηγήσει έναν ατμοκίνητο στρόβιλο. Η θερμοκρασία των καυσαερίων που εξέρχεται από το θερμαντήρα πρέπει να είναι περίπου 600°F (316°C).



Εικόνα 1-28 : Ένας τυπικός καυστήρας can-δακτυλιοειδής αντίστροφης ροής.



Εικόνα 1-29 : Καυστήρας εξωτερικής καύσεως με 4 περάσματα.

1.6. Τύπος καυσίμων.

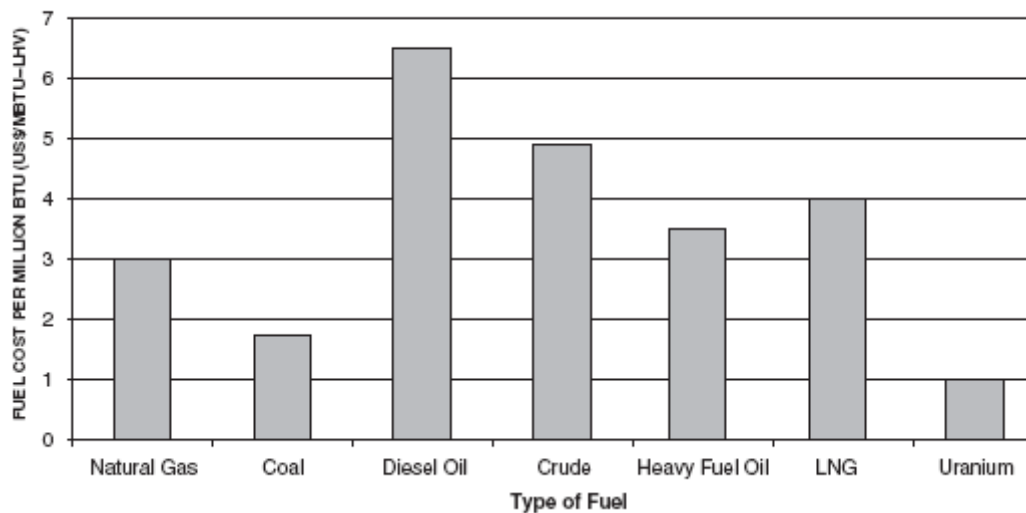
Το φυσικό αέριο είναι το επιλεγμένο καύσιμο, όπου αυτό είναι διαθέσιμο, λόγω της καθαρής καύσης του και της ανταγωνιστικής τιμολόγησης του, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-30. Οι τιμές για το ουράνιο, το καύσιμο των πυρηνικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και του άνθρακα, το καύσιμο των σταθμών παραγωγής ενέργειας ατμού, ήταν σταθερές όλα αυτά τα χρόνια και ήταν οι χαμηλότερες. Περιβαλλοντικές ανησυχίες καθώς και ανησυχίες για την ασφάλεια, το υψηλό αρχικό κόστος και το μεγάλο χρονικό διάστημα από τον σχεδιασμό μέχρι την παραγωγή, έχουν πλήξει τις πυρηνικές βιομηχανίες και τις μονάδες παραγωγής ατμού. Κάθε φορά που το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο είναι το επιλεγμένο καύσιμο, αεριοστρόβιλοι και μονάδες παραγωγής συνδυασμένου κύκλου είναι οι επιλεγμένες μονάδες παραγωγής καθώς μετατρέπουν το καύσιμο σε ηλεκτρική ενέργεια πολύ πιο αποτελεσματικά και οικονομικά. Εκτιμάται ότι από 1997-2014 το 25% των μονάδων παραγωγής θα είναι μονάδες παραγωγής συνδυασμένου κύκλου και ότι το 9% θα είναι αεριοστρόβιλοι. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι περίπου το 40% των αεριοστροβίλων δεν λειτουργούν με φυσικό αέριο.

Η χρήση του φυσικού αερίου έχει αυξηθεί και έχει φθάσει σε τιμές υψηλές. Αυτό θα οδηγήσει τα άλλα καύσιμα στην αγορά, ώστε να ανταγωνιστούν το φυσικό αέριο ως πηγή καυσίμων. Η Εικόνα 1-31 δείχνει την ανάπτυξη του φυσικού αερίου ως επιλεγμένο καύσιμο ιδίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάπτυξη αυτή βασίζεται στην ολοκλήρωση ενός καλού συστήματος διανομής. Αυτό σημαίνει την ανάπτυξη των μονάδων συνδυασμένου κύκλου.

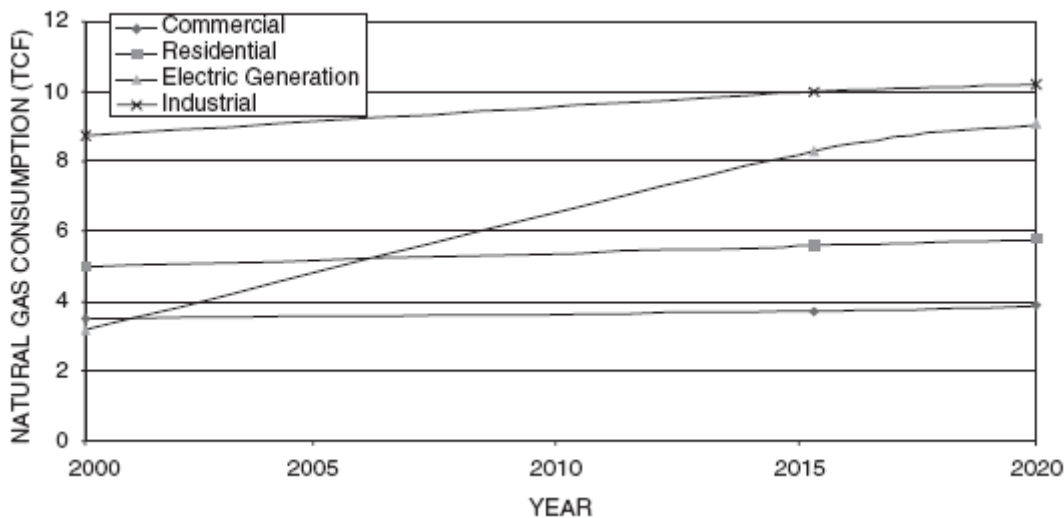
Η Εικόνα 1-32 δείχνει την προτίμηση του φυσικού αερίου σε ολόκληρο τον κόσμο. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα στην Ευρώπη, όπου το 71% της νέας ισχύος αναμένεται να τροφοδοτείται από το φυσικό αέριο, στη Λατινική Αμερική, όπου το ποσοστό ανέρχεται σε 73% και στη

Βόρεια Αμερική, όπου το ποσοστό είναι της τάξης του 84%. Αυτό σημαίνει ουσιαστική ανάπτυξη των μονάδων συνδυασμένου κύκλου.

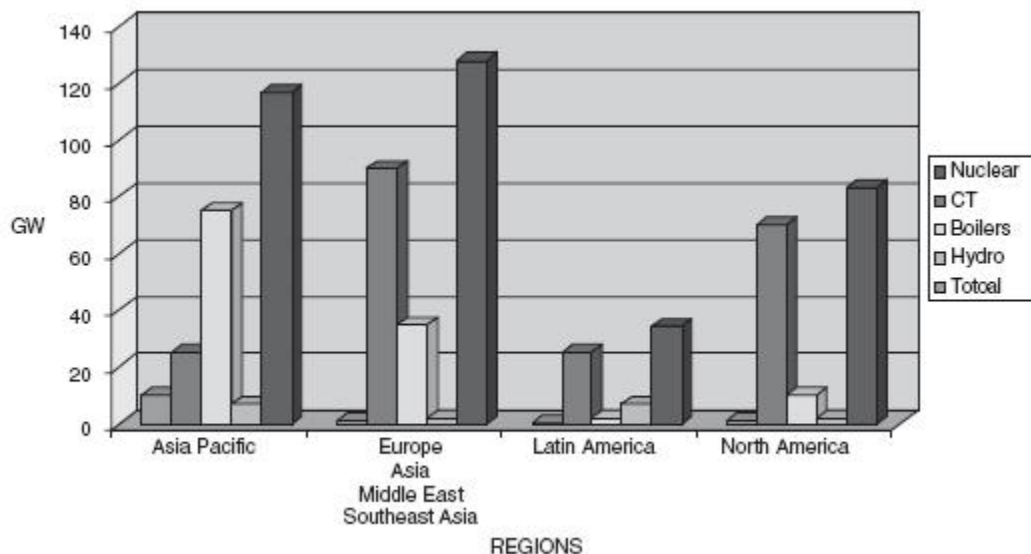
Οι νέοι αεριοστρόβιλοι επίσης αξιοποιούν καυστήρες χαμηλών NOx για τη μείωση των εκπομπών NOx, που διαφορετικά θα είναι υψηλές λόγω της υψηλής θερμοκρασίας πυράκτωσης των 2300°F (1260°C) περίπου. Αυτοί οι καυστήρες χαμηλών NOx απαιτούν προσεκτική βαθμονόμηση για την εξασφάλιση ίδιας θερμοκρασίας πυράκτωσης σε κάθε καυστήρα. Νέοι τύποι οργάνων όπως δυναμικοί μορφοτροπείς πίεσης έχουν βρεθεί να είναι αποτελεσματικοί για την εξασφάλιση σταθεροποιημένη καύσης σε καθένα από τους καυστήρες.



Εικόνα 1-30 : Τυπικά κόστη καυσίμων ανά εκατομμύριο BTUs.



Εικόνα 1-31 : Προβλεπόμενη κατανάλωση φυσικού αερίου για την περίοδο 2000-2020.

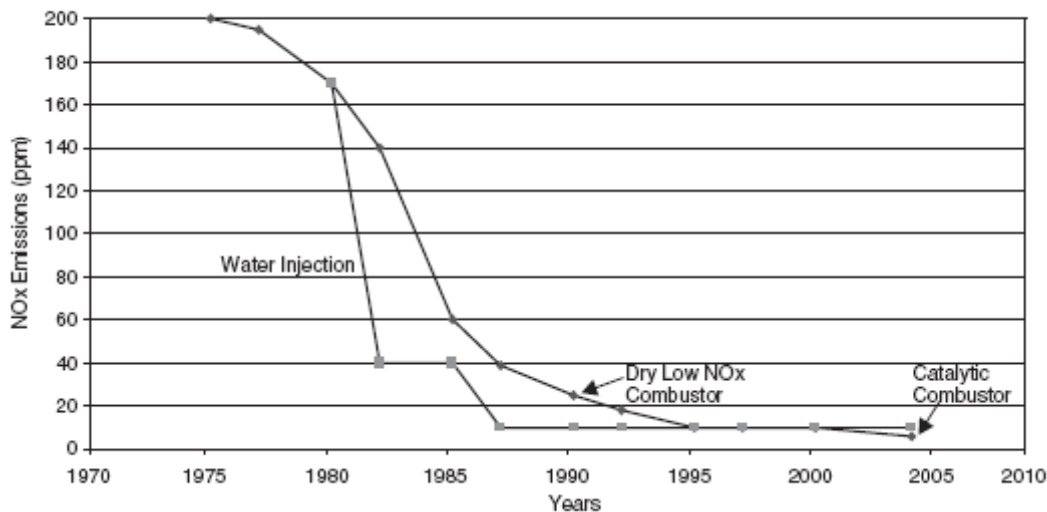


Εικόνα 1-32 : Οι τάσεις των τεχνολογιών, υποδεικνύουν πως το φυσικό αέριο είναι το επιλεγόμενο καύσιμο.

1.7. Περιβαλλοντικές επιδράσεις.

Η χρήση του φυσικού αερίου και η χρήση των νέων dry low NO_x καυστήρων έχουν μειώσει τα NO_x επίπεδα σε κάτω από 10ppm. Η Εικόνα 1-33 δείχνει πως τα τελευταία 30 χρόνια, η μείωση των NO_x πρώτα με τη χρήση έγχυσης ατμού (υγροί καυστήρες) στους καυστήρες και στη συνέχεια, στη δεκαετία του 1990 οι dry low NO_x καυστήρες, είχαν μειώσει σημαντικά την παραγωγή NO_x. Οι νέες μονάδες υπό ανάπτυξη έχουν στόχους που θα μειώσουν τα επίπεδα των NO_x κάτω από 9ppm. Οι καταλυτικοί μετατροπείς έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με τους δύο αυτούς τύπους καυστήρων για την περαιτέρω μείωση των εκπομπών NO_x.

Νέες έρευνες σε καυστήρες όπως η καταλυτική καύση υπόσχεται πολλά και τιμές τόσο χαμηλές όσο 2ppm μπορούν να επιτευχθούν στο μέλλον. Οι καταλυτικοί καυστήρες χρησιμοποιούνται ήδη σε ορισμένους κινητήρες και έχουν εξασφαλίσει πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα.



Εικόνα 1-33 : Έλεγχος των εκπομπών NO_x των αεριοστροβίλων από το 1970.

1.8. Τμήμα διαστολέα στροβίλου.

Υπάρχουν δύο τύποι στροβίλων που χρησιμοποιούνται σε αεριοστροβίλους. Αποτελούνται από τύπου αξονικής ροής και ακτινικής-εισροής. Ο αξονικής ροής στρόβιλος χρησιμοποιείται σε περισσότερες από το 95% όλων των εφαρμογών.

Οι δύο τύποι στροβίλων, αξονικής ροής και ακτινικής-εισροής, μπορούν να χωριστούν περαιτέρω σε τύπου ώθησης ή αντίδρασης μονάδες. Οι πρώτοι λαμβάνουν ολόκληρη την πτώση ενθαλπίας τους μέσω των ακροφυσίων, ενώ οι δεύτεροι λαμβάνουν μια μερική πτώση τόσο μέσω των ακροφυσίων όσο και μέσω των πτερυγίων πτερωτής.

1.8.1. Στρόβιλος ακτινικής εισροής.

Ο στρόβιλος ακτινικής-εισροής ή ακτινικός στρόβιλος με προς τα έξω ροή ήταν σε χρήση για πολλά χρόνια. Βασικά ένας φυγοκεντρικός συμπιεστής με αντίστροφη ροή και αντίθετη περιστροφή, ο ακτινικός στρόβιλος με προς τα έξω ροή χρησιμοποιείται για μικρότερα φορτία και σε μικρότερο εύρος λειτουργίας από το στρόβιλο αξονικής ροής.

Οι ακτινικής-εισροής στρόβιλοι μόλις τώρα αρχίζουν να χρησιμοποιούνται επειδή ελάχιστα ήταν γνωστά για αυτούς μέχρι σήμερα. Οι στρόβιλοι αξονικής ροής έχουν τύχει τεράστιου ενδιαφέροντος λόγω της λίγης εμπρόσθιας επιφάνειά τους, που τους καθιστά κατάλληλους για τη βιομηχανία αεροσκαφών. Ωστόσο, η αξονική μηχανή είναι πολύ μεγαλύτερη από την ακτινική μηχανή, καθιστώντας τη ακατάλληλη για ορισμένες εφαρμογές. Οι ακτινικής ροής στρόβιλοι χρησιμοποιούνται σε στροβιλοσυμπιεστές και σε ορισμένους τύπους διαστολέων.

Ο ακτινικός στρόβιλος με προς τα έξω ροή έχει πολλά εξαρτήματα παρόμοια με ένα φυγοκεντρικό συμπιεστή. Υπάρχουν δύο είδη ακτινικών στροβίλων με προς τα έξω ροή: ο

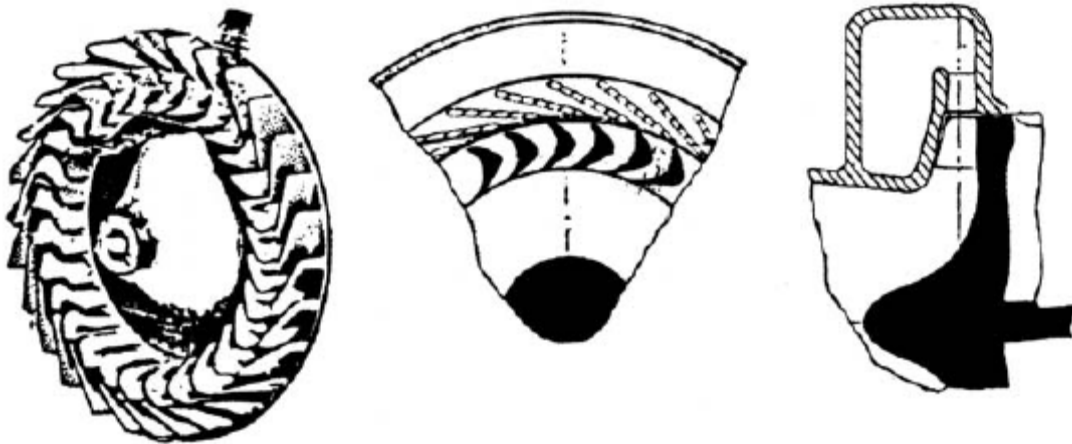
πρόβολος και ο μικτής ροής. Ο τύπος προβόλου στην Εικόνα 1-34 είναι παρόμοιος με ένα στρόβιλο αξονικής ροής, αλλά έχει ακτινικά περύγια. Ωστόσο, ο στρόβιλος προβόλου δεν είναι δημοφιλής, λόγω των δυσχερειών σε σχεδιασμό και παραγωγή.

1.8.2. Στρόβιλος μικτής ροής.

Ο στρόβιλος που φαίνεται στην Εικόνα 1-35 είναι σχεδόν πανομοιότυπος με ένα φυγοκεντρικό συμπιεστή, με εξαίρεση τα εξαρτήματά του, που έχουν διαφορετικές λειτουργίες. Ο κύλινδρος χρησιμοποιείται για τη διανομή του αερίου ομοιόμορφα γύρω από την περιφέρεια του στρόβιλου.

Τα ακροφύσια, που χρησιμοποιούνται για την επιτάχυνση της ροής προς το άκρο της περωτής είναι συνήθως ευθείες βάνες χωρίς σχεδιασμό αεροτομής. Η δίνη είναι ένα χώρος χωρίς βάνες και επιτρέπει την εξίσωση των πιέσεων. Η ροή εισέρχεται ακτινικά στο ρότορα στην άκρη χωρίς σημαντική αξονική ταχύτητα και εξέρχεται από το ρότορα αξονικά, με λίγη ακτινική ταχύτητα.

Αυτοί οι στρόβιλοι χρησιμοποιούνται λόγω του χαμηλότερου κόστους παραγωγής, εν μέρει επειδή η περύγωση ακροφυσίου δεν απαιτεί οποιονδήποτε σχεδιασμό σε καμπυλότητα ή αεροτομή.



Εικόνα 1-34 : Στρόβιλος ακτινικής ροής τύπου προβόλου (cantilever) .

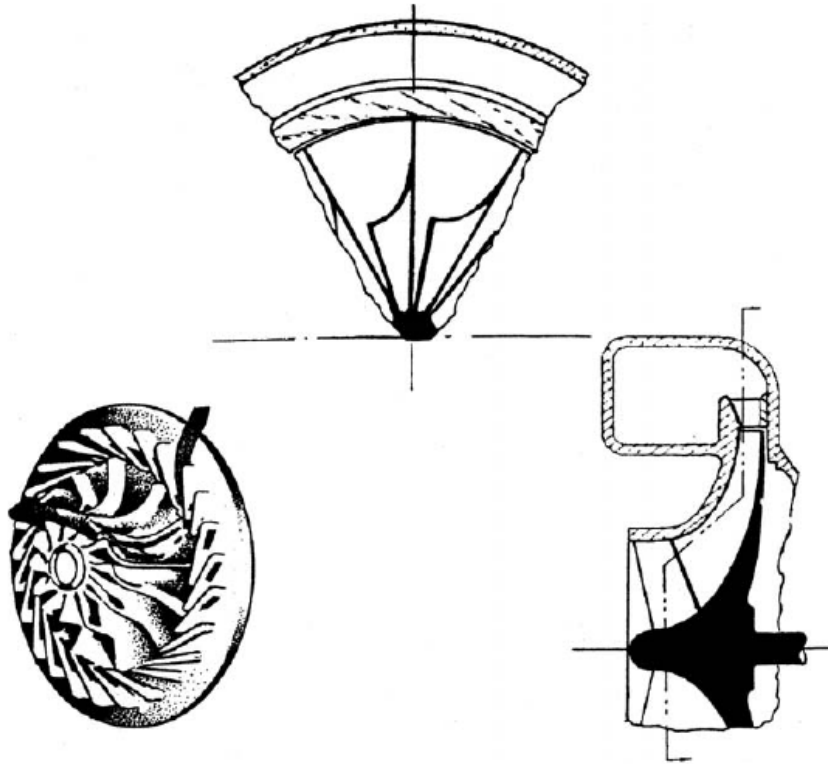
1.8.3. Στρόβιλος αξονικής ροής.

Ο στρόβιλος αξονικής ροής, όπως ο ομόλογός του, ο συμπιεστής αξονικής ροής, έχει ροή, η οποία εισέρχεται και φεύγει κατά την αξονική διεύθυνση. Υπάρχουν δύο τύποι αξονικών στροβίλων: (1) τύπος ώθησης και (2) τύπος αντίδρασης. Ο στρόβιλος ώθησης έχει ολόκληρη την πτώση ενθαλπίας της στο ακροφύσιο. Επομένως έχει μια πολύ μεγάλη ταχύτητα που εισέρχεται στο ρότορα. Ο στρόβιλος αντίδρασης διαιρεί την πτώση ενθαλπίας στο ακροφύσιο και το ρότορα. Η Εικόνα 1-37 είναι μια σχηματική απεικόνιση ενός στροβίλου αξονικής ροής, που επίσης απεικονίζει την κατανομή της πίεσης, της θερμοκρασίας και της απόλυτης ταχύτητας.

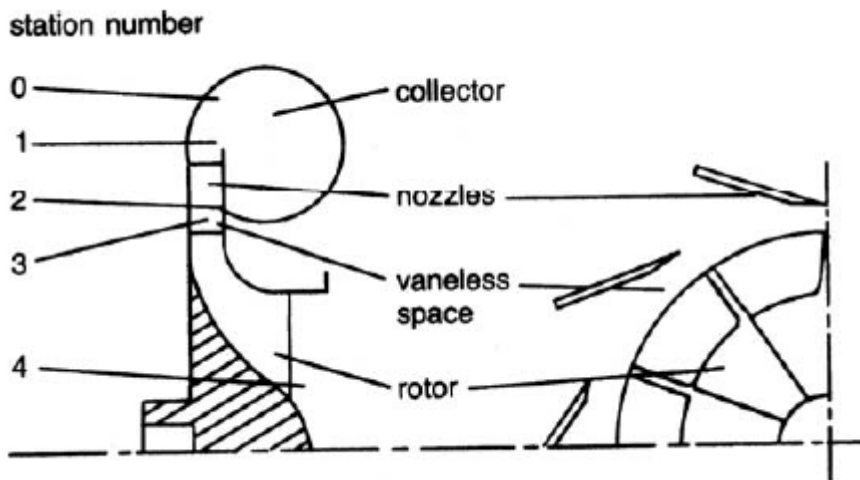
Οι περισσότεροι στρόβιλοι αξονικής ροής αποτελούνται από περισσότερο από ένα στάδιο: τα μπροστινά στάδια που είναι συνήθως ώθησης (μηδέν αντίδραση) και τα τελευταία στάδια που έχουν περίπου 50% αντίδραση. Τα στάδια ώθησης παράγουν περίπου διπλάσια παραγωγή από ένα συγκρίσιμο στάδιο 50% αντίδρασης, ενώ η απόδοση της ώθησης ενός σταδίου είναι μικρότερη από εκείνη ενός σταδίου 50% αντίδρασης.

Οι υψηλές θερμοκρασίες που τώρα είναι διαθέσιμες στο τμήμα στροβίλου οφείλονται σε βελτιώσεις της μεταλλουργίας των πτερυγίων στους στροβίλους. Η ανάπτυξη των κατευθυνόμενων στερεοποιημένων πτερυγίων καθώς και των νέων απλών κρυσταλλικών πτερυγίων, με τις νέες επιστρώσεις και τα νέα συστήματα ψύξης, είναι υπεύθυνη για την αύξηση των θερμοκρασιών ανάφλεξης. Η υψηλή αναλογία πίεσης στο συμπιεστή προκαλεί επίσης τον αέρα ψύξης που χρησιμοποιείται στα πρώτα στάδια του στροβίλου να είναι πολύ ζεστός. Οι θερμοκρασίες που εξέρχονται από το συμπιεστή αεριοστροβίλου μπορεί να φτάσουν και τους 1200°F (649°C). Έτσι, τα υπάρχοντα συστήματα ψύξεως χρειάζονται επανεξέταση και οι δίοδοι ψύξης σε πολλές περιπτώσεις είναι επίσης επικαλυμμένοι. Τα συστήματα ψύξης περιορίζονται στο ποσό του αέρα που μπορούν να χρησιμοποιήσουν, προτού υπάρξει μια αρνητική προσπάθεια στη συνολική θερμική απόδοση που οφείλεται στην αύξηση της ποσότητας του αέρα που χρησιμοποιείται για την ψύξη. Ο εμπειρικός κανόνας στον τομέα αυτό είναι ότι αν χρειαζόμαστε περισσότερο από το 8% του αέρα για την ψύξη, χάνουμε το πλεονέκτημα από την αύξηση της θερμοκρασίας ανάφλεξης.

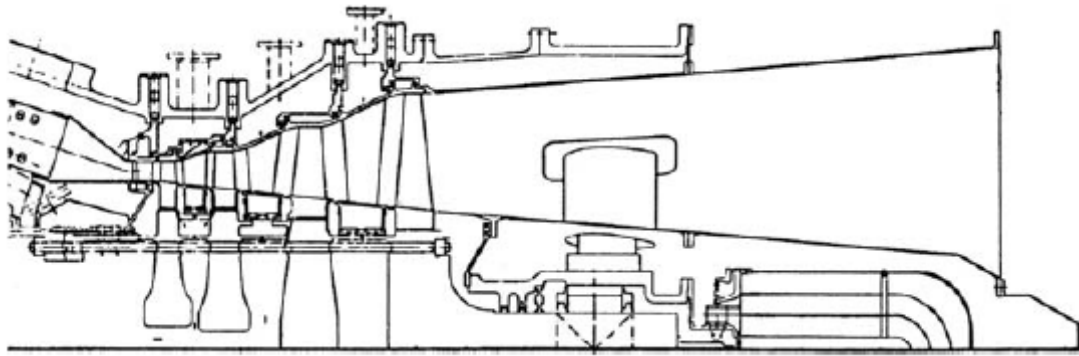
Οι νέοι αεριοστροβίλοι που έχουν σχεδιαστεί για τη νέα χιλιετία εξετάζουν τη χρήση ατμού σαν ένα μέσο ψύξης για το πρώτο και το δεύτερο στάδιο των στροβίλων. Η ψύξη ατμού είναι δυνατή στις νέες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου, η οποία είναι η βάση των περισσότερων από τους νέους αεριοστροβίλους υψηλής απόδοσης. Ο ατμός ως μέρος της ψύξης καθώς και ένα μέρος της κυκλικής ισχύος θα πρέπει να χρησιμοποιούνται στους νέους αεριοστροβίλους στη λειτουργία του συνδυασμένου κύκλου. Η πρόσθετη ισχύς που λαμβάνεται με τη χρήση ατμού είναι η φθηνότερη σε MW/\$ που διατίθεται. Η έγχυση περίπου 5% ατμού κατά βάρος αέρα ανέρχεται σε περίπου 12% περισσότερη δύναμη. Η πίεση του ατμού που εγχέεται πρέπει να είναι τουλάχιστον 4 bar πάνω από την εκτόνωση του συμπιεστή. Ο τρόπος με τον οποίο ο ατμός εγχέεται πρέπει να γίνεται πολύ προσεκτικά, ώστε να αποφευχθεί μια τυχόν απότομη αύξηση στο συμπιεστή.



Εικόνα 1-35 : Στροβίλος ακτινικής εισροής, τύπου μικτής ροής.



Εικόνα 1-36 : Εξαρτήματα στροβίλου ακτινικής εισροής.

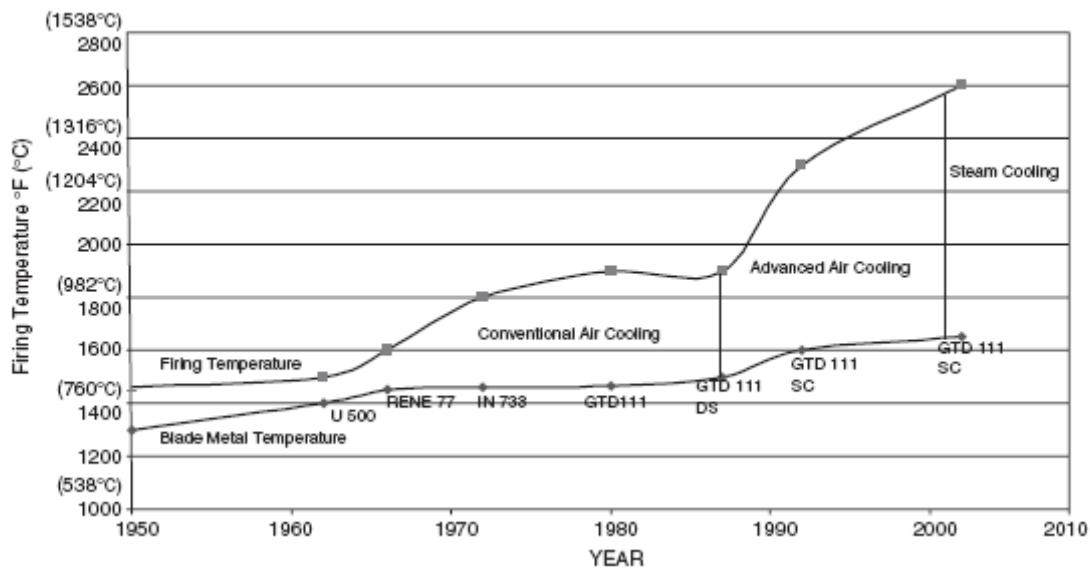


Εικόνα 1-37 : Στρόβιλος αξονικής ροής.

1.9. Υλικά.

Η ανάπτυξη νέων υλικών, καθώς και συστημάτων ψύξης έχουν δει την ταχεία ανάπτυξη της θερμοκρασίας ανάφλεξης του στροβίλου να τον οδηγεί σε υψηλές αποδόσεις. Το περυσίο του σταδίου 1 πρέπει να αντέχει το σοβαρότερο συνδυασμό θερμοκρασίας, πίεσης και το περιβάλλον. Είναι γενικά ένα περιοριστικό εξάρτημα στο μηχάνημα. Η Εικόνα 1-38 δείχνει την τάση της θερμοκρασία ανάφλεξης και την ικανότητα του κράματος περυσίου. Από το 1950, η ικανότητα της θερμοκρασίας του υλικού του καλύμματος του στροβίλου είναι προηγμένη περίπου 850°F (472°C), περίπου 20°F/10°C ανά έτος. Η σημασία αυτής της αύξησης μπορεί να εκτιμηθεί λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι η αύξηση των 100°F (56°C) σε θερμοκρασία ανάφλεξης στροβίλου μπορεί να παράσχει μια αντίστοιχη αύξηση του 8-13% της παραγωγής και 2-4% βελτίωση στην απόδοση απλού κύκλου. Οι πρόοδοι στην επεξεργασία και τα κράματα, ενώ είναι ακριβά και χρονοβόρα, παρέχουν σημαντικά κίνητρα μέσω της αύξησης της πυκνότητας ισχύος και της βελτιωμένης απόδοσης.

Οι αυξήσεις στην ικανότητα θερμοκρασίας του κράματος περυσίου αντιπροσώπευαν την πλειονότητα των αυξήσεων των θερμοκρασιών καύσης μέχρι ο αέρας ψύξης να εισαχθεί, ο οποίος αποσύνδεε τη θερμοκρασία καύσης από τη θερμοκρασία του μεταλλικού περυσίου. Επίσης, καθώς οι θερμοκρασίες μετάλλου πλησίαζαν τους 1600°F (870°C), η θερμή διάβρωση των περυσίων είχε σαν αποτέλεσμα να περιορίζει περισσότερο τη ζωή σε σχέση με την αντοχή, μέχρι την εισαγωγή των προστατευτικών επιστρώσεων. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980, έμφαση δόθηκε σε δύο σημαντικούς τομείς: στη βελτίωση της τεχνολογίας υλικών, ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη ικανότητα στο κράμα περυσίου χωρίς να θυσιάζεται η αντίσταση διάβρωσης του κράματος και στην προηγμένη, εξαιρετικά εξελιγμένη τεχνολογία αέρα ψύξης, για να επιτύχουμε την ικανότητα της θερμοκρασίας καύσης που απαιτείται για τη νέα γενιά των αεριοστροβίλων. Η χρήση της ψύξης ατμού για την περαιτέρω αύξηση των αποδόσεων στο συνδυασμένο κύκλο των καυστήρων, εισήχθη από τα μέσα έως τα τέλη της δεκαετίας του 1990. Η ψύξη ατμού σε περυσία και ακροφύσια εισάχθηκε σε εμπορική λειτουργία εντός του 2002.



Εικόνα 1-38 : Αύξηση θερμοκρασίας ανάφλεξης με βελτίωση υλικών περρυγίων.

Στη δεκαετία του 1980, τα IN-738 περρύγια χρησιμοποιούνται ευρέως. Το IN-738 ήταν το αναγνωρισμένο πρότυπο διάβρωσης για τη βιομηχανία. Τα κατευθυνσιακά στερεοποιημένα (DS) περρύγια, χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά σε κινητήρες αεροσκαφών πριν από περισσότερα από 25 χρόνια, ήταν προσαρμοσμένα για χρήση σε μεγάλες αεροτομές στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και εισήχθησαν στους μεγάλους βιομηχανικούς στροβίλους για την παραγωγή προηγμένων τεχνολογικά ακροφυσίων και περρυγίων. Το κατευθυνσιακά στερεοποιημένο περρύγιο έχει μια δομή κόκκων που τρέχει παράλληλα προς τον κύριο άξονα του τμήματος και δεν περιέχει καθόλου εγκάρσια όρια κόκκων, όπως στα συνηθισμένα περρύγια. Η εξάλειψη αυτών των εγκάρσιων ορίων κόκκων προσδίδει πρόσθετο χρόνο ερπυσμού και αντοχή θραύσης στο κράμα και ο προσανατολισμός της δομής του κόκκου παρέχει ένα ευνοϊκό συντελεστή ελαστικότητας κατά τη διαμήκη διεύθυνση για την αύξηση της διάρκειας ζωής σε κόπωση. Η χρήση των κατευθυνόμενων στερεοποιημένων περρυγίων έχουν ως αποτέλεσμα την ουσιαστική αύξηση της ζωής ερπυσμού, ή την ουσιαστική αύξηση των ανεκτών τάσεων για ορισμένη ζωή. Αυτό το πλεονέκτημα οφείλεται στην εξάλειψη των εγκάρσιων ορίων των κόκκων από τα περρύγια, ο παραδοσιακά αδύναμος κρίκος στην μικροδομή. Εκτός από τη βελτιωμένη διάρκεια ζωής, τα κατευθυνσιακά στερεοποιημένα περρύγια έχουν περισσότερο από 10 φορές τη θερμική καταπόνηση σε σύγκριση με ισομεγέθη περρύγια. Η αντοχή θραύσης των κατευθυνσιακά στερεοποιημένων περρυγίων είναι επίσης ανώτερη εκείνης των ισομεγεθών περρυγίων, εμφανίζοντας ένα πλεονέκτημα άνω του 33%.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990, μονο-κρυσταλλικά περρύγια εισήχθησαν σε αεριοστροβίλους. Αυτά τα περρύγια προσφέρουν επιπλέον οφέλη σε κόπωση και ερπυσμό μέσω της εξάλειψης των δεσμίδων κόκκων. Σε μονο-κρυσταλλικό υλικό, όλες οι δεσμίδες κόκκων εξαλείφονται από τη δομή υλικού και ένα μονο-κρυστάλλο με ελεγχόμενο προσανατολισμό παράγεται σε μορφή αεροτομής. Με την εξάλειψη όλων των δεσμίδων κόκκων και των πρόσθετων ενισχυτικών ορίων κόκκων, μια σημαντική αύξηση του σημείου τήξης του κράματος μπορεί να επιτευχθεί, παρέχοντας έτσι μία αντίστοιχη αύξηση στην

αντοχή υψηλών θερμοκρασιών. Ο εγκάρσιος ερπυσμός και η αντοχή σε κόπωση αυξάνεται, σε σύγκριση με ισομεγέθη ή κατευθυνσιακά στερεοποιημένες δομές. Το πλεονέκτημα των μονο-κρυσταλλικών κραμάτων σε σύγκριση με ισομεγέθη και κατευθυνσιακά στερεοποιημένα κράματα σε διάρκεια κόπωσης χαμηλού κύκλου (Low Cycle Fatigue), αυξάνεται περίπου κατά 10%.

1.10. Επιστρώσεις.

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι επιστρώσεων: (1) θερμικού φράγματος, (2) διάχυσης και ψεκασμού πλάσματος. Οι εξελίξεις στην επίστρωση ήταν απαραίτητες ώστε να εξασφαλιστεί ότι η μεταλλική βάση του πτερυγίου προστατεύεται σε αυτές τις υψηλές θερμοκρασίες. Οι επιστρώσεις διασφαλίζουν ότι η ζωή των πτερυγίων παρατείνεται και σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται σε ρόλο αυτοθυσίας, τα οποία μπορούν να αφαιρούνται και να αντικαθίστανται. Η διάρκεια ζωής μιας επικάλυψης εξαρτάται από τη σύνθεση, το πάχος και το πρότυπο της ομαλότητας στην οποία έχει εναποτεθεί. Ο γενικός τύπος των επιστρώσεων είναι λίγο διαφορετικός από αυτές που χρησιμοποιούνταν πριν από 10-15 χρόνια. Αυτά περιλαμβάνουν διάφορα είδη επιστρώσεων διάχυσης όπως επιστρώσεις αργιλιδίου που αναπτύχθηκαν αρχικά σχεδόν πριν από 40 χρόνια. Το πάχος που απαιτείται είναι μεταξύ 25-75 μm . Οι νέες επιστρώσεις αργιλιδίου με πλατίνα αυξάνουν την αντίσταση στην οξειδωση καθώς και την αντίσταση στη διάβρωση. Οι θερμικές επιστρώσεις φραγής έχουν ένα στρώμα μόνωσης πάχους 100-300 μm , βασίζονται στο $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ και μπορούν να μειώσουν θερμοκρασίες μετάλλων από 120-300°F (50-150°C). Αυτό το είδος της επίστρωσης χρησιμοποιείται σε δοχεία καύσης, τεμάχια μετάβασης, οδηγών πτερυγίων του ακροφυσίου και επίσης πλατφόρμες πτερυγίων.

Το ενδιαφέρον σημείο που πρέπει να επισημανθεί είναι ότι μερικοί από τους κυριότερους κατασκευαστές έχουν στραφεί μακριά από τις επιστρώσεις αντιδιαβρωτικής προστασίας με κατεύθυνση προς τις επιστρώσεις οι οποίες δεν είναι μόνο ανθεκτικές σε οξειδωση, αλλά και σε υψηλές θερμοκρασίες μετάλλων. Οι επιστρώσεις θερμικού φράγματος χρησιμοποιούνται για τις πρώτες φάσεις σε όλες τις προηγμένες τεχνολογικές μονάδες. Η χρήση των εσωτερικών επιστρώσεων γίνεται όλο και πιο δημοφιλής λόγω της υψηλής θερμοκρασίας της εκτόνωσης του συμπιεστή, η οποία οδηγεί σε οξειδωση των εσωτερικών επιφανειών. Οι περισσότερες από αυτές τις επιστρώσεις είναι τύπου αργιλιδίου. Η επιλογή είναι περιορισμένη λόγω προβλημάτων πρόσβασης κυρίως λόγω τσιμεντολάσσης ή της φάσης αερίου / χημικής εναπόθεσης ατμών. Πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα κατά την παραγωγή, διαφορετικά οι εσωτερικές δίοδοι μπορεί να μπλοκαριστούν. Η χρήση της τεχνολογίας πυρομέτρου σε ορισμένους από τους προηγμένους αεροστροβίλους έχει εγκατεστημένα πτερύγια με εσωτερικές δίοδους που είναι αποκλεισμένοι, έτσι ώστε αυτά τα πτερύγια να λειτουργούν σε θερμοκρασίες από 95-158°F (35-70°C).

1.11. Ανάκτηση θερμότητας αεροστροβίλου.

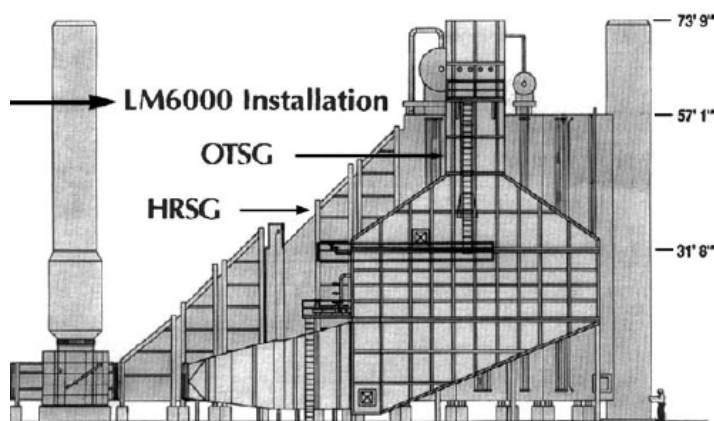
Το σύστημα ανάκτησης αποβληθείσας θερμότητας είναι ένα πάρα πολύ σημαντικό υποσύστημα ενός συστήματος συμπαραγωγής. Στο παρελθόν, αυτό θεωρήθηκε ως ένα ξεχωριστό "πρόσθετο" στοιχείο. Αυτή η άποψη έχει αλλάξει με την αντίληψη ότι η καλή επίδοση, τόσο θερμοδυναμικά όσο και από άποψη αξιοπιστίας, αναπτύσσεται έξω από το

σχεδιασμό του συστήματος ανάκτησης θερμότητας ως αναπόσπαστο τμήμα του συνολικού συστήματος.

Τα καυσαέρια του αεριοστρόβιλου εισέρχονται στην γεννήτρια παραγωγής ατμού με ανάκτηση θερμότητας (Heat Recovery Steam Generating), όπου η ενέργεια μεταφέρεται στο νερό για παραγωγή ατμού. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές διαμορφώσεις των μονάδων HRSG. Οι περισσότερες μονάδες HRSG διαιρούνται στον ίδιο αριθμό τμημάτων, όπως ο ατμοστρόβιλος. Στις περισσότερες περιπτώσεις, κάθε τμήμα της μονάδας HRSG έχει ένα προθερμαντήρα, έναν οικονομητήρα και τροφοδότη νερού και στη συνέχεια ένα υπερθερμαντήρα. Ο ατμός που εισέρχεται στον ατμοστρόβιλο υπερθερμαίνεται.

Ο πιο κοινός τύπος μιας μονάδας HRSG σε ένα μεγάλο εργοστάσιο ρεύματος συνδυασμένου κύκλου είναι το δοχείο τύπου HRSG με εξαναγκασμένη κυκλοφορία. Αυτοί οι τύποι των HRSG είναι κατακόρυφοι. Η ροή των καυσαερίων είναι κάθετη με οριζόντιες δέσμες σωλήνων να εναιωρούνται στη δομή χάλυβα. Η δομή χάλυβα HRSG υποστηρίζει τα δοχεία. Σε μια αναγκαστική κυκλοφορία HRSG, τότε το μίγμα ατμού και ύδατος κυκλοφορεί μέσω σωλήνων εξατμιστήρα χρησιμοποιώντας μία αντλία. Αυτές οι αντλίες αυξάνουν το παρασιτικό φορτίο και έτσι μειώνουν την απόδοση του κύκλου. Σε αυτό το είδος της HRSG οι σωλήνες μεταφοράς θερμότητας είναι οριζόντιες, έχοντας ανασταλεί από τον μη-ψυχόμενο σωλήνα υποστήριξης που βρίσκεται στην διαδρομή του θερμού αερίου. Μερικές κατακόρυφες μονάδες HRSG έχουν σχεδιαστεί με εξατμιστήρες, που λειτουργούν χωρίς την χρήση των αντλιών κυκλοφορίας.

Οι Once Through Steam Generators (OTSG, ατμοπαραγωγοί μονού περάσματος) βρίσκουν γρήγορη αποδοχή εξαιτίας του γεγονότος ότι έχουν μικρότερες περιοχές κάλυψης και μπορούν να εγκατασταθούν σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα και σε χαμηλότερη τιμή. Οι OTSG σε αντίθεση με άλλες HRSG δεν έχουν καθορίσει τα τμήματα του οικονομητήρα, εξατμιστήρα ή του υπερθερμαντήρα. Η Εικόνα 1-39 απεικονίζει ένα σύστημα OTSG και ένα δοχείο τύπου HRSG. Η OTSG είναι βασικά ένας σωλήνας. Νερό εισέρχεται στο ένα άκρο και ο ατμός φεύγει από το άλλο άκρο, εξαλείφοντας το δοχείο και τις αντλίες κυκλοφορίας. Η θέση του νερού στη διασύνδεση ατμού είναι ελεύθερη να κινείται, ανάλογα με την συνολική εισροή θερμότητας από τον αεριοστρόβιλο και ταχύτητες ροής και πιέσεις του τροφοδοτικού ύδατος, στην στήριξη σωλήνα. Σε αντίθεση με άλλες HRSG, οι μονάδες Once Through δεν έχουν δοχεία ατμού.



Εικόνα 1-39 : Σύγκριση ενός HRSG τύπου δοχείου με once through steam generator.

Μερικά σημαντικά σημεία και παρατηρήσεις σχετικά με την ανάκτηση αποβληθείσας θερμότητας αεριοστροβίλου είναι:

Ατμογεννήτριες Πολλαπλών Πιέσεων. Αυτές γίνονται όλο και περισσότερο δημοφιλείς. Με ένα μόνο λέβητα πίεσεως, υπάρχει ένα όριο για την ανάκτηση θερμότητας, επειδή η θερμοκρασία των καυσαερίων δεν μπορεί να μειωθεί κάτω από την θερμοκρασία κορεσμένου ατμού. Αυτό το πρόβλημα αποφεύγεται με την χρήση των επιπέδων πολλαπλών πιέσεων.

Σημείο συσφίξεως. Αυτό ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας των καυσαερίων που εξέρχονται από το τμήμα του εξατμιστήρα και της θερμοκρασίας του κορεσμένου ατμού. Στην ιδανική περίπτωση, όσο χαμηλότερο είναι το σημείο συσφίξεως, τόσο περισσότερη θερμότητα ανακτάται, αλλά αυτό απαιτεί μεγαλύτερη επιφάνεια και, κατά συνέπεια, αυξάνει την αντίθλιψη και το κόστος. Επίσης, υπερβολικά χαμηλά σημεία συσφίξεως μπορεί να σημαίνουν ανεπαρκή παραγωγή ατμού αν το καυσαέριο είναι χαμηλής ενεργειακής αξίας (χαμηλή ροή μάζας ή χαμηλή θερμοκρασία καυσαερίων). Γενικές κατευθυντήριες γραμμές απαιτούν ένα σημείο συσφίξεως της τάξης των 15-40°F (8-22°C). Η τελική επιλογή είναι προφανώς βασισμένη σε οικονομικές εκτιμήσεις.

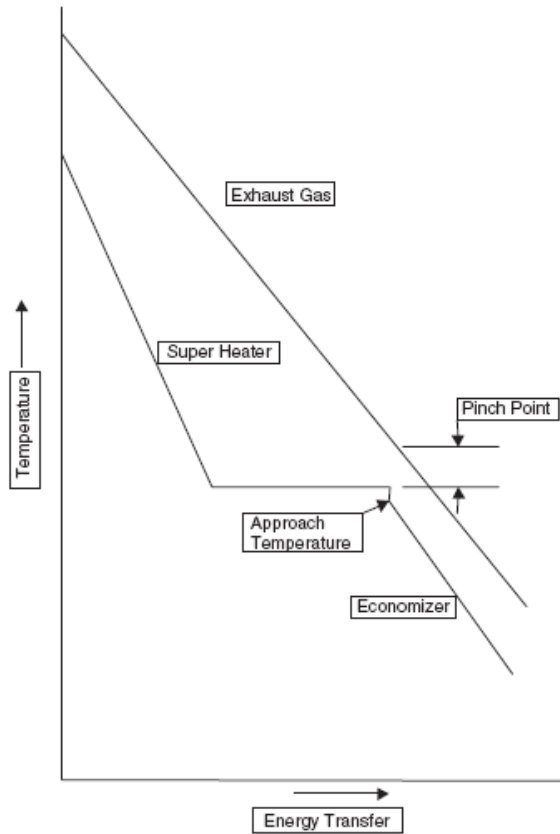
Θερμοκρασία προσέγγισης. Αυτό ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών κορεσμένου ατμού και του νερού εισόδου. Μείωση της θερμοκρασίας προσέγγισης μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της παραγωγής ατμού, αλλά με αυξημένο κόστος. Συντηρητικά υψηλές θερμοκρασίες προσέγγισης διασφαλίζουν ότι καμία παραγωγή ατμού δεν λαμβάνει χώρα στον οικονομητήρα. Τυπικά, οι θερμοκρασίες προσέγγισης κυμαίνονται από 10-20°F (5.5-11°C). Η Εικόνα 1-40 είναι το ενεργειακό διάγραμμα θερμοκρασίας για ένα σύστημα και δείχνει επίσης την προσέγγιση και τα σημεία συσφίξεως για το ίδιο.

Επιδόσεις εκτός σχεδίου. Αυτό είναι ένα σημαντικό ζήτημα για τους λέβητες ανάκτησης αποβληθείσας θερμότητας. Οι επιδόσεις του αεριοστροβίλου επηρεάζονται από το φορτίο, τις συνθήκες περιβάλλοντος και την κατάστασή του (ρύπανση, κλπ.). Αυτό μπορεί να επηρεάσει την θερμοκρασία του καυσαερίου και το ρυθμό ροής του αέρα. Επαρκείς εκτιμήσεις πρέπει να δοθούν για να υποκύψουν τις ροές ατμού (χαμηλή πίεση και υψηλή πίεση) και οι θερμοκρασίες υπερθέρμανσης ποικίλουν ανάλογα με τις αλλαγές στη λειτουργία του αεριοστροβίλου.

Εξατμιστήρες. Αυτοί συνήθως χρησιμοποιούν ένα σχεδιασμό πτερυγίου-σωλήνα. Σωλήνες σπειροειδών πτερυγίων με εξωτερική διάμετρο (OD) των 1,25" έως 2" με τρία έως έξι πτερύγια ανά ίντσα είναι κοινά. Στην περίπτωση των σχεδίων χωρίς φλόγες, η κατασκευή από ανθρακούχο χάλυβα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και οι λέβητες μπορούν να είναι σε ξηρή λειτουργία. Επειδή χρησιμοποιούνται βαρύτερα καύσιμα, ένας μικρότερος αριθμός πτερυγίων ανά ίντσα θα πρέπει να χρησιμοποιείται για να αποφευχθούν προβλήματα ρύπανσης.

Σύστημα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας. Η χρήση της εξαναγκασμένης κυκλοφορίας σε ένα σύστημα ανάκτησης της αποβληθείσας θερμότητας επιτρέπει τη χρήση μικρότερων μεγεθών σωλήνα με εγγενείς αυξημένους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας. Εκτιμήσεις της σταθερότητας ροής πρέπει να αντιμετωπιστούν. Η αντλία επανακυκλοφορίας είναι ένα κρίσιμο συστατικό από τη σκοπιά της αξιοπιστίας και αντλίες σε κατάσταση αναμονής πρέπει να ληφθούν υπόψη. Σε κάθε περίπτωση, μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στην προετοιμασία προδιαγραφών για αυτή την αντλία.

Εκτιμήσεις Αντίθλιψης (Πλευρά αερίου). Αυτές είναι σημαντικές, καθώς υπερβολικά υψηλές αντιθλίψεις δημιουργούν πτώσεις επιδόσεων στους αεριοστροβίλους. Πτώσεις πολύ χαμηλής πίεσης θα απαιτούσαν έναν πολύ μεγάλο εναλλάκτη θερμότητας και περισσότερα έξοδα. Τυπικές πτώσεις πίεσης είναι 8-10 ίντσες νερού.



Εικόνα 1-40 : Διάγραμμα μεταφοράς ενέργειας σε HRSG μιας μονάδας συνδυασμένου κύκλου.

1.12. Συμπληρωματική τροφοδότηση των συστημάτων ανάκτησης θερμότητας.

Υπάρχουν αρκετοί λόγοι για συμπληρωματική τροφοδότηση μιας μονάδας ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας. Πιθανώς ο πιο συνηθισμένος είναι να επιτραπεί στο σύστημα να παρακολουθεί τη ζήτηση (δηλαδή, να παράγει περισσότερο ατμό όταν η εναλλαγή φορτίου είναι ανοδική, σε σύγκριση με αυτό που μπορεί να παράγει η μονάδα χωρίς φλόγες). Αυτό μπορεί να επιτρέψει τον αεριοστροβίλο να είναι τέτοιος ώστε να καλύπτει τη ζήτηση βασικού φορτίου με συμπληρωματική τροφοδότηση προσέχοντας υψηλότερες εναλλαγές φορτίου. Η Εικόνα 1-41 δείχνει μια γεννήτρια ατμού με συμπληρωματική τροφοδότηση καυσαερίων.

Αυξάνοντας τη θερμοκρασία εισόδου στο λέβητα απορριπτόμενης θερμότητας μας επιτρέπει μια σημαντική μείωση της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας και κατά συνέπεια το κόστος. Τυπικά, καθώς η εξάτμιση του αεριοστροβίλου έχει άφθονο οξυγόνο, αγωγοί καυστήρων μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν.

Ένα πλεονέκτημα της συμπληρωματικής τροφοδότησης είναι η αύξηση στην ικανότητα ανάκτησης θερμότητας (αναλογία ανάκτησης). Μία αύξηση 50% στην είσοδο θερμότητας του συστήματος αυξάνει την παραγωγή κατά 94%, με την αναλογία ανάκτησης να αυξάνεται κατά 59%. Ορισμένες σημαντικές κατευθυντήριες γραμμές για το σχεδιασμό για την εξασφάλιση της επιτυχίας περιλαμβάνουν:

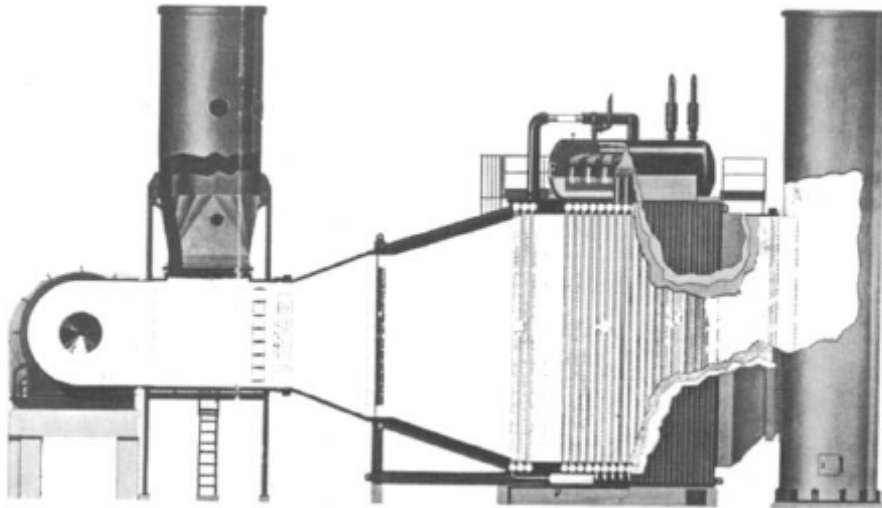
- Ειδικά κράματα μπορεί να χρειαστούν στον υπερθερμαντήρα και στον εξατμιστήρα για να αντέχει τις υψηλές θερμοκρασίες.
- Ο αγωγός εισαγωγής πρέπει να είναι επαρκούς μήκους ώστε να εξασφαλιστεί η πλήρης καύση και να αποφεύγεται η άμεση επαφή της φλόγας στις επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας.
- Εάν η φυσική κυκλοφορία χρησιμοποιείται, ένας επαρκής αριθμός ανυψωτήρων και τροφοδοτών θα πρέπει να παρέχεται καθώς η ροή θερμότητας κατά την είσοδο αυξάνεται.
- Το πάχος μόνωσης στο τμήμα του αγωγού θα πρέπει να αυξηθεί.

1.12.1. Όργανα μέτρησης και έλεγχοι.

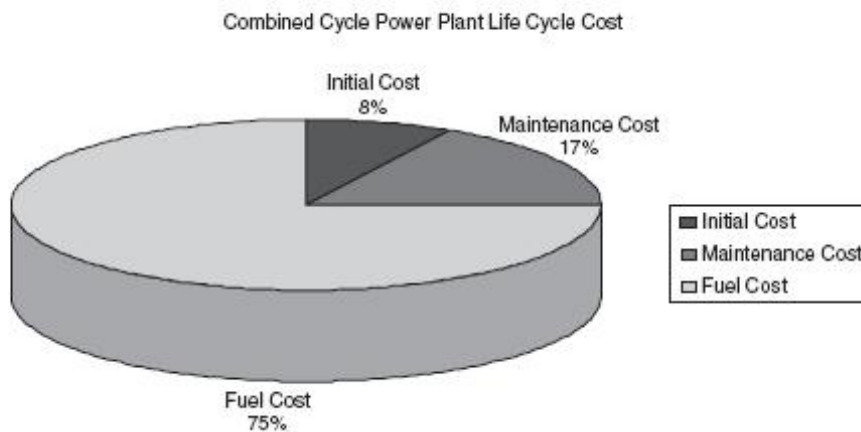
Οι προηγμένοι αεριοστροβίλοι ελέγχονται όλοι ψηφιακά και έχουν ενσωματωμένη σε απευθείας σύνδεση την παρακολούθηση της κατάστασης. Η προσθήκη της νέας παρακολούθησης σε απευθείας σύνδεση απαιτεί νέα και έξυπνα όργανα μέτρησης. Εισάγεται η χρήση των πυρομέτρων που αισθάνονται θερμοκρασίες μεταλλικών περυγίων. Οι θερμοκρασίες μεταλλικών περυγίων είναι η πραγματική ανησυχία, όχι η θερμοκρασία εξόδου του αερίου. Η χρήση δυναμικών μετατροπέων πίεσης για την ανίχνευση απότομης αύξησης και άλλων ασταθειών ροής στο συμπιεστή και επίσης στη διαδικασία καύσης, ιδίως στους νέους καυστήρες χαμηλών NO_x, εισάγεται. Επιταχυνσιόμετρα παρουσιάστηκαν για την ανίχνευση υψηλής συχνότητας διέγερσης των περυγίων. Αυτό αποτρέπει μεγάλες αποτυχίες στους νέους ιδιαίτερα φορτωμένους αεριοστροβίλους.

Η χρήση των πυρομέτρων για τον έλεγχο των προηγμένων αεριοστροβίλων είναι υπό διερεύνηση. Σήμερα, όλοι οι στροβίλοι ελέγχονται με βάση τις θερμοκρασίες εξόδου εξαερωτή στροβίλου ή τις θερμοκρασίες εξόδου στροβίλου ισχύος. Με τη χρήση των θερμοκρασιών μεταλλικών περυγίων του πρώτου τμήματος του στροβίλου, ο αεριοστροβίλος ελέγχεται στην πιο σημαντική παράμετρό του, στη θερμοκρασία των πρώτων σταδίων ακροφυσίων και περυγίων. Με τον τρόπο αυτό, ο στροβίλος λειτουργεί στο μέγιστο της πραγματικής του ικανότητας.

Η χρήση δυναμικών μετατροπέων πίεσης παρέχει έγκαιρη προειδοποίηση των προβλημάτων στο συμπιεστή. Η πολύ υψηλή πίεση, στους περισσότερους από τους προηγμένους αεριοστροβίλους έχουν σαν συνέπεια αυτοί οι συμπιεστές να έχουν μια πολύ στενή περιοχή λειτουργίας μεταξύ απότομης αύξησης και σημείου στραγγαλισμού. Έτσι, αυτές οι μονάδες είναι πολύ ευαίσθητες στους ρύπους και στις γωνίες περυγίων. Η έγκαιρη προειδοποίηση που παρέχεται από την χρήση της μέτρησης της δυναμικής πίεσης στην έξοδο του συμπιεστή μπορεί να μας γλιτώσει από σοβαρά προβλήματα που παρουσιάζονται λόγω της απώλειας στήριξης του άκρου και του φαινόμενου της απότομης αύξησης.



Εικόνα 1-41 : Γεννήτρια ατμού με συμπληρωματική τροφοδότηση καυσαερίων.



Εικόνα 1-42 : Κόστος του κύκλου ζωής της μονάδας για συνδυασμένο κύκλο.

Η χρήση του μετατροπέα δυναμικής πίεσης στο τμήμα καυστήρα, ιδιαίτερα στους χαμηλούς καυστήρες NOx, εξασφαλίζει ότι καθένας τους μπορεί να καίει ομοιόμορφα. Αυτό επιτυγχάνεται με τον έλεγχο της ροής σε κάθε καυστήρα-can μέχρι τα φάσματα που λαμβάνονται από κάθε καυστήρα-can να ταιριάζουν. Αυτή η τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί και βρέθηκε να είναι πολύ αποτελεσματική και εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία του στροβίλου.

Η παρακολούθηση των αποδόσεων όχι μόνο παίζει ένα σημαντικό ρόλο στην παράταση της διάρκειας ζωής, τη διάγνωση των προβλημάτων και την αύξηση του χρόνου μεταξύ των γενικών επισκευών, αλλά επίσης μπορεί να προσφέρει σημαντικές εξοικονομήσεις στην κατανάλωση καυσίμου, εξασφαλίζοντας ότι ο στροβίλος λειτουργεί στο αποδοτικότερο σημείο του. Η παρακολούθηση των αποδόσεων απαιτεί κατανόηση σε βάθος του εξοπλισμού που μετριέται. Η ανάπτυξη αλγορίθμων χρειάζεται προσεκτικό σχεδιασμό και κατανόηση

των χαρακτηριστικών των μηχανημάτων και της διαδικασίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις, βοήθεια από τον κατασκευαστή των μηχανημάτων θα είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα. Για νέο εξοπλισμό η απαίτηση αυτή μπορεί και πρέπει να είναι μέρος των απαιτήσεων προσφοράς. Για μονάδες με ήδη εγκατεστημένο εξοπλισμό ο έλεγχος της μονάδας για να προσδιορίσει την κατάσταση των μηχανημάτων του εργοστασίου αποτελεί το πρώτο βήμα. Η Εικόνα 1-42 δείχνει την κατανομή του κόστους κατά την διάρκεια του κύκλου ζωής μιας μονάδας αεριοστροβίλου. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι το αρχικό κόστος είναι περίπου το 8% του συνολικού κόστους κύκλου ζωής και το λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης είναι περίπου 17% και το κόστος των καυσίμων είναι περίπου 75%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Ανάλυση θεωρητικού και πραγματικού κύκλου.

Η θερμοδυναμική ανάλυση που παρουσιάζεται εδώ είναι μια περιγραφή του πρότυπου κύκλου αέρα Brayton και των διάφορων τροποποιήσεών του. Οι τροποποιήσεις αυτές αξιολογούνται για να εξεταστούν οι επιπτώσεις τους στον βασικό κύκλο. Μια από τις πιο σημαντικές είναι η επαύξηση της ισχύος σε έναν αεριοστρόβιλο. Αυτό αντιμετωπίζεται σε μια ειδική ενότητα στο κεφάλαιο αυτό.

2.1. Ο κύκλος Brayton.

Ο κύκλος Brayton στην ιδανική μορφή του αποτελείται από δύο ισοβαρείς και ισεντροπικές διεργασίες. Οι δύο ισοβαρείς διεργασίες αποτελούνται από το σύστημα καύσης του αεριοστρόβιλου και την πλευρά του αερίου του HRSG. Οι 2 ισεντροπικές διεργασίες αντιπροσωπεύουν την συμπίεση (συμπιεστής) και τις διεργασίες διαστολής του αεριοστρόβιλου (διαστολέας αεριοστρόβιλου). Η Εικόνα 2-1 δείχνει τον ιδανικό κύκλο Brayton.

Μια απλοποιημένη εφαρμογή του πρώτου νόμου της θερμοδυναμικής στον πρότυπο κύκλο αέρα Brayton στην Εικόνα 2-1 (υποθέτοντας πως δεν υπάρχουν αλλαγές στην κινητική και δυναμική ενέργεια) έχει τις ακόλουθες σχέσεις:

Έργο του συμπιεστή:

$$W_c = \dot{m}_a (h_2 - h_1) \quad (2-1)$$

Έργο του αεριοστρόβιλου:

$$W_t = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) (h_3 - h_4) \quad (2-2)$$

Ολικό έργο εξόδου:

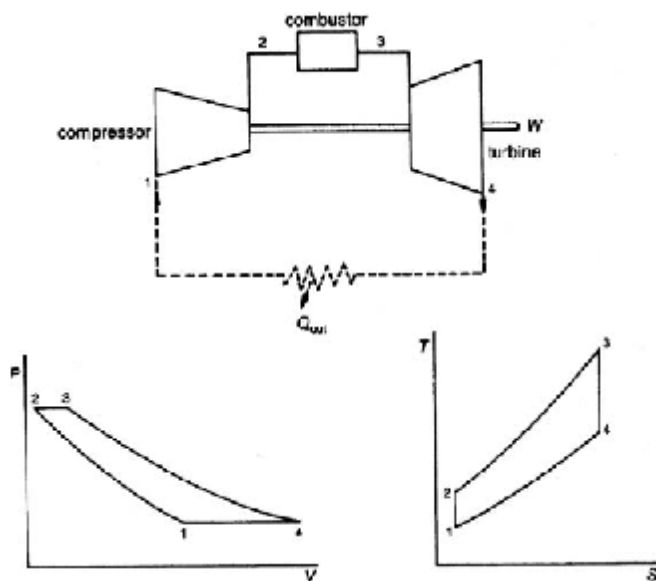
$$W_{cyc} = W_t - W_c \quad (2-3)$$

Θερμότητα που προστίθεται στο σύστημα:

$$Q_{2,3} = \dot{m}_f \times LHV_{fuel} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) (h_3) - \dot{m}_a h_2 \quad (2-4)$$

Οπότε, ο ολικός κύκλος απόδοσης είναι:

$$n_{cyc} = W_{cyc} / Q_{2,3} \quad (2-5)$$



Εικόνα 2-1 : Πρότυπος κύκλος (Brayton) αέρα.

Αυξάνοντας την αναλογία πίεσης και τη θερμοκρασία αεριοστρόβιλου, αυξάνεται η απόδοση του κύκλου Brayton. Αυτή η σχέση της συνολικής απόδοσης του κύκλου βασίζεται σε ορισμένες απλουστευμένες παραδοχές όπως είναι: (1) $\dot{m}_a \gg \dot{m}_f$, (2) το αέριο είναι θερμοδυναμικά και θερμοχημικά τέλειο, το οποίο σημαίνει ότι η ειδική θερμότητα σε σταθερή πίεση (C_p) και η ειδική θερμότητα σε σταθερό όγκο (C_v) είναι σταθερές, έτσι η ειδική αναλογία θερμότητας (γ) παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια του κύκλου, (3) η αναλογία πίεσης (r_p) τόσο στον συμπιεστή όσο και στον στρόβιλο είναι ίδια και (4) όλα τα εξαρτήματα λειτουργούν σε απόδοση 100%. Με αυτές τις υποθέσεις η επίδραση στην απόδοση του ιδανικού κύκλου σαν μια συνάρτηση της αναλογίας πίεσης του ιδανικού κύκλου Brayton που λειτουργεί μεταξύ της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της θερμοκρασίας ανάφλεξης, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$n_{ideal} = \left(1 - \frac{1}{r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right) \quad (2-6)$$

όπου r_p = αναλογία πίεσης και γ = αναλογία των ειδικών θερμοτήτων. Η παραπάνω εξίσωση τείνει σε πολύ υψηλούς αριθμούς, καθώς η αναλογία πίεσης αυξάνεται.

Υποθέτοντας ότι η αναλογία πίεσης είναι η ίδια τόσο στο συμπιεστή όσο και στον στρόβιλο, έχουμε τις ακόλουθες σχέσεις χρησιμοποιώντας την αναλογία πίεσης στον συμπιεστή:

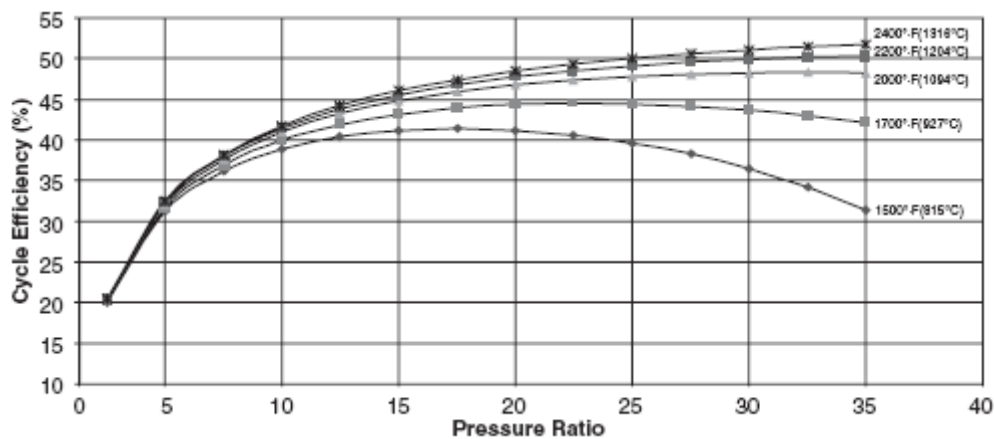
$$n_{ideal} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (2-7)$$

και χρησιμοποιώντας την αναλογία πίεσης στο στρόβιλο:

$$n_{ideal} = 1 - \frac{T_4}{T_3} \quad (2-8)$$

Στην περίπτωση του πραγματικού κύκλου η επίδραση του συμπιεστή στροβίλου (n_c) και του διαστολέα (n_t), οι αποδόσεις πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για να ληφθεί η συνολική απόδοση του κύκλου μεταξύ της θερμοκρασίας ανάφλεξης T_f και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_{amb} του στροβίλου. Η σχέση αυτή δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$n_{cycle} = \left(\frac{\pi_t T_f \frac{T_{amb}^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)}}{r_p^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)}}}{T_f - T_{amb} - T_{amb} \left(\frac{T_{amb}^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)}}{r_p^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)}} - 1 \right)} \right) \left(1 - \frac{1}{r_p^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)}} \right) \quad (2-9)$$



Εικόνα 2-2 : Απόδοση του ολικού κύκλου ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ανάφλεξης και της αναλογίας πίεσης, με απόδοση συμπιεστή 87% και απόδοση στροβίλου 92%.

Η Εικόνα 2-2 δείχνει την επίδραση στην απόδοση του ολικού κύκλου από την αυξανόμενη αναλογία πίεσης και την θερμοκρασία ανάφλεξης. Η αύξηση στην αναλογία πίεσης οδηγεί σε αύξηση της συνολικής απόδοσης σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία ανάφλεξης. Ωστόσο, αυξάνοντας την αναλογία πίεσης πάνω από μια συγκεκριμένη τιμή σε οποιαδήποτε δοσμένη θερμοκρασία ανάφλεξης, μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της συνολικής απόδοσης του κύκλου. Πρέπει επίσης να σημειώσουμε πως οι πολύ υψηλές αναλογίες πίεσης τείνουν να μειώνουν το εύρος λειτουργίας του συμπιεστή του αεριοστροβίλου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο συμπιεστής στροβίλου να μην είναι πολύ ανεκτικός στη συσσώρευση ακαθαρσιών στην είσοδο του φίλτρου αέρα και στα πτερύγια του συμπιεστή και δημιουργεί μεγάλες πτώσεις στην απόδοση και στις επιδόσεις του κύκλου. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να οδηγήσει σε απότομη αύξηση του συμπιεστή, η οποία με τη σειρά της μπορεί να οδηγήσει σε σβέση ή ακόμα και σε σοβαρή βλάβη των πτερυγίων του συμπιεστή και των ακτινικών και εδράνων (ρουλεμάν) ώθησης του αεριοστροβίλου.

Για να ληφθεί μια πιο ακριβής σχέση μεταξύ της συνολικής θερμικής απόδοσης και των θερμοκρασιών εισόδου στροβίλου, οι ολικές αναλογίες πίεσης και το έργο εξόδου, λαμβάνουμε υπόψη τις ακόλουθες σχέσεις. Για μέγιστη ολική θερμική απόδοση κύκλου, η ακόλουθη εξίσωση δίνει τη βέλτιστη αναλογία πίεσης για σταθερές θερμοκρασίες εισόδου και απόδοσης σε συμπιεστή και στροβίλο:

$$(r_p)_{opt} = \frac{\left\{ \frac{1}{(T_1 T_3 n_c - T_1 T_2 + T_1^2) [T_1 T_3 n_c - \sqrt{(T_1 T_3 n_c)^2 - (T_1 T_3 n_c - T_1 T_2 + T_1^2)(T_3^2 n_c n_c - T_1 T_3 n_c n_c + T_1 T_3 n_c)}}] \right\}^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}}{\sqrt{(T_1 T_3 n_c)^2 - (T_1 T_3 n_c - T_1 T_2 + T_1^2)(T_3^2 n_c n_c - T_1 T_3 n_c n_c + T_1 T_3 n_c)}} \quad (2-10)$$

Η παραπάνω εξίσωση, για την περίπτωση μη απωλειών σε συμπιεστή και στρόβιλο ($n_c = n_f = 1$), γράφεται τώρα ως εξής:

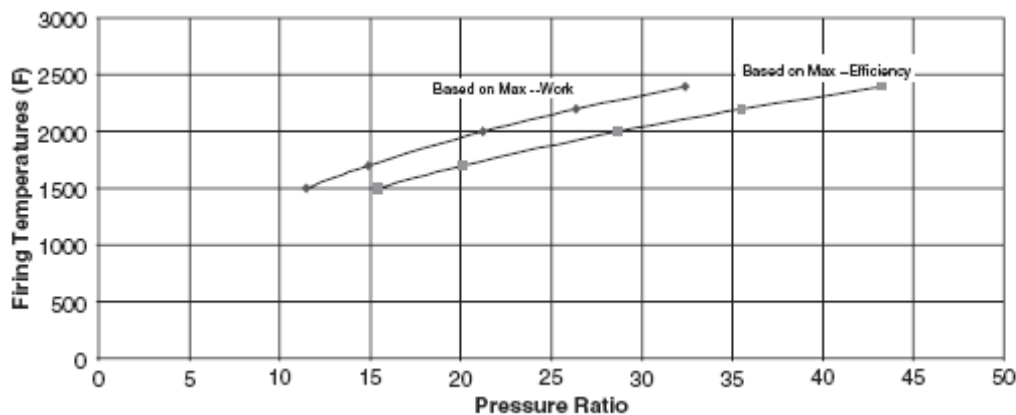
$$(r_p)_{opt} = \left(\frac{T_1 T_3}{T_2^2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2-11)$$

Η βέλτιστη αναλογία πίεσης για μέγιστο έργο εξόδου ενός στρόβιλου, λαμβάνοντας υπόψη τις αποδόσεις του συμπιεστή και του τμήματος διαστολέα του στρόβιλου, μπορεί να δοθεί από την ακόλουθη σχέση:

$$(r_p)_{wopt} = \left[\left(\frac{T_3 n_c n_c}{2 T_1} \right) + \frac{1}{2} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2-12)$$

Η Εικόνα 2-3 μας δείχνει τη βέλτιστη αναλογία πίεσης για μέγιστη απόδοση ή έργο ανά lb (kg) αέρα. Η βέλτιστη αναλογία πίεσης βάσει του έργου, λαμβάνει χώρα σε χαμηλότερη αναλογία πίεσης απ' ό,τι το σημείο της μέγιστης απόδοσης στην ίδια θερμοκρασία ανάφλεξης.

Έτσι μια βιαστική επιθεώρηση της απόδοσης δείχνει ότι η συνολική απόδοση ενός κύκλου μπορεί να βελτιωθεί με την αύξηση του λόγου πίεσης ή με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του στρόβιλου και το έργο ανά lb (kg) αέρα μπορεί να αυξηθεί αυξάνοντας είτε την αναλογία πίεσης, είτε τη θερμοκρασία εισόδου του στρόβιλου ή μειώνοντας τη θερμοκρασία εισόδου.



Εικόνα 2-3: Αναλογία πίεσης με βάση τη μέγιστη απόδοση ή το έργο σε διάφορες θερμοκρασίες ανάφλεξης.

2.1.1. Επίδραση αναγέννησης.

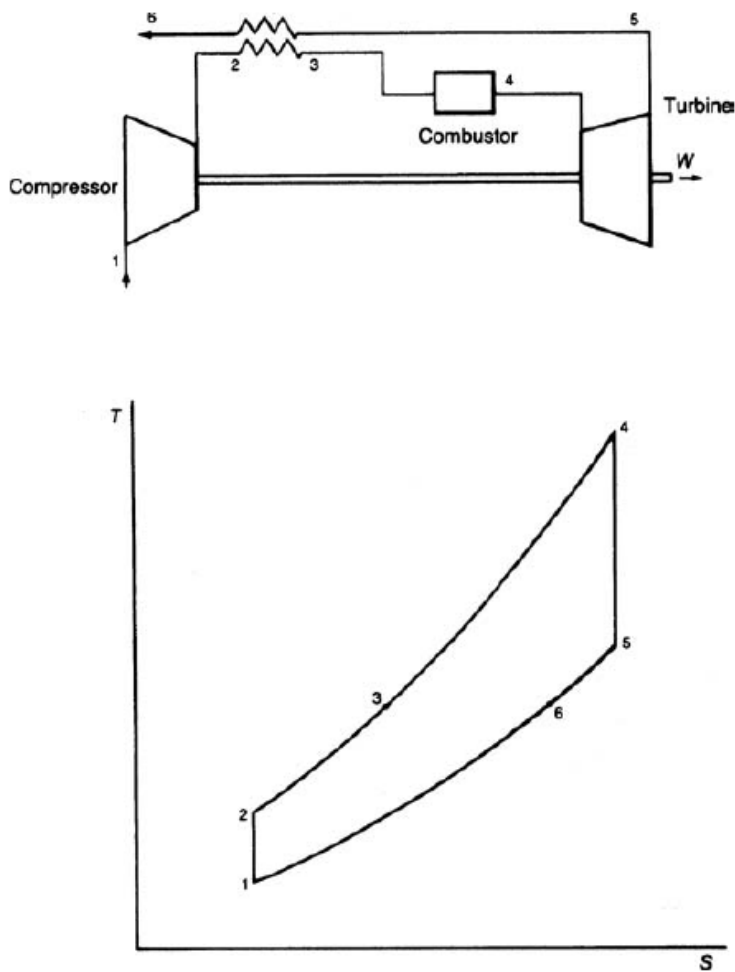
Σε ένα απλό κύκλο αεριοστρόβιλου η θερμοκρασία εξόδου του στρόβιλου είναι, σχεδόν πάντα, αισθητά υψηλότερη από τη θερμοκρασία του αέρα που εξέρχεται από τον συμπιεστή. Προφανώς, η απαίτηση καυσίμου μπορεί να μειωθεί με τη χρήση ενός αναγεννητή όπου το

θερμό καυσαέριο του στροβίλου προθερμαίνει τον αέρα μεταξύ του συμπιεστή και του θαλάμου καύσης. Η Εικόνα 2-4, δείχνει ένα σχηματικό διάγραμμα του αναγεννητικού κύκλου και τις επιδόσεις του στο T-S διάγραμμα. Σε μια ιδανική περίπτωση η ροή διαμέσου του αναγεννητή είναι υπό σταθερή πίεση. Η απόδοση του αναγεννητή δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$n_{reg} = \frac{T_3 - T_2}{T_5 - T_2} \quad (2-13)$$

Οπότε, η συνολική απόδοση για το σύστημα αυτού του κύκλου μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$n_{RCYC} = \frac{(T_4 - T_2) - (T_2 - T_1)}{(T_4 - T_1)} \quad (2-14)$$



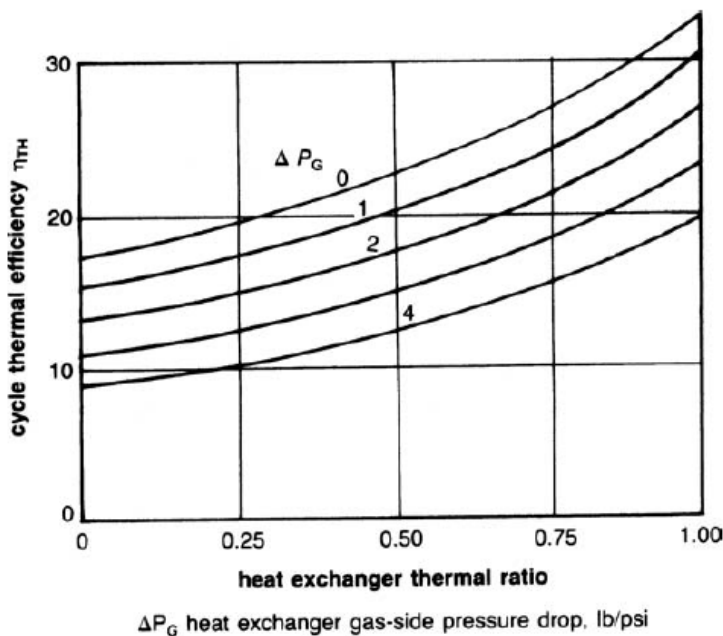
Εικόνα 2-4 : Ο αναγεννητικός κύκλος αεριοστροβίλου.

Η αύξηση της απόδοσης ενός αναγεννητή, απαιτεί περισσότερη επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας, που αυξάνει το κόστος, την πτώση πίεσης και τις απαιτήσεις χώρου της μονάδας.

Η Εικόνα 2-5 δείχνει τη βελτίωση της απόδοσης του κύκλου λόγω της ανάκτησης θερμότητας σε σχέση με ένα απλό αεριοστροβίλο ανοικτού κύκλου, με αναλογία πίεσης

4.33:1 και θερμοκρασία εισόδου της τάξης των 1200°F. Η απόδοση του κύκλου μειώνεται με αύξηση της πτώσης πίεσης στον αναγεννητή.

Υπάρχουν δύο τύποι εναλλακτών θερμότητας. Ο αναγεννητικός και ο ανακτητικός. Ο όρος "αναγεννητικός εναλλάκτης θερμότητας" χρησιμοποιείται για ένα σύστημα στο οποίο η μεταφορά θερμότητας μεταξύ δύο ρευμάτων επηρεάζεται από την έκθεση ενός τρίτου μέσου εναλλάξ στις δύο ροές. Η θερμότητα κατευθύνεται διαδοχικά εντός και εκτός του τρίτου μέσου το οποίο υποβάλλεται σε κυκλική θερμοκρασία. Αυτοί οι τύποι εναλλακτών θερμότητας χρησιμοποιούνται ευρέως όπου η πυκνότητα είναι απαραίτητη. Οι αναγεννητές αυτοκινητοβιομηχανίας αποτελούνται από ένα μεγάλο κυκλικό δοχείο με κυψελοειδείς κεραμικές διόδους. Το δοχείο περιστρέφεται σε πολύ χαμηλές στροφές (10-15 rpm). Η επιφάνεια του δοχείου είναι χωρισμένη σε δύο ίσα μέρη από σφράγιση αέρα. Ο θερμός αέρας θα περάσει μέσα από το ένα μέρος του κυκλικού δοχείου θερμαίνοντας τις κυψελοειδείς διόδους που θα συναντήσει, ύστερα ο ψυχρός αέρας θα περάσει μέσω των ίδιων διόδων καθώς το δοχείο περιστρέφεται και με αυτόν τον τρόπο θα θερμανθεί.



Εικόνα 2-5 : Μεταβολή στον κύκλο απόδοσης του αεριοστροβίλου με εναλλάκτη θερμότητας.

Σε έναν ανακτητικό εναλλάκτη θερμότητας, κάθε στοιχείο της επιφάνειας της θερμομεταφοράς έχει μία σταθερή θερμοκρασία και με την διευθέτηση των διόδων αερίου σε αντίθετη ροή, η κατανομή θερμοκρασίας στον πίνακα στη διεύθυνση της ροής, είναι αυτή που δίνει βέλτιστη απόδοση για τις δεδομένες συνθήκες μεταφοράς θερμότητας. Αυτή η βέλτιστη κατανομή θερμοκρασίας μπορεί να επιτευχθεί σε ιδανική περίπτωση σε αναγεννητή αντίθετης ροής και να προσεγγιστεί πολύ στενά σε μια εγκάρσια ροή αναγεννητή.

Ο πίνακας που επιτρέπει τη μέγιστη ροή ανά μονάδα επιφάνειας, θα αποδώσει στο μικρότερο αναγεννητή για μία δεδομένη απόδοση, θερμική και πτώσης πίεσης. Ένα υλικό με υψηλή θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα όγκου προτιμάται, δεδομένου ότι αυτή η ιδιότητα του υλικού θα αυξήσει το χρόνο μεταγωγής και τείνει να μειώσει την υπολογιστική μεταφορά απωλειών. Μια άλλη επιθυμητή ιδιότητα της διευθέτησης είναι η χαμηλή θερμική

αγωγιμότητα στην κατεύθυνση της ροής του αερίου. Όλες οι διαρροές εντός του αναγεννητή θα πρέπει να αποφεύγονται. Μια διαρροή της τάξης του 3% μειώνει την αποτελεσματικότητα του αναγεννητή έως 80%.

2.1.2. Αύξηση το έργου εξόδου του απλού κύκλου αεριοστροβίλου.

Ο τρόπος για να ενισχυθεί το έργο εξόδου ενός αεριοστροβίλου, επιτυγχάνεται με παρεμβαλλόμενη ψύξη και αναθέρμανση.

Επιδράσεις ενδιάμεσης ψύξης και αναθέρμανσης. Το καθαρό έργο ενός κύκλου αεριοστροβίλου δίνεται από τη σχέση:

$$W_{cyc} = W_t - W_c \quad (2-15)$$

και μπορεί να αυξηθεί είτε μειώνοντας το έργο του συμπιεστή ή αυξάνοντας το έργο του στροβίλου. Αυτοί είναι οι σκοποί της ενδιάμεσης ψύξης και αναθέρμανσης, αντίστοιχα.

Τα πολλαπλά στάδια των συμπιεστών μερικές φορές χρησιμοποιούνται για να επιτρέψουν την ψύξη μεταξύ των σταδίων, για να μειωθεί το συνολικό έργο εισόδου. Η Εικόνα 2-6 δείχνει μια πολυτροπική διαδικασία συμπίεσης 1-α για το διάγραμμα $P-V$. Αν εκεί δεν υπάρχει αλλαγή στην κινητική ενέργεια, το έργο που παράγεται αντιστοιχεί στην περιοχή 1- $a-j-k-1$. Μια σταθερή γραμμή θερμοκρασίας φαίνεται ως 1- x . Αν η πολυτροπική συμπίεση από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2 διαιρεθεί σε δύο μέρη, 1- c και $d-e$ με σταθερή ψύξη υπό πίεση $T_d = T_1$ μεταξύ τους, το έργο που παράγεται αντιστοιχεί στην περιοχή 1- $c-d-e-l-k-1$. Η περιοχή $c-a-e-d-c$ αντιπροσωπεύει το έργο που αποθηκεύεται μέσω της συμπίεσης δύο σταδίων, με ενδιάμεση ψύξη στην αρχική θερμοκρασία. Η βέλτιστη πίεση για ενδιάμεση ψύξη, για καθορισμένες τιμές P_1 και P_2 είναι:

$$P_{OPT} = \sqrt{P_1 P_2} \quad (2-16)$$

Συνεπώς, αν ένας απλός κύκλος αεριοστροβίλου είναι τροποποιημένος, με τη συμπίεση να επιτυγχάνεται σε δύο ή περισσότερες αδιαβατικές διαδικασίες με ενδιάμεση ψύξη μεταξύ τους, το καθαρό έργο του κύκλου αυξάνεται χωρίς καμία μεταβολή στο έργο του στροβίλου.

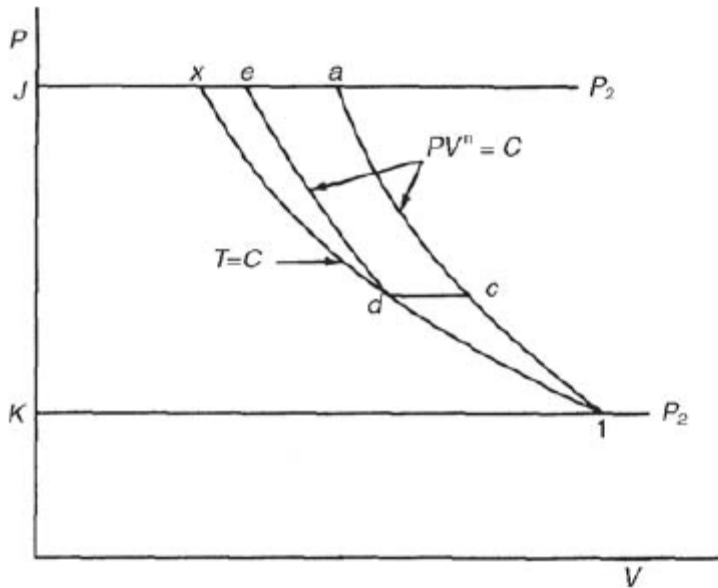
Η θερμική απόδοση ενός ιδανικού απλού κύκλου μειώνεται με την προσθήκη ενός ψύκτη. Η Εικόνα 2-7 μας δείχνει έναν τέτοιο κύκλο. Ο ιδανικός απλός κύκλος αεριοστροβίλου είναι 1-2-3-4-1 και ο κύκλος με την ενδιάμεση ψύξη που προστίθεται είναι 1- $a-b-c-2-3-4-1$. Και οι δύο κύκλοι στην ιδανική λειτουργία τους είναι αναστρέψιμοι και μπορούν να προσομοιωθούν από έναν αριθμό κύκλων Carnot. Έτσι, αν ο απλός κύκλος αεριοστροβίλου 1-2-3-4-1 είναι διαιρεμένος σε έναν αριθμό κύκλων, όπως $m-n-o-p-m$, αυτοί οι μικροί κύκλοι προσεγγίζουν τον κύκλο Carnot, όσο ο αριθμός τους αυξάνει. Η απόδοση ενός τέτοιου κύκλου Carnot δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$n_{CARNOT} = 1 - \frac{T_m}{T_p} \quad (2-17)$$

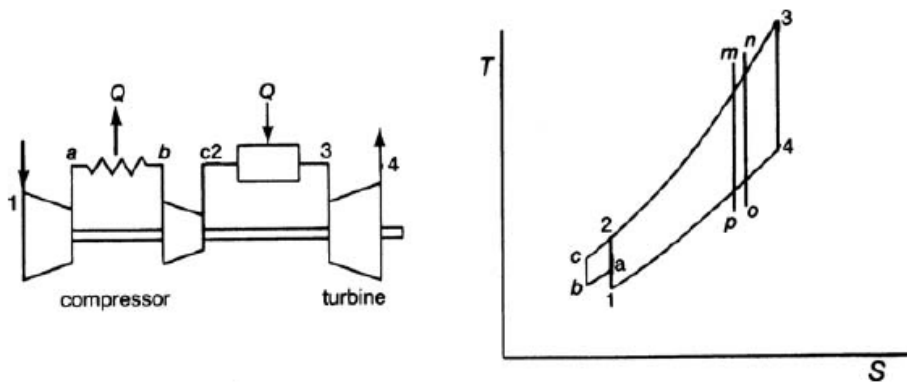
Να τονιστεί πως εάν οι συγκεκριμένες θερμοότητες είναι σταθερές, τότε έχουμε την σχέση:

$$\frac{T_m - T_m}{T_m - T_p} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (2-18)$$

Όλοι οι κύκλοι Carnot που συνθέτουν τον απλό κύκλο αεριοστροβίλου έχουν την ίδια απόδοση. Επίσης, όλοι οι κύκλοι Carnot εντός των οποίων ο κύκλος $a-b-c-2-a$ θα μπορούσε παρομοίως να διαιρείται, έχουν μια κοινή τιμή απόδοσης, χαμηλότερη από τους κύκλους Carnot που περιλαμβάνουν τον κύκλο $1-2-3-4-1$. Έτσι η προσθήκη ενός ψύκτη, που προσθέτει το $a-b-c-2-a$ στον απλό κύκλο, μειώνει την απόδοση του κύκλου.



Εικόνα 2-6 : Συμπίεση πολλαπλών σταδίων με ενδιάμεση ψύξη.

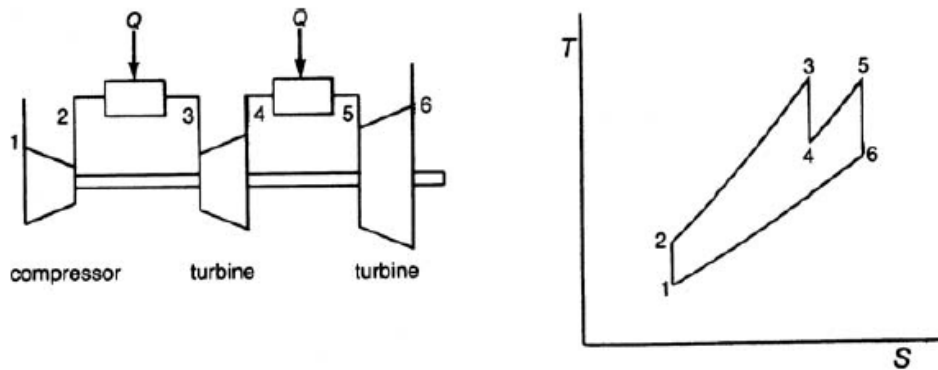


Εικόνα 2-7 : Κύκλος αεριοστροβίλου με ενδιάμεση ψύξη.

Η προσθήκη ενός ψύκτη σε έναν κύκλο αναγεννητικού αεριοστροβίλου αυξάνει την θερμική απόδοση του κύκλου και το έργο εξόδου, επειδή ένα μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας που απαιτείται για τη διαδικασία $c-3$ στην Εικόνα 2-7 μπορεί να ληφθεί από το θερμό καυσαέριο του στροβίλου που διέρχεται μέσω του αναγεννητή αντί από καύση επιπλέον καυσίμου.

Ο κύκλος με αναθέρμανση αυξάνει το έργο του στροβίλου και κατά συνέπεια το καθαρό έργο του κύκλου μπορεί να αυξηθεί χωρίς να μεταβληθεί το έργο του συμπιεστή ή της

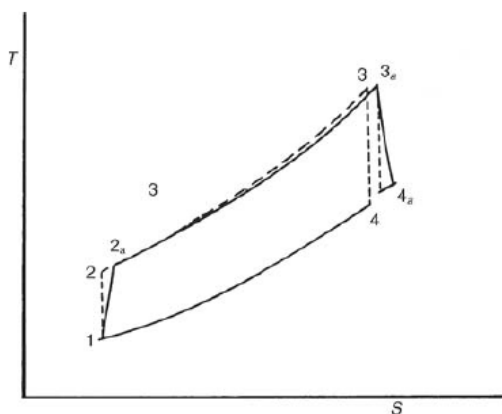
θερμοκρασίας εισόδου του στροβίλου διαιρώντας την διαστολή του στροβίλου σε δύο ή περισσότερα μέρη με σταθερή θέρμανση υπό πίεση πριν από κάθε διαστολή. Αυτή η τροποποίηση του κύκλου είναι γνωστή ως αναθέρμανση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-8. Με παρόμοια συλλογιστική με εκείνη που χρησιμοποιείται σε σχέση με την ενδιάμεση ψύξη, μπορεί να φανεί ότι η θερμική απόδοση ενός απλού κύκλου μειώνεται με την προσθήκη της αναθέρμανσης, ενώ το παραγόμενο έργο αυξάνεται. Όμως ένας συνδυασμός αναγεννητή και αναθερμαντήρα μπορεί να αυξήσει την θερμική απόδοση.



Εικόνα 2-8 : Κύκλος με αναθέρμανση και το διάγραμμα T-S.

2.2. Ανάλυση πραγματικού κύκλου.

Η προηγούμενη ενότητα ασχολήθηκε με τις έννοιες των διαφόρων κύκλων. Το έργο εξόδου και η απόδοση όλων των πραγματικών κύκλων είναι σημαντικά μικρότερα από εκείνα των αντιστοίχων ιδανικών κύκλων, λόγω της επίδρασης των αποδόσεων του συμπιεστή, καυστήρα και στροβίλου καθώς και των απωλειών πίεσης στο σύστημα.



Εικόνα 2-9 : Διάγραμμα T-S του πραγματικού ανοικτού απλού κύκλου.

2.2.1. Ο απλός κύκλος.

Ο απλός κύκλος είναι ο πιο κοινός τύπος κύκλου που χρησιμοποιείται σήμερα σε αεριοστροβίλους στον τομέα του. Ο πραγματικός ανοικτός απλός κύκλος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-9 δείχνει την αναποτελεσματικότητα του συμπιεστή και του στροβίλου και την απώλεια πίεσης μέσω του καυστήρα. Θεωρώντας ότι η απόδοση του συμπιεστή είναι n_c και η απόδοση του αεριοστροβίλου n_l , τότε το πραγματικό έργο του συμπιεστή και του στροβίλου δίνονται από τις σχέσεις:

$$W_{ca} = \dot{m}_a (h_2 - h_1) / n_c \quad (2-19)$$

$$W_{la} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) (h_{3a} - h_4) n_l \quad (2-20)$$

Έτσι το ολικό πραγματικό έργο εξόδου είναι:

$$W_{act} = W_{la} - W_{ca} \quad (2-21)$$

Το πραγματικό καύσιμο που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας από το 2a στο 3a είναι:

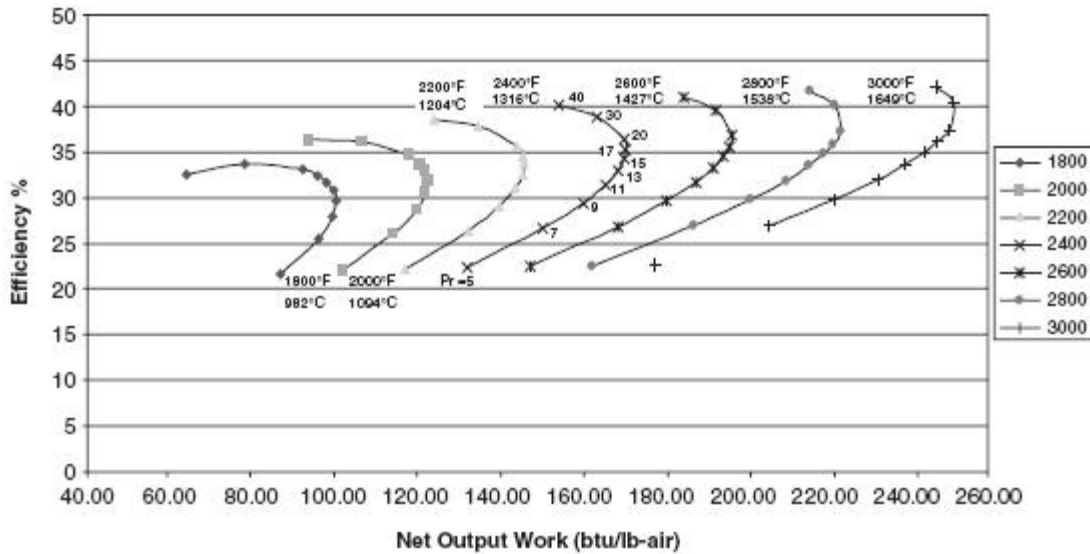
$$\dot{m}_f = \frac{h_{3a} - h_{2a}}{(\text{LHV})_{\text{P}}} \quad (2-22)$$

Έτσι η συνολική αδιαβατική θερμική απόδοση του κύκλου μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$n_c = \frac{W_{act}}{f(\text{LHV})} \quad (2-23)$$

Η ανάλυση αυτού του κύκλου μας υποδεικνύει ότι μια αύξηση στην θερμοκρασία εισόδου στο στροβίλο προκαλεί μια αύξηση στην απόδοση του κύκλου. Η βέλτιστη αναλογία πίεσης για μέγιστη απόδοση ποικίλλει, ανάλογα με την θερμοκρασία εισόδου στροβίλου, από μια βέλτιστη της τάξης του 15,5:1 σε θερμοκρασία 1500°F (816°C), σε περίπου 43:1 και θερμοκρασία κοντά στους 2400°F (1316°C). Η αναλογία πίεσης για μέγιστο έργο διαφέρει όμως, από 11,5:1 έως 35:1 για τις ίδιες αντίστοιχες θερμοκρασίες.

Έτσι από την Εικόνα 2-10, είναι προφανές ότι για μέγιστη απόδοση, μια αναλογία πίεσης της τάξης 30:1 σε θερμοκρασία των 2800°F (1537°C) είναι η βέλτιστη. Η χρήση ενός συμπιεστή αξονικής ροής απαιτεί 16-24 στάδια, με μία αναλογία πίεσης 1,15 - 1,25:1 ανά στάδιο. Ένας συμπιεστής με 22 στάδια που παράγει αναλογία πίεσης 30:1, είναι μια σχετικά συντηρητική σχεδίαση. Αν η αναλογία πίεσης αυξηθεί σε 1,252:1 ανά στάδιο, ο αριθμός των σταδίων θα είναι περίπου 16. Η τελευταία αναλογία πίεσης έχει επιτευχθεί με υψηλές αποδόσεις. Αυτή η μείωση του αριθμού των σταδίων σημαίνει μεγάλη μείωση στο συνολικό κόστος. Οι αυξήσεις θερμοκρασίας του στροβίλου, δίνουν μεγάλη αύξηση της απόδοσης και της ισχύος, ώστε οι θερμοκρασίες στην κλίμακα των 2400°F (1316°C) στην είσοδο του στροβίλου, να καθίστανται τελευταία λέξη της τεχνολογίας.



Εικόνα 2-10 : Χάρτης απόδοσης του απλού κύκλου αεριοστροβίλου.

2.2.2. Απλός κύκλος με χωρισμένο άξονα.

Ο απλός κύκλος με χωρισμένο άξονα, χρησιμοποιείται κυρίως για υψηλή ροπή και μεγάλη παραλλαγή φορτίου. Η Εικόνα 2-11, δείχνει έναν απλό κύκλο δύο αξόνων. Ο πρώτος στρόβιλος κινεί τον συμπιεστή και ο δεύτερος χρησιμοποιείται ως πηγή τροφοδοσίας. Εάν κάποιος υποθέσει ότι ο αριθμός των σταδίων σε έναν απλό κύκλο με χωρισμένο άξονα είναι μεγαλύτερος απ' ότι σε έναν απλό κύκλο άξονα, τότε η απόδοση του τελευταίου κύκλου είναι ελαφρώς υψηλότερη στα φορτία σχεδιασμού λόγω του παράγοντα της αναθέρμανσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-12. Ωστόσο, εάν ο αριθμός των σταδίων είναι ο ίδιος, τότε δεν υπάρχει καμία αλλαγή στη συνολική απόδοση. Από το διάγραμμα H-S μπορεί κανείς να βρει κάποιες σχέσεις μεταξύ των στροβίλων. Δεδομένου ότι σκοπός του στροβίλου μεγάλης πίεσεως είναι να οδηγήσει το συμπιεστή, οι εξισώσεις που χρησιμοποιούμε είναι:

$$h_{4a} = h_3 - W_{ca} \quad (2-24)$$

$$h_4 = h_3 - (W_{ca}/n_t) \quad (2-25)$$

Οπότε, το έργο εξόδου μπορεί να δοθεί από τη σχέση:

$$W_a = (\dot{m}_a + \dot{m}_f)(h_{4a} - h_5)n_t \quad (2-26)$$

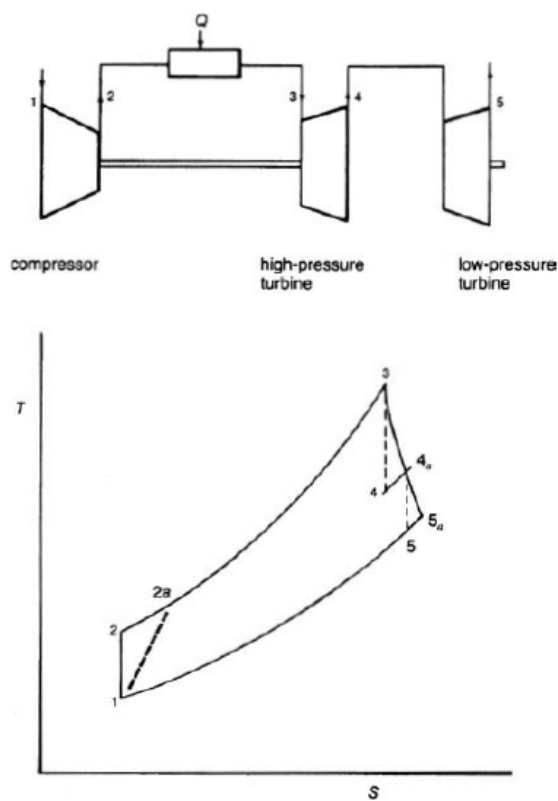
Στον κύκλο με χωρισμένο άξονα, ο πρώτος άξονας υποστηρίζει τον συμπιεστή και τον στρόβιλο που τον κινεί, ενώ ο δεύτερος άξονας υποστηρίζει τον ελεύθερο στρόβιλο που κινεί το φορτίο. Οι δύο άξονες μπορούν να λειτουργούν σε εντελώς διαφορετικές ταχύτητες. Το πλεονέκτημα του αεριοστροβίλου με χωρισμένο άξονα είναι η υψηλή ροπή του σε χαμηλή ταχύτητα. Ένας στρόβιλος ελεύθερης ισχύος δίνει μια πολύ υψηλή ροπή σε χαμηλές στροφές. Πολύ υψηλή ροπή στις χαμηλές στροφές, είναι κατάλληλη για χρήση στην αυτοκινητοβιομηχανία, αλλά με συνεχή λειτουργία πλήρους ισχύος δεν έχει μεγάλη αξία. Η χρήση του συνήθως περιορίζεται σε μεταβλητές μηχανικές εφαρμογές κίνησης.

2.2.3. Ο αναγεννητικός κύκλος.

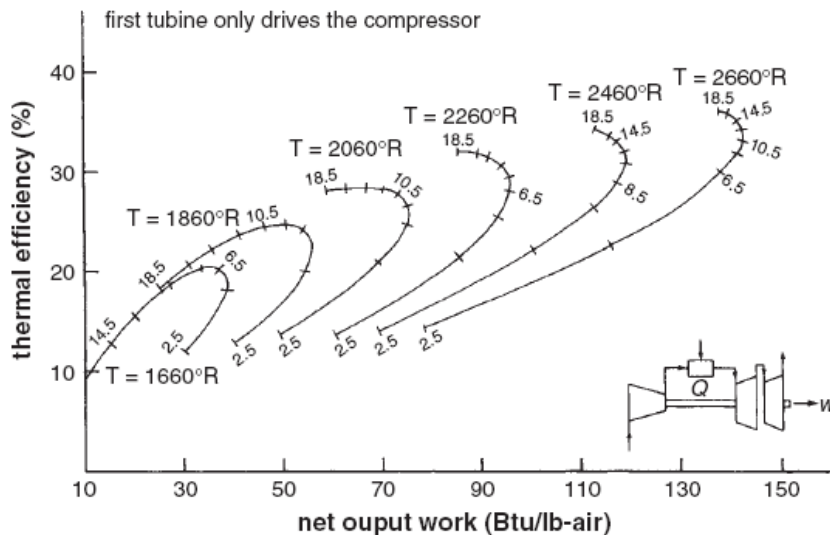
Ο αναγεννητικός κύκλος έχει εξέχουσα θέση στην τωρινή εποχή των μικρών αποθεμάτων καυσίμων και του υψηλού κόστους αυτών. Η ποσότητα του καυσίμου που απαιτείται μπορεί να μειωθεί με τη χρήση ενός αναγεννητή, όπου το θερμό καυσαέριο του στροβίλου χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του αέρα μεταξύ του συμπιεστή και του θαλάμου καύσης. Από την Εικόνα 2-4 και τον ορισμό του αναγεννητή, η θερμοκρασία στην έξοδο του αναγεννητή δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$T_3 = T_{2a} + n_{reg}(T_5 - T_{2a}) \quad (2-27)$$

όπου T_{2a} είναι η πραγματική θερμοκρασία στην έξοδο του συμπιεστή. Ο αναγεννητής αυξάνει τη θερμοκρασία του αέρα που εισέρχεται στον καυστήρα, μειώνοντας έτσι την αναλογία καυσίμου-αέρα και αυξάνοντας την θερμική απόδοση.



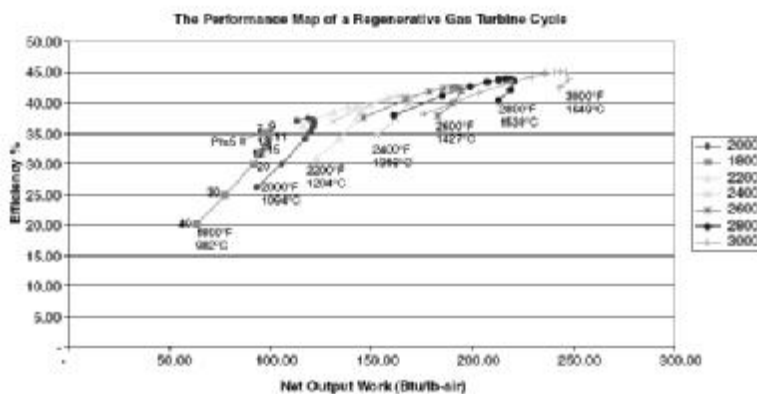
Εικόνα 2-11 : Κύκλος αεροστροβίλου με χωρισμένο άξονα.



Εικόνα 2-12: Χάρτης απόδοσης που παρουσιάζει την επίδραση της αναλογίας πίεσης και της θερμοκρασίας εισόδου του στροβίλου σε κύκλο με χωρισμένο άξονα.

Για ένα αναγεννητή που υποτίθεται ότι έχει μια απόδοση της τάξης του 80%, η απόδοση του αναγεννητικού κύκλου είναι περίπου 40% υψηλότερη απ' ότι ο αντίστοιχος στον απλό κύκλο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-13. Το έργο εξόδου ανά λίβρα αέρα είναι περίπου το ίδιο ή ελαφρώς λιγότερο από αυτό που δοκιμάστηκε με τον απλό κύκλο. Το σημείο της μέγιστης απόδοσης στον αναγεννητικό κύκλο εμφανίζεται σε χαμηλότερη αναλογία πίεσης απ' ότι σε εκείνο του απλού κύκλου, αλλά η βέλτιστη αναλογία πίεσης για το μέγιστο έργο είναι η ίδια και στους δύο κύκλους. Έτσι, όταν οι εταιρείες σχεδιάζουν αεριοστροβίλους, η επιλογή της αναλογίας πίεσης πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μπορεί να ληφθεί το μέγιστο δυνατό όφελος από τους δύο κύκλους, από τη στιγμή που οι περισσότερες προσφέρουν επιλογή αναγεννητικού κύκλου. Δεν είναι σωστό να πούμε ότι ένας αναγεννητής χωρίς βέλτιστη αναλογία πίεσης δεν θα είναι αποδοτικός, αλλά μια ορθή ανάλυση θα πρέπει να γίνει πριν πραγματοποιηθεί κάποια μεγάλη δαπάνη.

Ο αναγεννητικός στροβίλος με χωρισμένο άξονα είναι παρόμοιος με τον κύκλο με χωρισμένο άξονα. Το πλεονέκτημα αυτού του στροβίλου είναι το ίδιο με εκείνο που αναφέρθηκε πριν, δηλαδή υψηλή ροπή σε χαμηλές στροφές (rpm). Οι αποδόσεις του κύκλου είναι επίσης περίπου οι ίδιες. Η Εικόνα 2-14 δείχνει την απόδοση που μπορούμε να αναμένουμε από ένα τέτοιο κύκλο.



Εικόνα 2-13 : Χάρτης απόδοσης αναγεννητικού κύκλου αεριοστροβίλου.

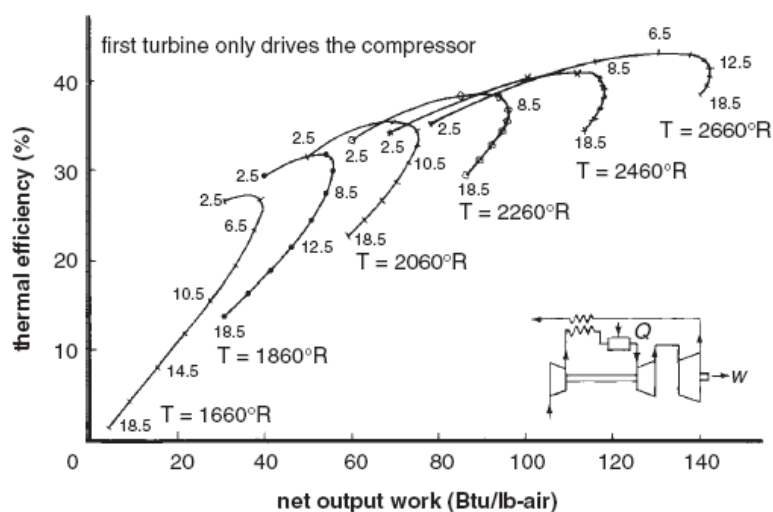
2.2.4. Απλός κύκλος με ενδιάμεση ψύξη.

Ένας απλός κύκλος με εναλλάκτη θερμότητας (intercooler) μπορεί να μειώσει το συνολικό έργο του συμπιεστή και να βελτιώσει το καθαρό έργο εξόδου. Η Εικόνα 2-7 δείχνει τον απλό κύκλο με ενδιάμεση ψύξη των συμπιεστών. Οι παραδοχές που έγιναν για την αξιολόγηση αυτού του κύκλου είναι οι εξής: (1) η ενδιάμεση θερμοκρασία του συμπιεστή ισούται με τη θερμοκρασία εισόδου, (2) οι αποδόσεις του συμπιεστή είναι οι ίδιες και (3) οι αναλογίες πίεσης και στους δύο συμπιεστές είναι ίδιες και ίσες με: $\sqrt{(P_2/P_1)}$.

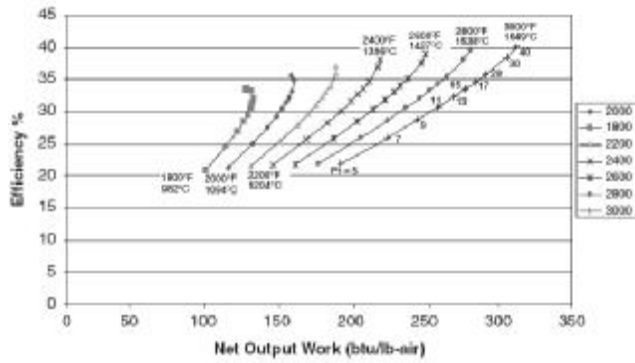
Ο απλός κύκλος με ενδιάμεση ψύξη μειώνει την καταναλισκόμενη ισχύ του συμπιεστή. Μια μείωση στην καταναλισκόμενη ισχύ επιτυγχάνεται με την ψύξη της θερμοκρασίας εισόδου στο δεύτερο ή στα επόμενα στάδια του συμπιεστή το ίδιο όπως τον αέρα περιβάλλοντος και διατηρώντας την ίδια συνολική αναλογία πίεσης. Το έργο του συμπιεστή τότε μπορεί να δοθεί από την ακόλουθη σχέση:

$$W_c = (h_a - h_1) + (h_c - h_1) \quad (2-28)$$

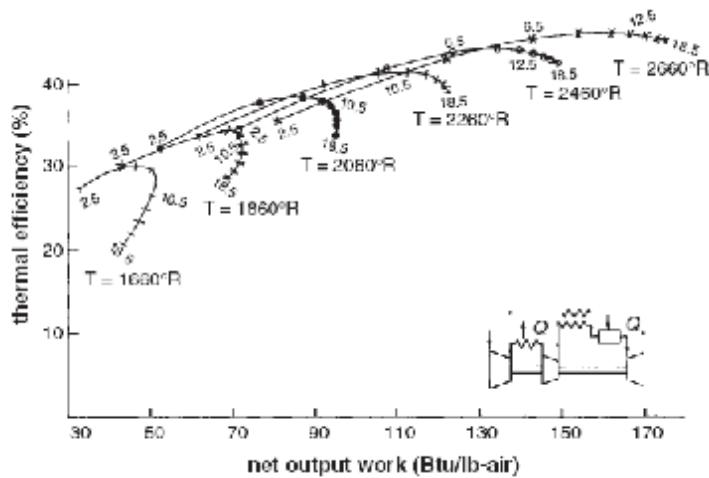
Αυτός ο κύκλος παράγει μία αύξηση της τάξης του 30% στο έργο εξόδου, αλλά η συνολική απόδοση μειώνεται ελαφρά όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-15. Ένας αναγεννητικός κύκλος με ενδιάμεση ψύξη μπορεί να αυξήσει το έργο εξόδου και τη θερμική απόδοση. Αυτός ο συνδυασμός παρέχει αύξηση στην απόδοση της τάξης περίπου 12 % και αύξηση στο έργο εξόδου της τάξης περίπου 30%, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-16. Ωστόσο, μέγιστη απόδοση συναντάται σε χαμηλότερες αναλογίες πίεσης σε σύγκριση με τους απλούς κύκλους ή τους κύκλους αναθέρμανσης.



Εικόνα 2-14 : Χάρτης απόδοσης που παρουσιάζει την επίδραση της αναλογίας πίεσης και της θερμοκρασίας εισόδου του στροβίλου σε κύκλο με χωρισμένο άξονα.



Εικόνα 2-15 : Χάρτης απόδοσης κύκλου αεριοστροβίλου με ενδιάμεση ψύξη.



Εικόνα 2-16 : Χάρτης απόδοσης που παρουσιάζει την επίδραση της αναλογίας πίεσης και της θερμοκρασίας εισόδου του στροβίλου σε αναγεννητικό κύκλο με ενδιάμεση ψύξη.

2.2.5. Κύκλος με αναθέρμανση.

Οι αναγεννητικοί κύκλοι βελτιώνουν την απόδοση του κύκλου με χωρισμένο άξονα, αλλά δεν παρέχουν κανένα πρόσθετο έργο ανά όγκο λίβρα ροής αέρα. Για την επίτευξη του τελευταίου στόχου, η ιδέα του κύκλου με αναθέρμανση πρέπει να αξιοποιηθεί. Ο κύκλος με αναθέρμανση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-8, αποτελείται από ένα στρόβιλο δύο σταδίων με ένα θάλαμο καύσεως πριν από κάθε στάδιο. Οι παραδοχές που γίνονται είναι πως η μόνη δουλειά του στροβίλου υψηλής πίεσης είναι να οδηγεί τον συμπιεστή και ότι το αέριο που εγκαταλείπει αυτόν το στρόβιλο κατόπιν επαναθερμαίνεται στην ίδια θερμοκρασία, όπως στον πρώτο καυστήρα προτού εισέλθει στον στρόβιλο χαμηλής πίεσης ή ισχύος. Ο κύκλος με αναθέρμανση έχει μια απόδοση η οποία είναι μικρότερη από εκείνη που συναντάται σε έναν απλό κύκλο, αλλά παράγει περίπου 35% περισσότερη αξονική ισχύ εξόδου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-17.

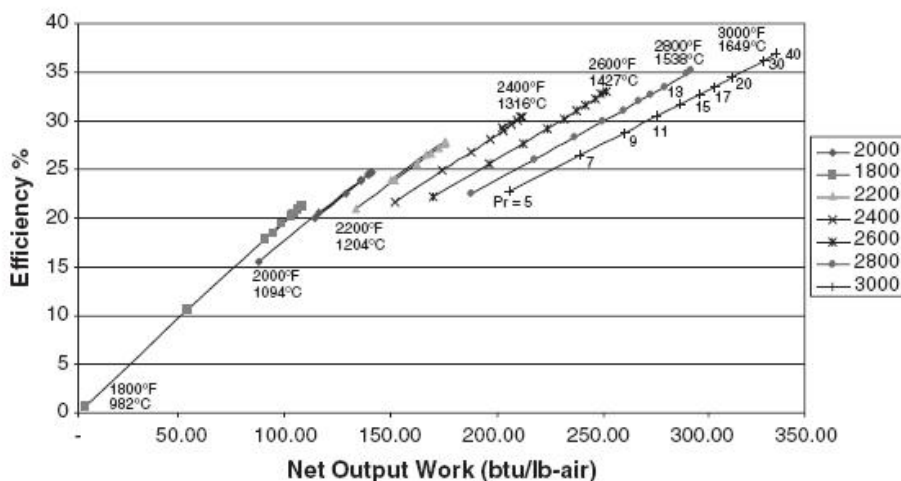
2.2.6. Αναγεννητικός κύκλος αεροστροβίλου με ενδιάμεση ψύξη και αναθέρμανση.

Ο κύκλος Carnot είναι ο βέλτιστος κύκλος και όλοι οι κύκλοι έχουν κλίση προς αυτό το βέλτιστο. Η μέγιστη θερμική απόδοση επιτυγχάνεται μέσω προσέγγισης της ισόθερμης συμπίεσης και διαστολής του κύκλου Carnot ή με ενδιάμεση ψύξη στη συμπίεση και αναθέρμανση στη διαδικασία διαστολής. Η Εικόνα 2-18 δείχνει τον αναγεννητικό κύκλο με ενδιάμεση ψύξη και αναθέρμανση, ο οποίος προσεγγίζει τον βέλτιστο κύκλο με έναν πρακτικό τρόπο.

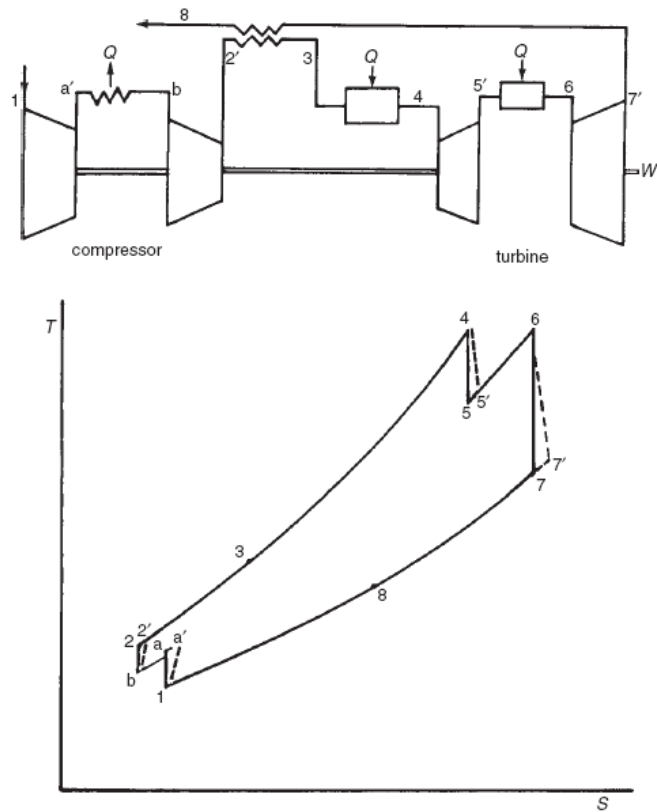
Αυτός ο κύκλος επιτυγχάνει μέγιστη απόδοση και έργο εξόδου από όλους τους κύκλους που περιγράφονται τώρα. Με την εισαγωγή ενός εναλλάκτη θερμότητας στο συμπιεστή, η αναλογία πίεσης για μέγιστη αποδοτικότητα κινείται προς μια πολύ μεγαλύτερη αναλογία, όπως δείχνει η Εικόνα 2-19.

2.2.7. Κύκλος έγχυσης ατμού.

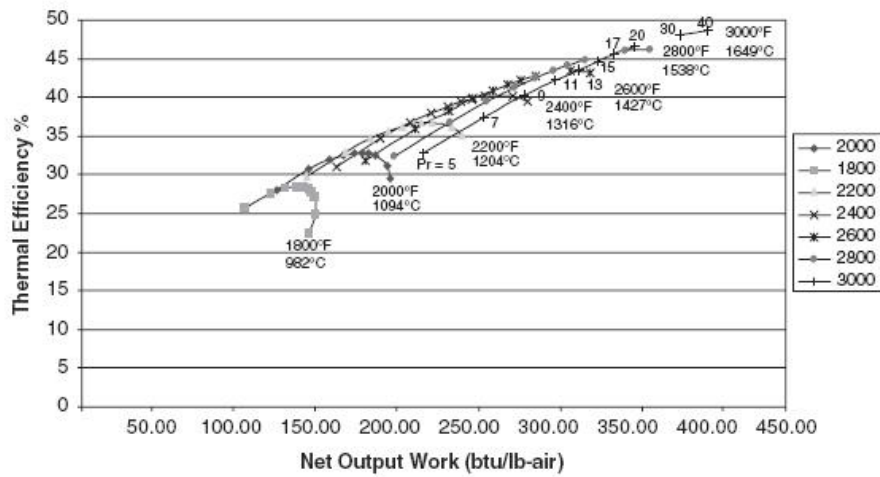
Η έγχυση ατμού έχει χρησιμοποιηθεί σε παλινδρομικούς κινητήρες και αεροστροβίλους για μερικά χρόνια. Αυτός ο κύκλος μπορεί να είναι μια απάντηση στην παρούσα ανησυχία περί ρύπανσης και μεγαλύτερης αποδοτικότητας. Προβλήματα διάβρωσης είναι το σημαντικότερο εμπόδιο σε ένα τέτοιο σύστημα. Η ιδέα είναι απλή: νερό εγχέεται στον αέρα εξαγωγής του συμπιεστή και αυξάνει τον ρυθμό ροής μάζας μέσω του στροβίλου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-20. Ο ατμός που εγχύθηκε με την ίδια φορά από τον συμπιεστή δεν αυξάνει το έργο που απαιτείται για την κίνηση του συμπιεστή.



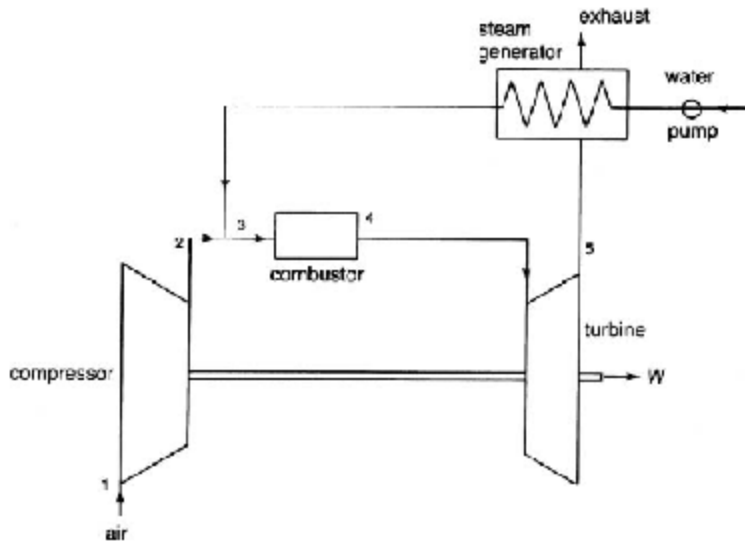
Εικόνα 2-17 : Χάρτης απόδοσης κύκλου αεροστροβίλου με αναθέρμανση.



Εικόνα 2-18 : Ο αναγεννητικός κύκλος με ενδιάμεση ψύξη, αναθέρμανση και χωρισμένο άξονα αεροστροβίλου.



Εικόνα 2-19 : Χάρτης απόδοσης αναγεννητικού κύκλου με ενδιάμεση ψύξη και αναθέρμανση.



Εικόνα 2-20 : Κύκλος έγχυσης ατμού.

Ο ατμός που χρησιμοποιείται σε αυτή τη διαδικασία παράγεται από την εξάτμιση του αεριοστροβίλου. Θεωρητικά, νερό σε 1 Bar και 80°F εισέρχεται στην αντλία και τον αναγεννητή, όπου φθάνει έως 4 Bar παραπάνω από την εκφόρτιση του συμπιεστή και την ίδια θερμοκρασία με τον εκτονωμένο αέρα του συμπιεστή. Ο ατμός εγχέεται μετά τον συμπιεστή, αλλά προς την αντίθετη φορά από τον καυστήρα για να δημιουργηθεί ένα σωστό μίγμα το οποίο συμβάλλει στη μείωση της θερμοκρασίας πρωτογενούς ζώνης στον καυστήρα και των NO_x εξόδου. Η ενθαλπία της κατάστασης 3 (h_3), είναι η ενθαλπία του αέρα και του ατμού. Οι ακόλουθες σχέσεις περιγράφουν τη ροή σε αυτό το σημείο:

$$h_3 = (\dot{m}_a h_{2a} + \dot{m}_s h_{3a}) / (\dot{m}_a + \dot{m}_s) \quad (2-29)$$

Η ενθαλπία που εισέρχεται στο στρόβιλο δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$h_4 = ((\dot{m}_a + \dot{m}_f) h_{4a} + \dot{m}_s h_{4s}) / (\dot{m}_a + \dot{m}_f + \dot{m}_s) \quad (2-30)$$

με την ποσότητα καυσίμου που απαιτείται να προστεθεί σε αυτόν τον κύκλο να είναι:

$$\dot{m}_f = \frac{h_4 - h_3}{\eta_p (LHV)} \quad (2-31)$$

Η ενθαλπία εξερχόμενη από τον στρόβιλο είναι:

$$h_5 = ((\dot{m}_a + \dot{m}_f) h_{5a} + \dot{m}_s h_{5s}) / (\dot{m}_a + \dot{m}_f + \dot{m}_s) \quad (2-32)$$

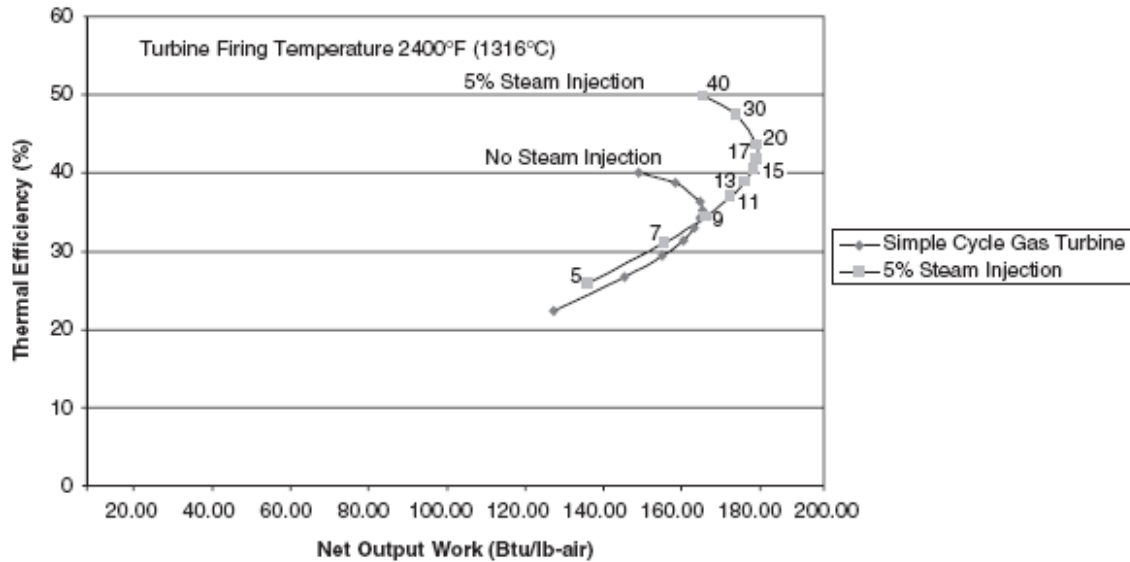
Οπότε το συνολικό έργο από τον στρόβιλο δίνεται από τη σχέση:

$$W_i = (\dot{m}_a + \dot{m}_f + \dot{m}_s) (h_4 - h_5) \eta_t \quad (2-33)$$

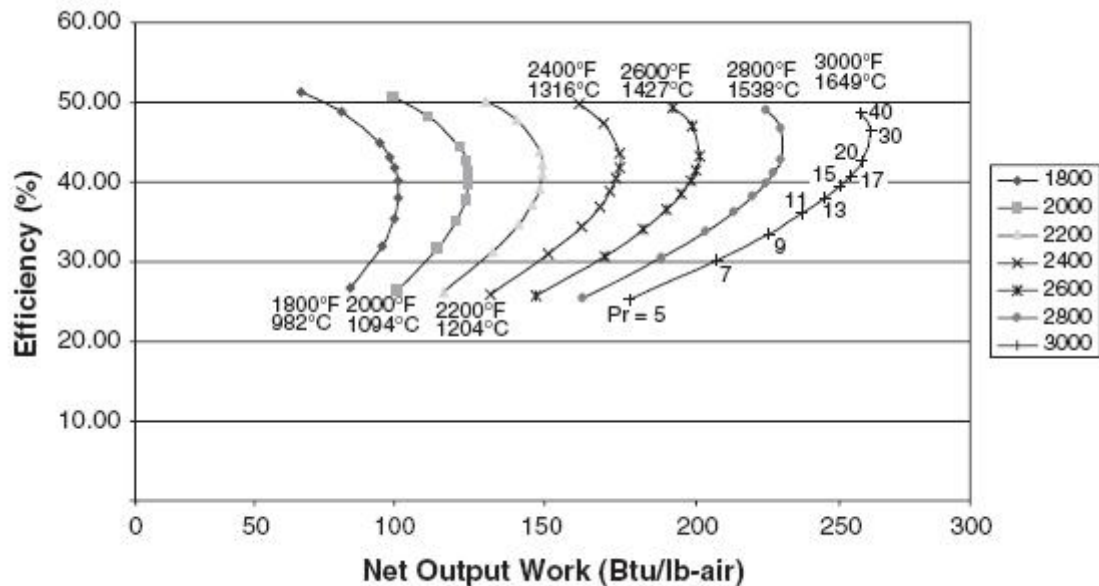
Η συνολική απόδοση του κύκλου είναι:

$$n_{cyc} = \frac{W_t - W_c}{F(LHV)} \quad (2-34)$$

Ο κύκλος οδηγεί σε αύξηση του έργου εξόδου και στη συνολική θερμική απόδοση.



Εικόνα 2-21 : Σύγκριση μεταξύ 5% έγχυσης ατμού και απλού κύκλου αεριοστροβίλου.



Εικόνα 2-22 : Χάρτης απόδοσης αεριοστροβίλου με έγχυση ατμού.

Η Εικόνα 2-21 δείχνει την επίδραση του 5% κατά βάρος της έγχυσης ατμού σε θερμοκρασία εισόδου στροβίλου της τάξης των 2400°F (1316°C) στο σύστημα. Με έγχυση περίπου 5% στους 2400°F (1316°C) και αναλογία πίεσης 17:1, σημειώνεται μία αύξηση 8,3% στο έργο εξόδου με μια αύξηση της τάξης του 19% στην απόδοση του κύκλου πάνω από αυτή στον απλό κύκλο. Η υπόθεση εδώ είναι ότι ο ατμός εγχέεται σε πίεση της τάξης περίπου 4 Bar πάνω από τον αέρα από την εκτόνωση του συμπιεστή και ότι όλος ο ατμός δημιουργείται από θερμότητα της εξάτμισης του στροβίλου.

Η Εικόνα 2-22 δείχνει την επίδραση της έγχυσης ατμού της τάξης του 5% σε διαφορετικές θερμοκρασίες και πιέσεις. Έγχυση ατμού για την επαύξηση της ισχύος έχει χρησιμοποιηθεί για πολλά χρόνια και είναι μια πολύ καλή επιλογή για τη βελτίωση των μονάδων. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτού του κύκλου είναι το χαμηλό επίπεδο παραγωγής οξειδίων αζώτου. Αυτό το χαμηλό επίπεδο επιτυγχάνεται με τον ατμό που εγχέεται στο τοίχωμα του διαχύτη στην εκτόνωση του συμπιεστή, σε αντίθετη φορά από τον καυστήρα, δημιουργώντας ένα ομοιόμορφο μίγμα ατμού και αέρα σε ολόκληρη την περιοχή. Το ομοιόμορφο μίγμα μειώνει την περιεκτικότητα σε οξυγόνο του μίγματος καυσίμου-αέρα και αυξάνει την θερμοχωρητικότητα της, η οποία με τη σειρά της μειώνει την θερμοκρασία της ζώνης καύσης και το σχηματισμό NO_x. Οι δοκιμές πεδίου δείχνουν ότι η ποσότητα του ατμού που είναι ισοδύναμη με τη ροή του καυσίμου κατά βάρος θα μειώσει την ποσότητα των εκπομπών NO_x σε αποδεκτά επίπεδα. Το μεγαλύτερο πρόβλημα που συναντάται είναι η διάβρωση. Το πρόβλημα της διάβρωσης ερευνάται και έχει γίνει πρόοδος. Η ελκυστικότητα του συστήματος αυτού είναι ότι δεν χρειάζονται μεγάλες αλλαγές για να προσθέσουμε αυτό το χαρακτηριστικό σε ένα υπάρχον σύστημα. Η θέση του εγχυτήρα νερού είναι σημαντική για την καλή λειτουργία αυτού του συστήματος και του κύκλου.

2.2.8. Αναγεννητικός κύκλος με εξατμιστήρα.

Αυτός ο κύκλος όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-23 είναι ένας αναγεννητικός κύκλος με έγχυση νερού. Θεωρητικά, έχει τα πλεονεκτήματα της έγχυσης ατμού, της μείωσης εκπομπών NO_x των αναγεννητικών συστημάτων καθώς και της υψηλότερης απόδοσης. Το έργο εξόδου αυτού του συστήματος είναι περίπου το ίδιο με εκείνο που επιτυγχάνεται στον κύκλο έγχυσης ατμού, αλλά η θερμική απόδοση του συστήματος είναι πολύ υψηλότερη.

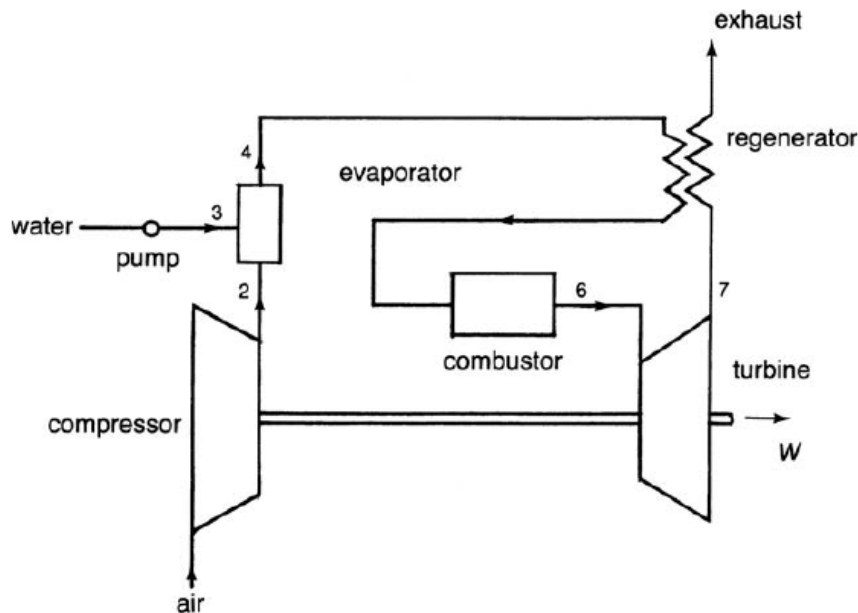
Ένας εξατμιστήρας υψηλής πίεσης τοποθετείται μεταξύ του συμπιεστή και του αναγεννητή για προσθήκη υδρατμών στον ατμό αέρα και κατά τη διαδικασία μείωση της θερμοκρασίας αυτού του ανάμικτου ατμού. Το μίγμα έπειτα εισέρχεται στον αναγεννητή σε χαμηλότερη θερμοκρασία, αυξάνοντας τη διαφορά θερμοκρασίας σε όλον τον αναγεννητή. Αυξάνοντας τη διαφορά θερμοκρασίας, μειώνεται σημαντικά η θερμοκρασία των καυσαερίων έτσι ώστε αυτά, που σε διαφορετική περίπτωση θα χάνονταν, να είναι μια έμμεση πηγή θερμότητας που χρησιμοποιείται για την εξάτμιση του νερού. Τόσο ο αέρας όσο και το εξατμισμένο νερό, διέρχονται μέσω του αναγεννητή, θαλάμου καύσεως και του στροβίλου. Το νερό εισέρχεται στους 26,7°C και 1 Bar μέσω μιας αντλίας στον εξατμιστήρα, όπου εκκενώνεται ως ατμός στην ίδια θερμοκρασία, όπως ο αέρας που εκκενώνεται στον συμπιεστή και σε πίεση της τάξης των 4 Bar παραπάνω από την εκκένωση του συμπιεστή. Αυτό κατόπιν εγχέεται στο ρεύμα αέρα σε λεπτό νέφος όπου αναμιγνύεται πλήρως. Οι εξισώσεις εδώ, είναι οι ίδιες όπως στον προηγούμενο κύκλο για το τμήμα στροβίλου, αλλά η προστιθέμενη θερμότητα μεταβάλλεται εξαιτίας του αναγεννητή. Οι ακόλουθες εξισώσεις διέπουν αυτή την αλλαγή στην προσθήκη θερμότητας. Από τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής, η θερμοκρασία του μίγματος (T_4) δίνεται από την σχέση:

$$T_4 = \frac{c_p(T_3 + \epsilon c_p(T_3 - T_2) - \epsilon h_2)}{c_p(T_3 + \epsilon c_p)} \quad (2-35)$$

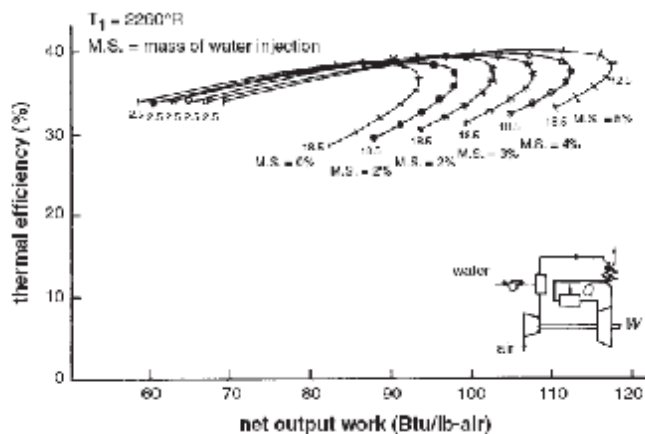
Η ενθαλπία του αέρα εξερχόμενη από τον αναγεννητή, δίνεται από την σχέση:

$$h_5 = h_4 + n_{reg}(h_7 - h_4) \quad (2-36)$$

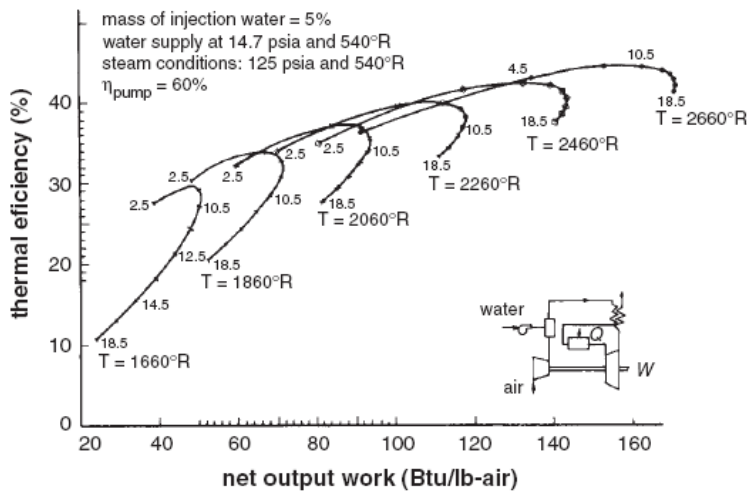
Παρόμοια με τον αναγεννητικό κύκλο, ο αναγεννητικός κύκλος με εξατμιστήρα έχει υψηλότερες αποδόσεις σε χαμηλότερες αναλογίες πίεσης. Οι Εικόνες 2-24 και 2-25 δείχνουν την απόδοση του συστήματος σε διάφορους ρυθμούς έγχυσης ατμού και θερμοκρασιών εισόδου του στροβίλου. Παρόμοια με τον κύκλο έγχυσης ατμού, ο ατμός εγχέεται σε 4 Bar υψηλότερα από τον αέρα που εξέρχεται του συμπιεστή. Η διάβρωση στον αναγεννητή είναι ένα πρόβλημα σε αυτό το σύστημα. Όταν δεν είναι τελειώς καθαροί, οι αναγεννητές τείνουν να εμφανίζουν καυτά σημεία, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε φωτιές. Το πρόβλημα αυτό, μπορεί να ξεπεραστεί με την κατάλληλη σχεδίαση του αναγεννητή. Αυτό το επίπεδο εκπομπών NO_x είναι χαμηλό και πληροί τα πρότυπα EPA.



Εικόνα 2-23 : Αναγεννητικός κύκλος με εξατμιστήρα.



Εικόνα 2-24 : Χάρτης απόδοσης που παρουσιάζει την επίδραση της αναλογίας πίεσης και τον ρυθμό ροής πίεσης σε αναγεννητικό κύκλο με εξατμιστήρα.



Εικόνα 2-25 : Χάρτης απόδοσης που παρουσιάζει την επίδραση της αναλογίας πίεσης και τον ρυθμό ροής πίεσης σε αναγεννητικό κύκλο με εξατμιστήρα, με σταθερό ρυθμό πίεσης.

2.3. Ο κύκλος Brayton - Rankine.

Ο συνδυασμός του αεροστροβίλου με τον αμοστρόβιλο είναι μια ιδιαίτερα ελκυστική πρόταση, ιδίως για ηλεκτρικές επιχειρήσεις κοινής ωφελείας και βιομηχανίες μεταποίησης όπου χρησιμοποιείται ο ατμός. Σε αυτόν τον κύκλο, όπως φαίνεται στην εικόνα 2-26, τα θερμά αέρια από την εξατμισμό του στροβίλου χρησιμοποιούνται σε λέβητα συμπληρωματικής καύσης για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού σε υψηλές θερμοκρασίες για έναν αμοστρόβιλο. Οι υπολογισμοί του αεροστροβίλου είναι οι ίδιοι όπως φαίνεται για τον απλό κύκλο. Οι υπολογισμοί για τον αμοστρόβιλο είναι:

Θερμότητα γεννήτριας ατμού:

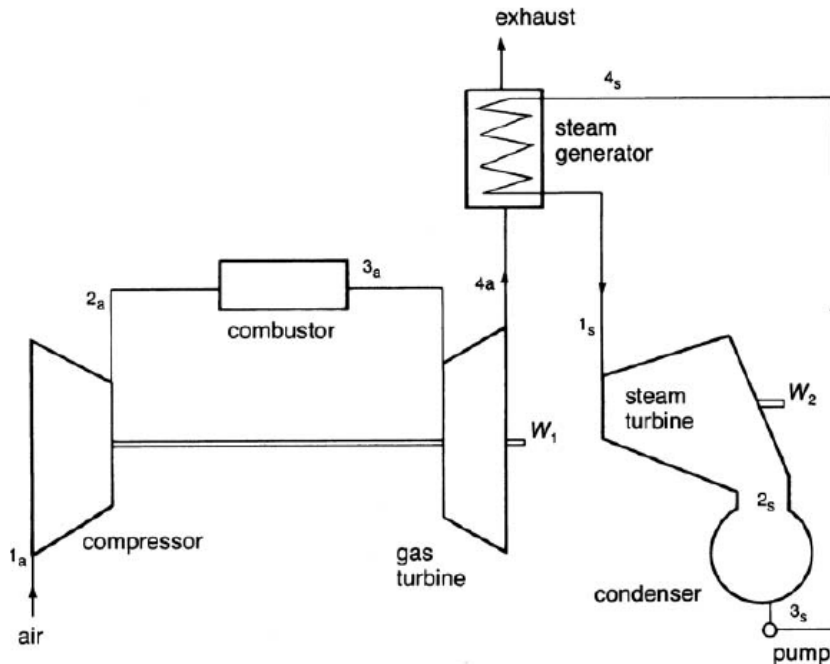
$${}_4Q_1 = h_{1s} - h_{4s} \quad (2-37)$$

Έργο στροβίλου:

$$W_{ts} = \dot{m}_s (h_{1s} - h_{2s}) \quad (2-38)$$

Έργο αντλίας:

$$W_p = \dot{m}_s (h_{4s} - H_{3s}) / \eta_p \quad (2-39)$$



Εικόνα 2-26 : Ο συνδυασμένος κύκλος Brayton-Rankine.

Το έργο του συνδυασμένου κύκλου είναι ίσο με το άθροισμα του καθαρού έργου του αεριοστροβίλου και του έργου του ατμοστροβίλου. Περίπου το 1/3 έως το ήμισυ της σχεδιασμένης παραγωγής είναι διαθέσιμη ως ενέργεια στα καυσαέρια. Το καυσαέριο από τον στρόβιλο χρησιμοποιείται για να παρέχει θερμότητα στον λέβητα ανάκτησης. Έτσι, αυτή η θερμότητα πρέπει να πιστωθεί στον συνολικό κύκλο. Οι παρακάτω εξισώσεις δείχνουν το έργο του συνολικού κύκλου και τη θερμική απόδοση:

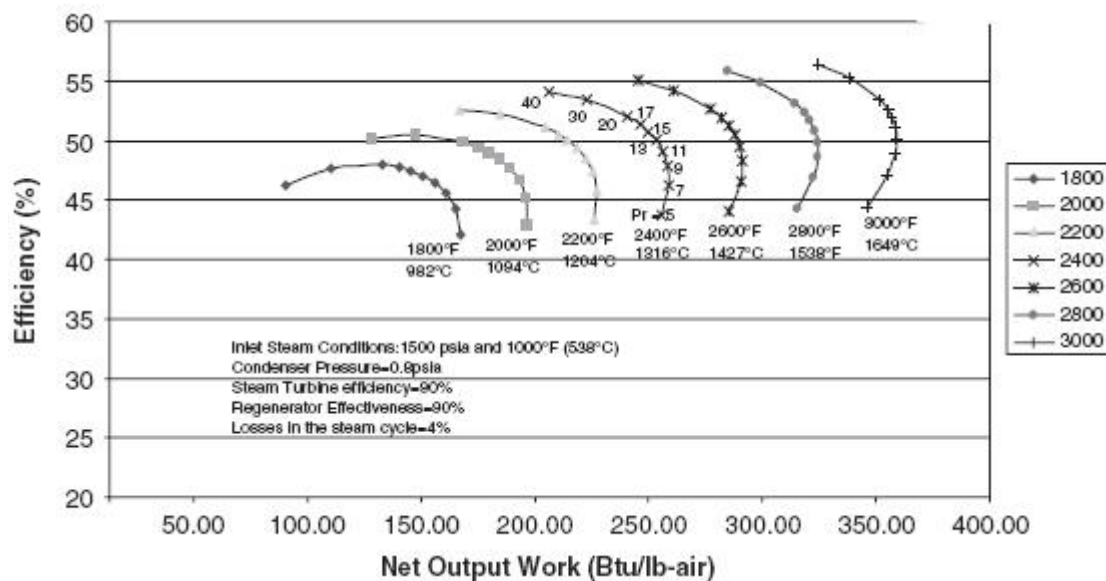
Έργο συνολικού κύκλου:

$$W_{cyc} = W_{ta} + W_{ts} - W_c - W_p \quad (2-40)$$

Απόδοση συνολικού κύκλου:

$$n = \frac{W_{cyc}}{\dot{F}(LHV)} \quad (2-41)$$

Αυτό το σύστημα, όπως μπορεί να φανεί από την Εικόνα 2-27 υποδεικνύει ότι το καθαρό έργο είναι περίπου το ίδιο όπως θα περίμενε κανείς σε ένα κύκλο έγχυσης ατμού, αλλά οι αποδόσεις είναι πολύ υψηλότερες. Το μειονέκτημα αυτού του συστήματος είναι το υψηλό αρχικό κόστος. Ωστόσο, ακριβώς όπως και στον κύκλο έγχυσης ατμού, η περιεκτικότητα των NO_x του καυσαερίου παραμένει η ίδια και εξαρτάται από τον αεριοστρόβιλο που χρησιμοποιείται. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της υψηλής απόδοσής του.

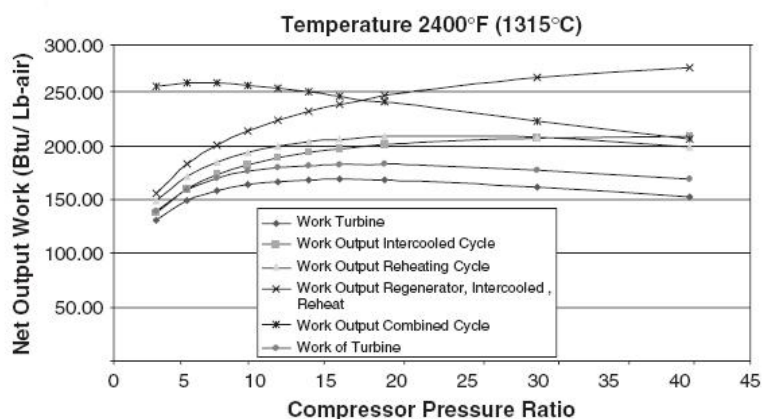


Εικόνα 2-27 : Χάρτης απόδοσης μιας τυπικής μονάδας με συνδυασμένο κύκλο.

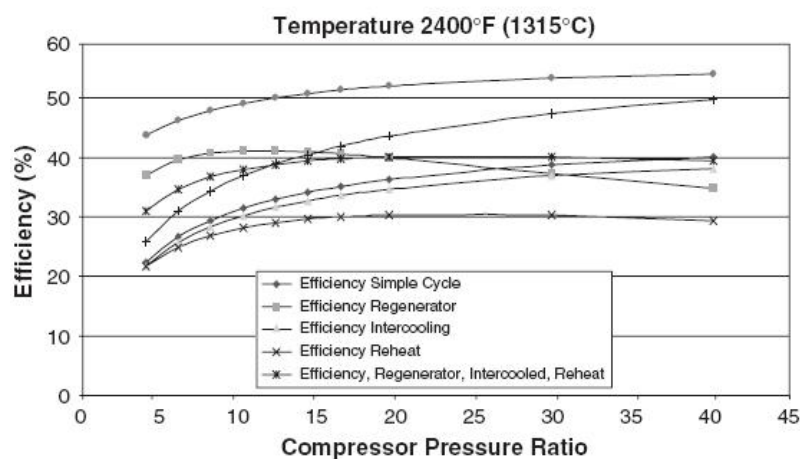
2.4. Σύνοψη της ανάλυσης των κύκλων.

Οι Εικόνες 2-28 και 2-29 μας δίνουν μια καλή σύγκριση της επίδρασης των διαφόρων κύκλων στο έργο εξόδου και τη θερμική απόδοση. Οι καμπύλες σχεδιάστηκαν για μια θερμοκρασία εισόδου στροβίλου της τάξης των 2400°F (1316°C), η οποία είναι μία θερμοκρασία που σήμερα χρησιμοποιείται από τους κατασκευαστές. Το έργο εξόδου του αναγεννητικού κύκλου είναι αρκετά παρόμοιο με το αντίστοιχο του απλού κύκλου και το έργο εξόδου του αναγεννητικού κύκλου με αναθέρμανση, είναι αρκετά παρόμοιο με εκείνη του κύκλου με αναθέρμανση. Το περισσότερο έργο ανά lb αέρα μπορεί να αναμένεται από τον αναγεννητικό κύκλο με ενδιάμεση ψύξη και αναθέρμανση.

Ο πιο αποδοτικός κύκλος είναι ο κύκλος Brayton - Rankine. Αυτός ο κύκλος έχει τεράστιες δυνατότητες σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας και τις βιομηχανίες μεταποίησης όπου ατμοστρόβιλοι χρησιμοποιούνται σε πολλούς τομείς. Το αρχικό κόστος αυτού του συστήματος είναι υψηλό. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται ατμοστρόβιλοι αυτό το αρχικό κόστος μπορεί να μειωθεί σημαντικά.



Εικόνα 2-28 : Σύγκριση καθαρού έργου εξόδου θερμοκρασίας διάφορων κύκλων.



Εικόνα 2-29 : Σύγκριση θερμικής απόδοσης θερμοκρασίας διάφορων κύκλων.

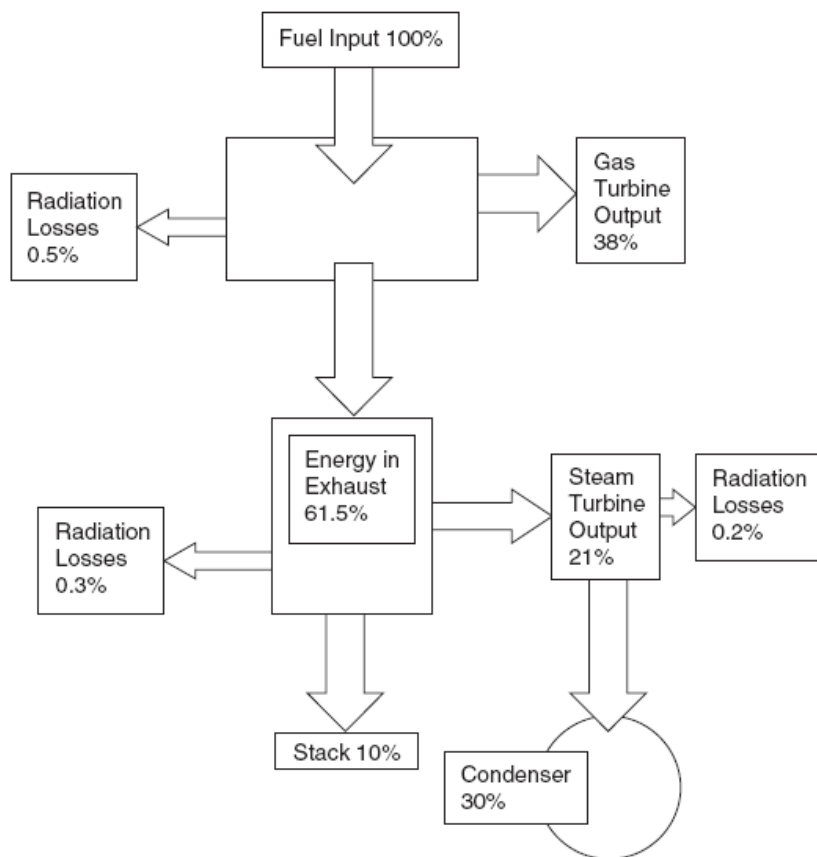
Οι αναγεννητικοί κύκλοι είναι δημοφιλείς λόγω του υψηλού κόστους του καυσίμου. Φροντίδα πρέπει να λαμβάνεται, για να μην συνδέονται αδιακρίτως οι αναγεννητές στις υπάρχουσες μονάδες. Ο αναγεννητής είναι πιο αποδοτικός σε χαμηλές αναλογίες πίεσης. Ο καθαρισμός των στροβίλων με λειαντικά μέσα μπορεί να αποδειχθεί ένα πρόβλημα στις αναγεννητικές μονάδες, δεδομένου ότι τα καθαριστικά μπορεί να μείνουν στον αναγεννητή και να προκαλέσουν θερμά σημεία.

Τα συστήματα ψεκασμού νερού ή ατμού, χρησιμοποιούνται εκτενώς για να αυξήσουν την ισχύ. Προβλήματα διάβρωσης στον διαχύτη του συμπιεστή και τον καυστήρα δεν αποτελούν σημαντικά προβλήματα. Η αύξηση στο έργο και την απόδοση με μείωση των NO_x κάνουν τη διαδικασία πολύ ελκυστική. Οι κύκλοι με χωρισμένο άξονα είναι ελκυστικοί για χρήση σε μηχανικά συστήματα μεταβλητής ταχύτητας. Τα χαρακτηριστικά εκτός σχεδίασης μιας τέτοιας μηχανής είναι η υψηλή απόδοση και η υψηλή ροπή σε χαμηλές ταχύτητες.

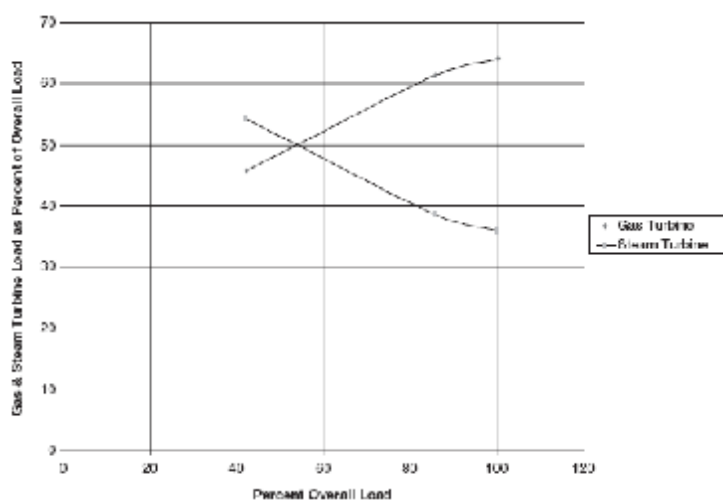
2.5. Γενική επισκόπηση των μονάδων συνδυασμένου κύκλου.

Υπάρχουν πολλές έννοιες για τον συνδυασμένο κύκλο. Αυτοί οι κύκλοι κυμαίνονται από τον μονό απλό κύκλο πίεσης, στον οποίον ο ατμός για τον στρόβιλο παράγεται μόνο σε μια πίεση, έως τους τριπλούς κύκλους πίεσης όπου ο ατμός που παράγεται για τον αμοστρόβιλο είναι σε τρία διαφορετικά επίπεδα. Το διάγραμμα ροής της ενέργειας στην Εικόνα 2-30, δείχνει την κατανομή της ενέργειας που εισέρχεται στα χρήσιμα συστατικά της και τις απώλειες ενέργειας που σχετίζονται με τον συμπυκνωτή και τις απώλειες της καπνοδόχου. Η κατανομή αυτή θα ποικίλλει μερικώς με διαφορετικούς κύκλους, καθώς οι απώλειες της καπνοδόχου μειώνονται με πιο αποδοτικές, πολυεπίπεδης πίεσης μονάδες παραγωγής ατμού με ανάκτηση θερμότητας (HRSGs). Η κατανομή στην ενέργεια που παράγεται από τα τμήματα παραγωγής ενέργειας ως συνάρτηση της συνολικής παραγόμενης ενέργειας, παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-31. Αυτό το διάγραμμα δείχνει ότι τα χαρακτηριστικά του φορτίου σε καθεμιά από τις σημαντικότερες κινητήριες δυνάμεις αλλάζει δραστικά με λειτουργία εκτός σχεδιασμού. Ο αεριοστρόβιλος σε συνθήκες σχεδιασμού προμηθεύει με 60% της συνολικής ενέργειας που κατανέμεται και ο αμοστρόβιλος παραδίδει το 40% της ενέργειας, ενώ σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού (κάτω από 50% της ενέργειας σχεδιασμού) ο αεριοστρόβιλος παραδίδει 40% της ενέργειας, ενώ ο αμοστρόβιλος παραδίδει 40% της ενέργειας.

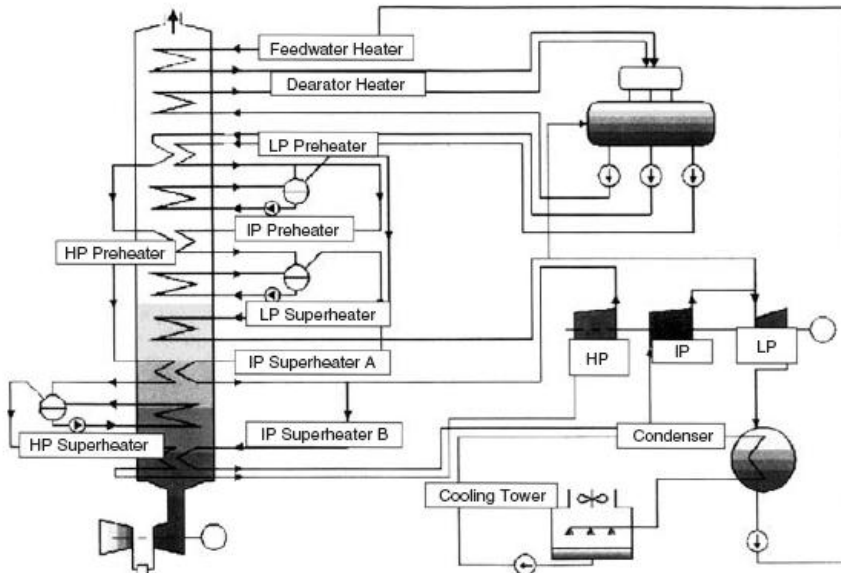
Για να κατανοήσουμε πλήρως τους διάφορους κύκλους, είναι σημαντικό να ορίσουμε ορισμένες σημαντικές παραμέτρους του συνδυασμένου κύκλου. Στις πιο πολλές εφαρμογές συνδυασμένου κύκλου ο αεριοστρόβιλος είναι ο ανώτατος κύκλος και ο αμοστρόβιλος ο κατώτατος. Οι κύριες συνιστώσες που συνθέτουν έναν συνδυασμένο κύκλο είναι ο αεριοστρόβιλος, ο αναγεννητής ατμού με ανάκτηση θερμότητας (HRSG) και ο αμοστρόβιλος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-32. Μια τυπική μονάδα συνδυασμένου κύκλου παραγωγής ενέργειας με μια μόνο πίεση HRSG. Οι θερμικές αποδόσεις των συνδυασμένων κύκλων μπορεί να φτάσουν μέχρι και το 60%. Στον τυπικό συνδυασμό ο αεριοστρόβιλος παράγει περίπου το 60% της ισχύος και ο αμοστρόβιλος περίπου το 40%. Οι θερμικές αποδόσεις των μονάδων μεμονωμένα του αεριοστροβίλου και του αμοστροβίλου είναι μεταξύ 30-40%. Ο αμοστρόβιλος χρησιμοποιεί την ενέργεια στα καυσαέρια του αεριοστροβίλου όπως στην ενέργεια εισόδου του. Η ενέργεια που μεταφέρεται στον αναγεννητή ατμού με ανάκτηση θερμότητας (HRSG) από τον αεριοστρόβιλο είναι συνήθως ισοδύναμη περίπου με την εκτιμώμενη παραγωγή του αεριοστροβίλου σε συνθήκες σχεδιασμού. Σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού, τα πτερύγια κατεύθυνσης εισόδου (IGV) χρησιμοποιούνται για να ρυθμίζουν τον αέρα κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να διατηρούν μια υψηλή θερμοκρασία στον HRSG.



Εικόνα 2-30 : Κατανομή ενέργειας σε μονάδα συνδυασμένου κύκλου.



Εικόνα 2-31 : Κοινή χρήση φορτίου μεταξύ κύριων παρόχων σε όλο το εύρος λειτουργίας της μονάδας με συνδυασμένο κύκλο.



Εικόνα 2-32 : Τυπικός μεγάλος συνδυασμένος κύκλος μονάδας HRSG.

Ο HRSG είναι όπου η ενέργεια μεταφέρεται από τον αεριοστρόβιλο στο νερό για να παραχθεί ατμός. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές διαμορφώσεις των HRSG μονάδων. Οι περισσότερες HRSG μονάδες διαιρούνται στην ίδια ποσότητα τμημάτων όπως ο ατμοστρόβιλος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-32. Στις περισσότερες περιπτώσεις, κάθε τμήμα του HRSG έχει έναν προ-θερμαντήρα ή οικονομητήρα, εξατμιστήρα και έπειτα ένα ή δύο στάδια υπερθερμαντήρων. Ο ατμός που εισέρχεται στον ατμοστρόβιλο υπερθερμαίνεται.

Το συμπύκνωμα εισερχόμενο στον HRSG, περνά μέσα από απαερωτή, όπου απομακρύνονται τα αέρια από το νερό ή τον ατμό. Αυτό είναι σημαντικό διότι η υψηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο μπορεί να προκαλέσει διάβρωση των σωληνώσεων και των εξαρτημάτων που θα έρθουν σε επαφή με το μέσο του νερού/ατμού. Συνιστάται η περιεκτικότητα σε οξυγόνο περίπου 7-10 μέρη ανά δισεκατομμύριο (ppb). Το συμπύκνωμα ψεκάζεται στην κορυφή του απαερωτή, το οποίο κανονικά είναι τοποθετημένο στην κορυφή της δεξαμενής τροφοδοσίας νερού. Η απαέρωση λαμβάνει χώρα όταν το νερό ψεκάζεται και στη συνέχεια θερμαίνεται, απελευθερώνοντας έτσι τα αέρια που απορροφούνται στο μέσο νερού / ατμού. Η απαέρωση πρέπει να γίνεται σε συνεχή βάση, επειδή ο αέρας εισάγεται στο σύστημα στις σφραγίσεις αντλιών και σωληνώσεις φλαντζών δεδομένου ότι είναι υπό κενό.

Η απαέρωση μπορεί να είναι υπό πίεση ή με υπερπίεση. Τα περισσότερα συστήματα χρησιμοποιούν απαέρωση υπό πίεση, επειδή όλη η θέρμανση του νερού τροφοδοσίας μπορεί να γίνει στη δεξαμενή νερού τροφοδοσίας και δεν υπάρχει ανάγκη για επιπλέον εναλλάκτες θερμότητας. Ο θερμός ατμός στη διαδικασία απαέρωσης υπό πίεση είναι μία κατώτερη ποιότητα ατμού, αφήνοντας έτσι τον ατμό στον κύκλο ατμού για έργο διαστολής μέσω του ατμοστρόβιλου. Αυτό αυξάνει την παραγωγή του ατμοστρόβιλου και κατά συνέπεια την απόδοση του συνδυασμένου κύκλου. Στην περίπτωση της απαέρωσης με υπερπίεση, τα αέρια

μπορούν να εκκενωθούν άμεσα στην ατμόσφαιρα, ανεξάρτητα από το σύστημα εκκένωσης του συμπυκνωτή.

Η απαέρωση επίσης λαμβάνει χώρα στον συμπυκνωτή. Η διαδικασία είναι παρόμοια με αυτή του απαερωτή. Ο ατμός εξάτμισης του στροβίλου συμπυκνώνει και συλλέγει στον συμπυκνωτή θερμότητα, ενώ τα μη-συμπυκνώσιμα θερμά αέρια εξάγονται μέσω του εξοπλισμού εκκένωσης. Ένα "μαξιλάρι" ατμού χωρίζει τον αέρα και το νερό, έτσι εκ νέου απορρόφηση του αέρα δεν μπορεί να λάβει χώρα. Η απαέρωση συμπυκνωτή μπορεί να είναι εξίσου αποδοτική με αυτή στον απαερωτή. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε μη χρησιμοποίηση ενός ξεχωριστού απαερωτή/δεξαμενής τροφοδοσίας νερού και το συμπύκνωμα να τροφοδοτείται κατευθείαν στον HRSG από τον συμπυκνωτή. Η ποσότητα του αναπληρωμένου νερού που προστίθεται στο σύστημα είναι ένας παράγοντας, δεδομένου ότι το αναπληρωμένο νερό είναι πλήρως κορεσμένο με οξυγόνο. Εάν η ποσότητα του αναπληρωμένου νερού είναι μικρότερη από το 25% της ροής καυσαερίων του ατμοστροβίλου, η απαέρωση συμπυκνωτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αλλά σε περιπτώσεις όπου υπάρχει εξαγωγή ατμού για χρήση διεργασίας και συνεπώς το αναπληρωμένο νερό είναι μεγάλο, ένας ξεχωριστός απαερωτής είναι απαραίτητος.

Ο οικονομητήρας του συστήματος χρησιμοποιείται για να θερμαίνει το νερό κοντά στο σημείο κορεσμού του. Εάν δεν έχουν σχεδιαστεί προσεκτικά, οι οικονομητήρες μπορεί να παράγουν ατμό, εμποδίζοντας έτσι τη ροή. Για να το αποτρέψουμε αυτό να συμβεί, το νερό τροφοδοσίας στο σημείο εξόδου ελαφρώς υποψύχεται. Η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας κορεσμού και της θερμοκρασίας του νερού στην έξοδο του οικονομητήρα, είναι γνωστή ως θερμοκρασία προσέγγισης. Η θερμοκρασία αυτή διατηρείται όσο το δυνατόν μικρότερη μεταξύ 10-20°F (5,5-11°C). Για να αποτρέψουμε την ατμοποίηση στον εξατμιστήρα είναι επίσης χρήσιμη η εγκατάσταση μιας βαλβίδας ελέγχου του νερού τροφοδοσίας κατά την ίδια φορά με τον οικονομητήρα, που κρατά υψηλή την πίεση και αποτρέπεται η ατμοποίηση.

Μια άλλη σημαντική παράμετρος είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμοκρασίας εξόδου του εξατμιστήρα στην πλευρά του ατμού και στην πλευρά του καυσαερίου. Αυτή η διαφορά είναι γνωστή ως σημείο σύνθλιψης. Στην ιδανική περίπτωση, όσο χαμηλότερο είναι το σημείο σύνθλιψης, τόσο περισσότερη θερμότητα ανακτάται, αλλά αυτό απαιτεί μεγαλύτερη επιφάνεια και κατά συνέπεια αυξάνει την αντίθλιψη και το κόστος. Επίσης, υπερβολικά χαμηλά σημεία σύνθλιψης μπορεί να σημαίνουν ανεπαρκή παραγωγή ατμού, αν τα καυσαέρια είναι χαμηλής ενεργειακής αξίας (χαμηλή ροή μάζας ή χαμηλή θερμοκρασία καυσαερίων). Οι γενικές κατευθυντήριες γραμμές απαιτούν ένα σημείο σύνθλιψης της τάξης των 15-40°F (8-22°C). Η τελική επιλογή προφανώς βασίζεται σε οικονομικές εκτιμήσεις.

Οι ατμοστροβίλοι στις περισσότερες από τις μεγάλες μονάδες παραγωγής ενέργειας είναι περιορισμένοι, χωρισμένοι σε δύο κύρια μέρη: το τμήμα υψηλής πίεσης (HP) και το τμήμα χαμηλής πίεσης (LP). Σε ορισμένες μονάδες, το τμήμα (HP) διαιρείται περαιτέρω σε ένα τμήμα υψηλής πίεσης και ένα ενδιάμεσο τμήμα πίεσεως (IP). Ο HRSG χωρίζεται επίσης σε τμήματα που αντιστοιχούν με την απόδοση του ατμοστροβίλου. Η απόδοση του ατμοστροβίλου LP υπαγορεύεται περαιτέρω από την αντίθλιψη του συμπυκνωτή, η οποία είναι συνάρτηση της ψύξης και της ρύπανσης. Η απόδοση του τμήματος ατμού σε πολλές από αυτές τις μονάδες ποικίλλει από 30-40%. Για να εξασφαλισθεί ότι ο ατμοστροβίλος λειτουργεί με αποδοτικό τρόπο, η θερμοκρασία καυσαερίων του αεριοστροβίλου διατηρείται πάνω από ένα ευρύ φάσμα λειτουργικών συνθηκών. Αυτό επιτρέπει στον HRSG να διατηρεί ένα υψηλό βαθμό αποτελεσματικότητας σε αυτό το ευρύ φάσμα της λειτουργίας.

Σε μια μονάδα συνδυασμένου κύκλου, οι υψηλές πιέσεις ατμού δεν μετατρέπονται απαραίτητα σε υψηλή θερμική απόδοση για μια μονάδα συνδυασμένου κύκλου παραγωγής

ενέργειας. Η επέκταση του ατμού σε υψηλότερη πίεση ατμού, προκαλεί μία αύξηση στην περιεκτικότητα υγρασίας στην έξοδο του αμοστροβίλου. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία προκαλεί σημαντική διάβρωση και φθορές στα μεταγενέστερα στάδια του στροβίλου. Ένα όριο ορίζεται σε περίπου 10% (90% ποιότητα ατμού) περιεκτικότητας σε υγρασία.

Τα πλεονεκτήματα για μια υψηλή πίεση ατμού είναι ότι η ροή μάζας του ατμού μειώνεται όπως και η παραγωγή του στροβίλου. Η χαμηλότερη ροή ατμού περιορίζει το μέγεθος του τμήματος της εξάτμισης ατμού του στροβίλου, μειώνοντας έτσι το μέγεθος των πτερυγίων στο στάδιο της εξάτμισης. Η μικρότερη ροή ατμού μειώνει επίσης το μέγεθος του συμπυκνωτή και την ποσότητα του νερού που απαιτείται για ψύξη. Επίσης μειώνει το μέγεθος της σωλήνωσης του ατμού και τις διαστάσεις των βαλβίδων. Όλα αυτά για χαμηλότερο κόστος, ειδικά για σταθμούς παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούν τους ακριβούς και υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης, αερόψυκτους συμπυκνωτές.

Η αύξηση της θερμοκρασίας του ατμού σε μια δεδομένη πίεση (ατμού), μειώνει ελαφρώς την παραγωγή ατμού του αμοστροβίλου. Αυτό συμβαίνει λόγω δύο αντιφατικών επιπτώσεων: Πρώτο, η αύξηση στην πτώση ενθαλπίας, που αυξάνει την παραγωγή και δεύτερο, η μείωση στην ροή, η οποία προκαλεί απώλεια στην παραγωγή του αμοστροβίλου. Η δεύτερη επίπτωση είναι κυρίαρχη, για κατώτερο ποσό αμοστροβίλου. Η μείωση της θερμοκρασίας του ατμού αυξάνει επίσης την περιεκτικότητα σε υγρασία.

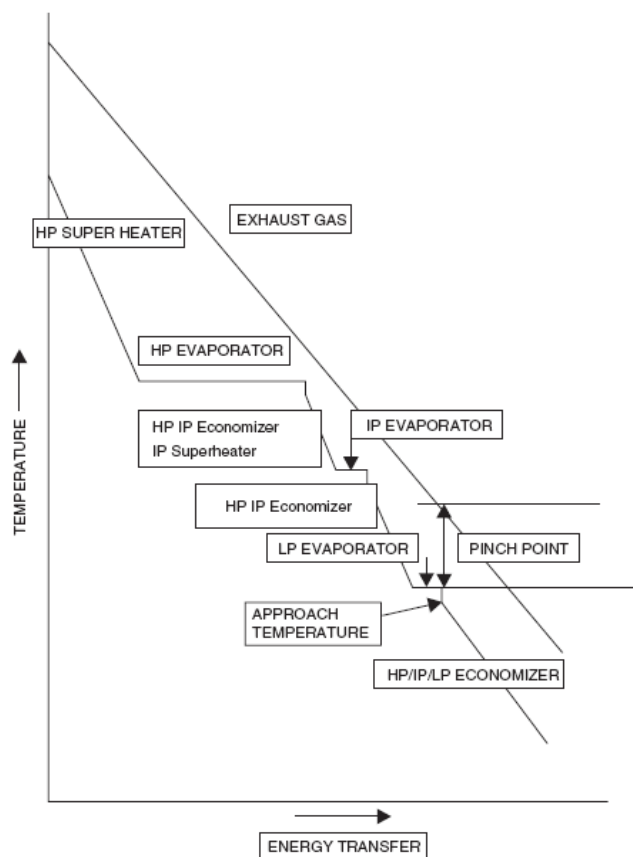
Η κατανόηση των χαρακτηριστικών του σχεδιασμού της διπλής ή τριπλής πίεσης HRSG και των αντίστοιχων τμημάτων του αμοστροβίλου (HP, IP και LP στροβίλοι) είναι σημαντική. Αύξηση της πίεσης του οποιουδήποτε τμήματος θα αυξήσει το έργο εξόδου του τμήματος για την ίδια ροή μάζας. Ωστόσο, σε υψηλότερη πίεση, η ροή μάζας του παραγόμενου ατμού μειώνεται. Αυτή η επίδραση είναι περισσότερο σημαντική για τον χαμηλής πίεσης (LP) στροβίλο. Η πίεση στον LP εξατμιστήρα δεν πρέπει να είναι κάτω από περίπου 3 Bar, επειδή η πτώση ενθαλπίας στον LP στροβίλο γίνεται πολύ μικρή και η ροή όγκου του ατμού γίνεται πολύ μεγάλη, έτσι το μέγεθος του τμήματος LP γίνεται μεγάλο, με πολύ ακριβά πτερύγια. Αύξηση της θερμοκρασίας του ατμού φέρνει ουσιαστική βελτίωση στην παραγωγή. Στον κύκλο διπλής ή τριπλής πίεσης, περισσότερη ενέργεια διατίθεται στο τμήμα LP εάν ο ατμός προς το τμήμα υψηλής πίεσης (HP) ανυψώνεται.

Υπάρχει μια πολύ μικρή αύξηση στην συνολική απόδοση του κύκλου μεταξύ ενός κύκλου διπλής πίεσης και ενός τριπλής πίεσης. Για να μεγιστοποιηθεί η απόδοσή τους, αυτοί οι κύκλοι λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες και εξάγουν την περισσότερη θερμότητα από το σύστημα δημιουργώντας έτσι σχετικώς χαμηλές θερμοκρασίες στην καμινάδα. Αυτό σημαίνει πως στις περισσότερες περιπτώσεις θα πρέπει να λειτουργούν μόνο με φυσικό αέριο ως καύσιμο, καθώς αυτό το καύσιμο περιέχει μια πολύ χαμηλή ή μηδενική περιεκτικότητα σε θείο. Οι χρήστες έχουν διαπιστώσει ότι ακόμη και από την παρουσία χαμηλών επιπέδων θείου, όπως όταν έχουμε ανάφλεξη καύσιμου ντίζελ, οι θερμοκρασίες της καμινάδας πρέπει να διατηρούνται πάνω από 300°F (150°C) για να αποφεύγεται η διάβρωση όξινων αερίων. Η αύξηση στην απόδοση μεταξύ των κύκλων διπλής και τριπλής πίεσης οφείλεται στον ατμό που παράγεται στο IP επίπεδο παρά στο επίπεδο LP. Η ροή υψηλής πίεσης (HP) είναι ελαφρώς λιγότερη σε σχέση με τον κύκλο διπλής πίεσης, επειδή ο υπερθερμαντήρας ενδιάμεσης πίεσης (IP) είναι σε υψηλότερο επίπεδο από τον αντίστοιχο της χαμηλής πίεσης (LP), αφαιρώντας με αυτόν τον τρόπο ενέργεια από το τμήμα υψηλής πίεσης (HP) του HRSG. Σε έναν κύκλο τριπλής πίεσης, το HP και το IP τμήμα πίεσης πρέπει να αυξηθούν μαζί. Η υγρασία στην εξάτμιση του τμήματος LP του αμοστροβίλου παίζει κυρίαρχο ρόλο. Η επίδραση της LP πίεσης επηρεάζει επίσης το εμβαδόν επιφανείας του HRSG, καθώς το

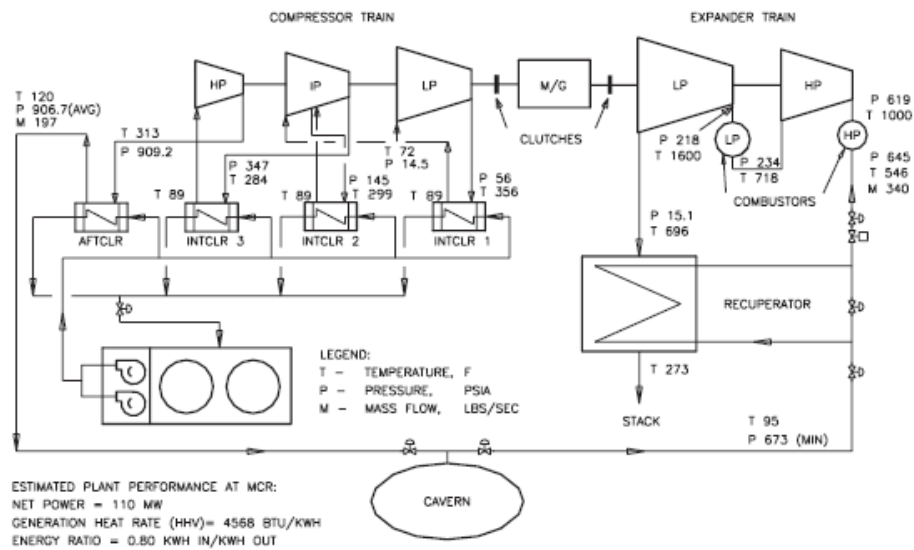
εμβαδόν επιφανείας αυξάνει με τη μείωση στην πίεση του ατμού του LP, επειδή λιγότερη ανταλλαγή θερμότητας αυξάνεται στο χαμηλότερο όριο θερμοκρασίας του HRSG. Η Εικόνα 2-33 είναι το διάγραμμα ενέργειας / θερμοκρασίας του HRSG τριπλής πίεσης. Οι ροές IP και LP είναι πολύ μικρότερες από τη ροή ατμοστροβίλου HP. Η αναλογία είναι της τάξεως του 25:1.

2.6. Κύκλος αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα.

Ο κύκλος αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage) χρησιμοποιείται ως σύστημα με αιχμή που χρησιμοποιεί ισχύ εκτός αιχμής για τη συμπίεση του αέρα σε μεγάλη λύση - υπόγεια σπηλιά που εξορύσσεται και αφαιρεί τον αέρα για την παραγωγή ενέργειας σε περιόδους υψηλής ζήτησης ισχύος του συστήματος. Η Εικόνα 2-34 δείχνει σχηματικά μια τέτοια τυπική μονάδα με τη θερμότητα της μονάδας και του διαγράμματος ισορροπίας της μάζας, με τις παραμέτρους της κατάστασης λειτουργίας της παραγωγής σε ονομαστικό φορτίο και τις παραμέτρους λειτουργίας συμπίεσης σε μέσες συνθήκες σπηλαίου.



Εικόνα 2-33 : Διάγραμμα ενέργειας / θερμοκρασίας της HRSG τριπλής πίεσης.



Εικόνα 2-34 : Σχηματική απεικόνιση μονάδας αποθήκευσης ενέργειας αέρα.

2.7. Επαύξηση ισχύος.

Η αύξηση της ισχύος σε έναν αεριοστρόβιλο επιτυγχάνεται με πολλές διαφορετικές τεχνικές. Σε αυτή την ενότητα εξετάζουμε τεχνικές που θα μπορούσαν να επιτευχθούν σε υπάρχοντες αεριοστρόβιλους. Έτσι, τεχνικές όπως πρόσθετοι καυστήρες δεν θεωρούνται πρακτικές σε έναν υπάρχον στρόβιλο. Με άλλα λόγια, σε αυτή την ενότητα εστιάζουμε σε πρακτικές λύσεις. Η πρακτική επαύξηση της ισχύος μπορεί να διαιρεθεί σε δύο κύριες κατηγορίες. Κυμαίνονται από την ψύξη της εισόδου, έως την έγχυση ατμού ή νερού στον στρόβιλο.

2.7.1. Ψύξη εισόδου.

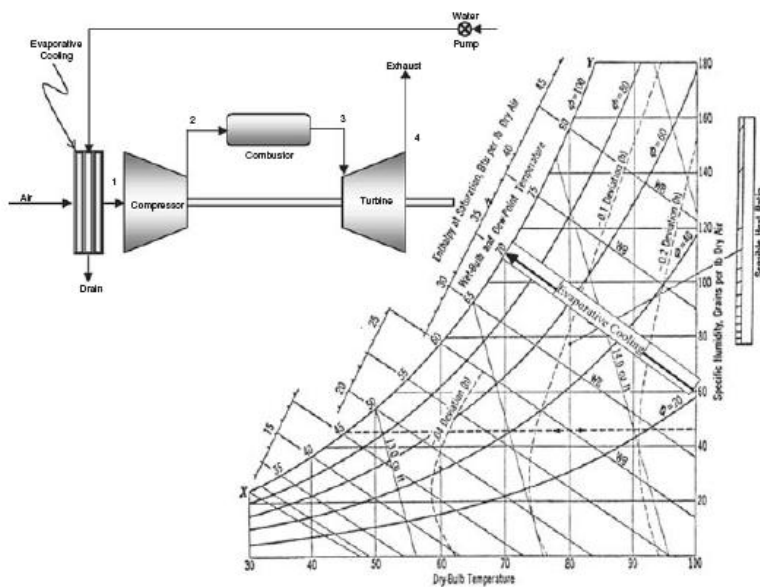
- Οι εξατμιστικές μέθοδοι - Είτε συμβατικοί εξατμιστικοί ψύκτες ή άμεση θόλωση νερού.
- Συστήματα ψύξης με ψύξη στην είσοδο - Αξιοποίηση απορρόφησης ή μηχανικής ψύξης.
- Συνδυασμός των εξατμιστικών και συστημάτων ψυχρής εισόδου - Η χρήση των εξατμιστικών ψυκτών για να βοηθήσουν το σύστημα ψυκτικού συγκροτήματος για την επίτευξη χαμηλότερων θερμοκρασιών του αέρα εισαγωγής.
- Συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας - Αυτά είναι συστήματα διαλείπουσας χρήσης, όπου το κρύο παράγεται εκτός αιχμής και στη συνέχεια χρησιμοποιείται για να ψύξει τον αέρα εισόδου κατά τη διάρκεια των θερμών ωρών της ημέρας.

2.7.2. Έγχυση συμπιεσμένου αέρα, ατμού ή νερού.

- Έγχυση υγροποιημένου και θερμαινόμενου συμπιεσμένου αέρα - Συμπιεσμένος αέρας από ένα ξεχωριστό συμπιεστή θερμαίνεται και υγροποιείται έως περίπου 60% σχετική υγρασία με τη χρήση ενός HRSG και στη συνέχεια εγχέεται στην κατάθλιψη του συμπιεστή.
- Έγχυση ατμού - Έγχυση του ατμού, που λαμβάνεται από τη χρήση ενός απλού σταδίου HRSG χαμηλής πίεσης, στην κατάθλιψη του συμπιεστή και/ή με έγχυση στον καυστήρα.
- Έγχυση νερού - Το αναβόσβησμα του μέσου συμπιεστή χρησιμοποιείται για την ψύξη του συμπιεσμένου αέρα και την προσθήκη ροής μάζας στο σύστημα.

2.7.3. Τεχνικές ψύξης εισόδου.

Εξατμιστική ψύξη του στροβίλου. Οι παραδοσιακοί εξατμιστικοί ψύκτες που χρησιμοποιούν μέσα για την εξάτμιση του νερού έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στην βιομηχανία αεριοστροβίλου με το πέρασμα των χρόνων, ιδιαίτερα στα θερμά κλίματα σε περιοχές με χαμηλή υγρασία. Το χαμηλό κόστος κεφαλαίου, καθώς και το κόστος εγκατάστασης αλλά και οι λειτουργικές δαπάνες το καθιστούν "ελκυστικό" σε πολλά σενάρια με λειτουργία στροβίλων. Οι εξατμιστικοί ψύκτες αποτελούνται από νερό που ψεκάζεται στα μπλοκ των μέσων τα οποία είναι κατασκευασμένα από ινώδες κυματοειδές υλικό. Η ροή αέρα μέσω αυτών των μπλοκ των μέσων εξατμίζει το νερό. Καθώς εξατμίζεται το νερό, καταναλώνει περίπου 1059 BTU (1117 kJ) (λανθάνουσα θερμότητα εξατμίσεως) στους 60°F (15°C). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της θερμοκρασίας του αέρα που εισέρχεται στον συμπιεστή από εκείνη της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος. Αυτή η τεχνική είναι πολύ αποτελεσματική σε περιοχές χαμηλής υγρασίας.



Εικόνα 2-35 : Σχηματική απεικόνιση εξατμιστικής ψύξης σε αεριοστρόβιλο.

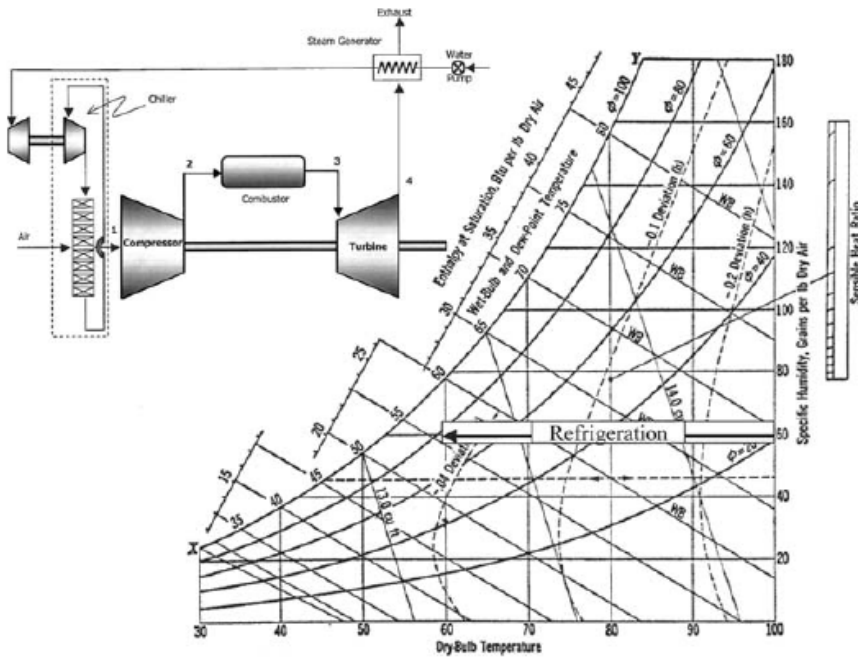
Το έργο που απαιτείται για την κίνηση του συμπιεστή στροβίλου μειώνεται με μείωση της θερμοκρασίας εισόδου του συμπιεστή, αυξάνοντας έτσι το έργο εξόδου του στροβίλου. Η Εικόνα 2-35 είναι μια σχηματική απεικόνιση του εξατμιστικού αεριοστροβίλου και της επίδρασης του στον κύκλο Brayton. Η ογκομετρική ροή των περισσότερων στροβίλων είναι σταθερή και, συνεπώς, με την αύξηση της ροής μάζας, η ισχύς αυξάνεται αντιστρόφως ανάλογα με τη θερμοκρασία του αέρα εισόδου. Το ψυχομετρικό διάγραμμα που φαίνεται δείχνει ότι η ψύξη περιορίζεται ιδιαίτερα σε συνθήκες υψηλής υγρασίας. Είναι επιλογή πολύ χαμηλού κόστους και μπορεί να εγκατασταθεί πολύ εύκολα. Ωστόσο, αυτή η τεχνική δεν αυξάνει την απόδοση του στροβίλου. Η θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου μειώνεται κατά περίπου 18°F (10°C), εάν η εξωτερική θερμοκρασία είναι περίπου 90°F. Το κόστος ενός συστήματος εξατμιστικής ψύξης είναι περίπου 50 \$/kW.

Η άμεση θόλωση εισόδου είναι ένα είδος μεθόδου εξατμιστικής ψύξης, όπου το απιονισμένο νερό μετατρέπεται σε ομίχλη μέσω των ακροφυσίων υψηλής πίεσης όπου λειτουργεί στα 1000-3000 psi (67-200 Bar). Αυτή η ομίχλη κατόπιν παρέχει ψύξη όταν εξατμίζεται στον αγωγό εισαγωγής αέρα του αεριοστροβίλου. Ο αέρας μπορεί να φθάσει 100% σχετική υγρασία στην εισαγωγή του συμπιεστή και έτσι δίνει τη χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία χωρίς ψύξη. Άμεση θόλωση εισόδου υψηλής πίεσης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία επίδρασης με ενδιάμεση ψύξη συμπιεστή επιτρέποντας περίσσεια ομίχλη εντός του συμπιεστή, ενισχύοντας έτσι περαιτέρω την παραγόμενη ισχύ.

Είσοδοι ψύξης για τους αεριοστροβίλους. Οι εισοδοι ψύξης είναι περισσότερο αποτελεσματικοί σε σχέση με τα προηγούμενα συστήματα εξατμιστικής ψύξης καθώς μπορούν να μειώσουν τις θερμοκρασίες περίπου 45-55°F (25-30°C). Δύο τεχνικές για ψύξη της εισόδου ενός αεριοστροβίλου είναι με συμπίεση ατμού (μηχανική ψύξη) και με απορρόφηση ψύξης.

- **Μηχανική Ψύξη.** Σε ένα μηχανικό σύστημα ψύξης, ο ψυκτικός ατμός συμπιέζεται μέσω ενός φυγοκεντρικού, κοχλιοειδούς ή παλινδρομικού συμπιεστή. Η Εικόνα 2-36 είναι μία σχηματική απεικόνιση μίας λήψης μηχανικής ψύξης για έναν αεριοστροβίλο. Το ψυχομετρικό διάγραμμα που συμπεριλαμβάνεται, μας δείχνει πως η ψύξη παρέχει σημαντική μείωση της θερμοκρασίας και είναι πολύ κατάλληλη για θερμά και υγρά κλίματα.

Οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές, τυπικά χρησιμοποιούνται για μεγάλα συστήματα άνω των 1000 tons (12,4 x 10⁶ BTU/13,082 x 10⁶ kJ) και κινούνται από έναν ηλεκτρικό κινητήρα. Η μηχανική ψύξη έχει σημαντικά υψηλή κατανάλωση βοηθητικής ισχύος για τον οδηγό του συμπιεστή και απαιτούνται αντλίες για το κύκλωμα ψύξης νερού. Μετά την συμπίεση, ο ατμός διέρχεται μέσω ενός συμπυκνωτή όπου και συμπυκνώνεται. Ο συμπυκνωμένος ατμός κατόπιν διαστέλλεται σε μία βαλβίδα εκτόνωσης και παρέχει ένα ψυκτικό αποτέλεσμα. Ο εξατμιστήρας ψύχει το νερό ψύξης που κυκλοφορεί στα πηνία ψύξης εισόδου του αεριοστροβίλου στο ρεύμα του αέρα. Τα ψυκτικά συγκροτήματα με βάση τους χλωροφθοράνθρακες είναι διαθέσιμα και μπορούν να προσφέρουν μια μεγάλη χωρητικότητα για ένα σχετικά μικρότερο χώρο οικοπέδου καθώς και χαμηλότερη θερμοκρασία απ' ό,τι τα συστήματα ψύξης με βάση την απορρόφηση βρωμιδίου λιθίου (Li-Br). Τα μειονεκτήματα των ψυκτικών συστημάτων με μηχανική ψύξη είναι το υψηλό κεφάλαιο, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης, υψηλή κατανάλωση ενέργειας και η κακή απόδοση υπό μερικό φορτίο.



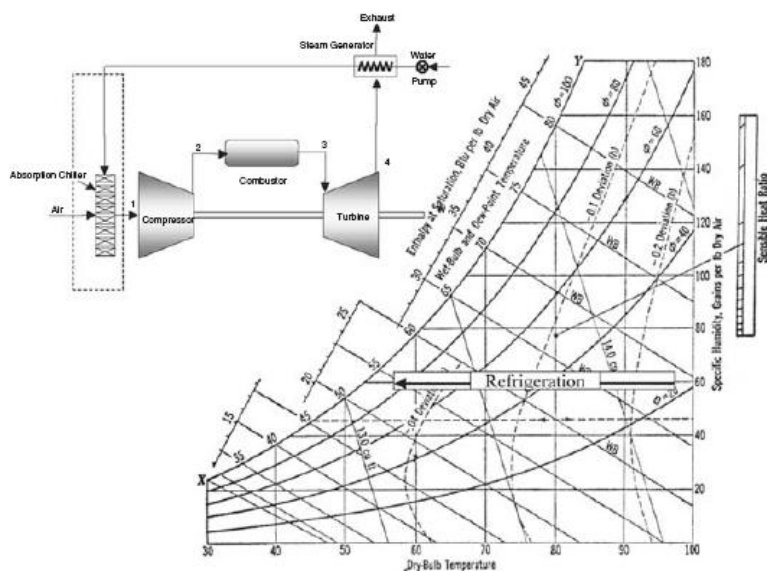
Εικόνα 2-36 : Σύστημα εισόδου μηχανικής ψύξης που χρησιμοποιείται για την ψύξη του αέρα εισόδου του αεριοστρόβιλου.

Η άμεση διαστολή είναι επίσης δυνατή, όπου το ψυκτικό μέσο χρησιμοποιείται για την ψύξη του εισερχόμενου αέρα απευθείας, χωρίς κύκλωμα κρύου νερού. Η αμμωνία, η οποία είναι ένα εξαιρετικό ψυκτικό μέσο χρησιμοποιείται σε αυτό το είδος εφαρμογών. Ειδικά συστήματα συναγερού θα πρέπει να χρησιμοποιείται για την ανίχνευση απώλειας του ψυκτικού μέσου εντός του αέρα καύσης καθώς και κλείσιμο αλλά και εκκένωση του συστήματος ψύξης.

- *Συστήματα ψύξης με απορρόφηση.* Τα συστήματα απορρόφησης τυπικά χρησιμοποιούν βρωμίδιο λιθίου (Li-Br) και νερό, με το Li-Br να είναι ο απορροφητής και το νερό να ενεργεί ως ψυκτικό μέσο. Τέτοια συστήματα μπορούν να ψύξουν τον αέρα εισαγωγής σε 50°F (10°C). Η Εικόνα 2-37 δείχνει ένα σύστημα ψύξης εισόδου με απορρόφηση για τον αεριοστρόβιλο. Η ψύξη που φαίνεται στο ψυχομετρικό διάγραμμα είναι ταυτόσημη με εκείνη για το σύστημα μηχανικής ψύξης. Η θερμότητα για τον ψύκτη απορρόφησης μπορεί να παρέχεται από ατμό, αέρα ή καυσαέρια του αεριοστρόβιλου. Τα συστήματα απορρόφησης μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να είναι είτε με μονή ή διπλή επίδραση. Ένα σύστημα μονής επίδρασης θα έχει συντελεστή απόδοσης (Coefficient of Performance) της τάξης του 0,7-0,9 και ένα σύστημα διπλής επίδρασης συντελεστή απόδοσης 1,15. Η απόδοση του μερικού φορτίου των συστημάτων απορρόφησης είναι σχετικά καλή και η απόδοση δεν πέφτει σε μερικό φορτίο, όπως συμβαίνει με συστήματα μηχανικής ψύξης. Τα κόστη αυτών των συστημάτων είναι πολύ υψηλότερα από το σύστημα με εξατμιστική ψύξη, ωστόσο τα συστήματα ψύξης εισόδου σε θερμά, υγρά κλίματα είναι πιο αποδοτικά λόγω της πολύ υψηλής υγρασίας.

2.7.4. Συνδυασμός συστημάτων εξατμιστικής ψύξης και ψύξης εισόδου.

Ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες του σχεδίου, της τοποθεσίας, των κλιματολογικών συνθηκών, του τύπου του κινητήρα και των οικονομικών παραγόντων, ένα υβριδικό σύστημα που χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό των παραπάνω τεχνολογιών μπορεί να είναι το καλύτερο. Η δυνατότητα χρησιμοποίησης συστημάτων δημιουργίας ομίχλης πρώτα σε σχέση με το σύστημα μηχανικής ψύξης εισόδου πρέπει να εξεταστεί όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-38. Αυτό μπορεί να μην αποτελεί πάντα έξυπνη επιλογή, δεδομένου πως η εξατμιστική ψύξη είναι μια αδιαβατική διαδικασία που λαμβάνει χώρα σε σταθερή ενθαλπία. Όταν το νερό εξατμίζεται σε ένα ρεύμα αέρα, οποιαδήποτε μείωση στην αισθητή θερμότητα συνοδεύεται από μία αύξηση στην λανθάνουσα θερμότητα του ρεύματος αέρα (η θερμότητα που χρησιμοποιείται στο ρεύμα του αέρα για να πραγματοποιηθεί μια αλλαγή φάσης στο νερό, από την υγρή στην αέρια φάση). Αν η ομίχλη εφαρμόζεται μπροστά από ένα πηνίο ψύξης, η θερμοκρασία θα μειωθεί όταν εξατμιστεί η ομίχλη, αλλά επειδή το πηνίο ψύξης θα πρέπει να εργαστεί σκληρότερα για να αφαιρέσουμε το νερό που εξατμίζεται από το ρεύμα αέρα, το αποτέλεσμα δεν θα αποφέρει κανένα θερμοδυναμικό όφελος.

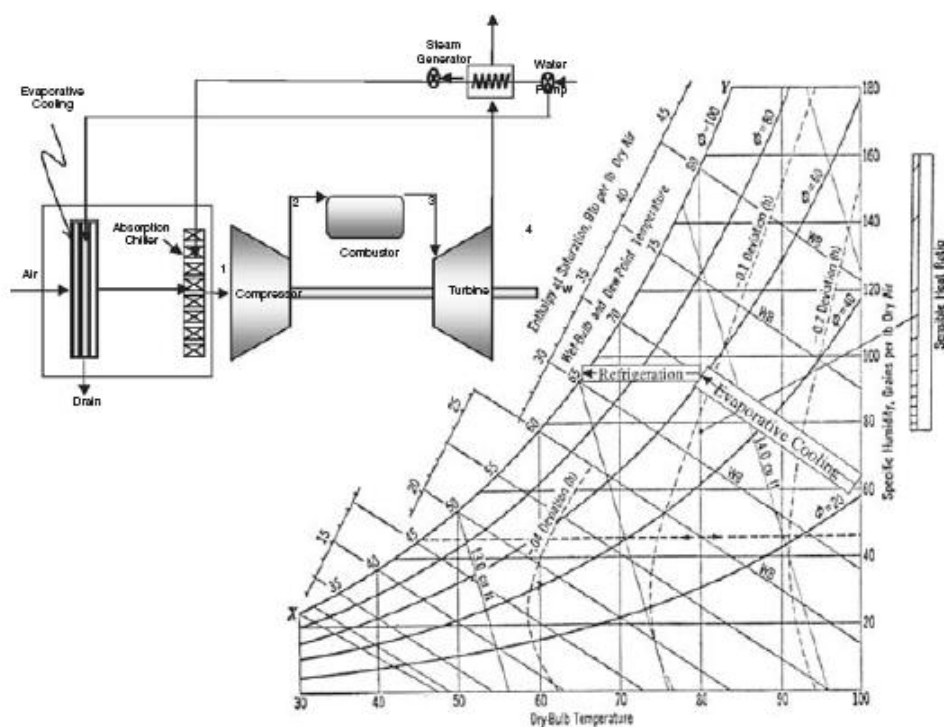


Εικόνα 2-37 : Σύστημα ψύξης εισόδου με απορρόφηση.

Για να μεγιστοποιηθεί το αποτέλεσμα, ο ψύκτης θα πρέπει να σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε, σε συνδυασμό με εξατμιστική ψύξη, να επιτυγχάνεται η μέγιστη μείωση στη θερμοκρασία. Αυτό μπορεί να γίνει με το σχεδιασμό ενός ελαφρώς μικρότερου μεγέθους ψύκτη, ο οποίος δεν είναι ικανός να φέρει τη θερμοκρασία του αέρα προς τα κάτω στην θερμοκρασία περιβάλλοντος, σημείο δρόσου, αλλά σε συνδυασμό με εξατμιστική ψύξη το ίδιο αποτέλεσμα μπορεί να επιτευχθεί, λαμβάνοντας έτσι το πλεονέκτημα της εξατμιστικής ψύξης για τη μείωση του φορτίου της ψύξης.

2.7.5. Συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.

Τα συστήματα αυτά συνήθως έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν το σύστημα ψύξης σε ώρες εκτός αιχμής και στη συνέχεια να χρησιμοποιούν το ψυκτικό μέσο σε ώρες αιχμής. Το ψυκτικό μέσο στις περισσότερες περιπτώσεις είναι πάγος και ο αέρας του αεριοστρόβιλου στη συνέχεια διέρχεται μέσω του μέσου, το οποίο χαμηλώνει τη θερμοκρασία εισόδου του, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-39. Το μέγεθος του συστήματος ψύξης μειώνεται σημαντικά, καθώς μπορεί να λειτουργήσει για 8-10 ώρες σε συνθήκες εκτός αιχμής για να κάνει τον πάγο, το οποίο στη συνέχεια αποθηκεύεται και ο αέρας διέρχεται μέσα από αυτό κατά τις ώρες αιχμής λειτουργίας που μπορεί να είναι μόνο για περίπου 4-6 ώρες.



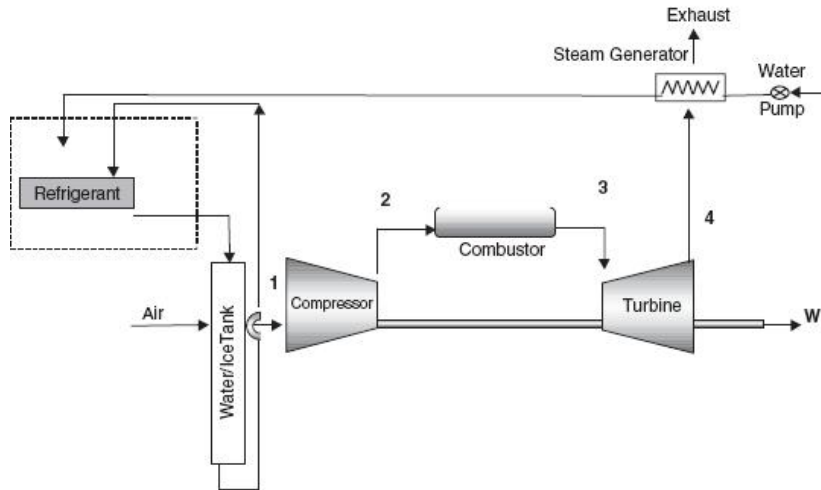
Εικόνα 2-38 : Εξατμιστικά και ψυκτικά συστήματα εισόδου.

2.7.6. Έγχυση συμπιεσμένου αέρα, ατμού ή νερού για την αύξηση της ισχύος.

Προσθήκη νερού στο μέσο του συμπιεστή. Στο σύστημα αυτό, το νερό εγχέεται στα μέσα στάδια του συμπιεστή για την ψύξη του αέρα και την προσέγγιση μίας διαδικασίας ισοθερμικής συμπίεσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-40. Το νερό που εγχέεται, συνήθως ψεκάζεται μηχανικά, έτσι ώστε πολύ λεπτά σταγονίδια να εισάγονται στον αέρα. Το νερό εξατμίζεται καθώς έρχεται σε επαφή με την υψηλή πίεση και θερμοκρασία του ρεύματος αέρα. Καθώς το νερό εξατμίζεται, καταναλώνει περίπου 1058 BTU (1117 kJ) στην υψηλότερη πίεση και θερμοκρασία, με αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας του

ρεύματος αέρα που εισέρχεται στο επόμενο στάδιο. Αυτό μειώνει το έργο που απαιτείται για την κίνηση του συμπιεστή.

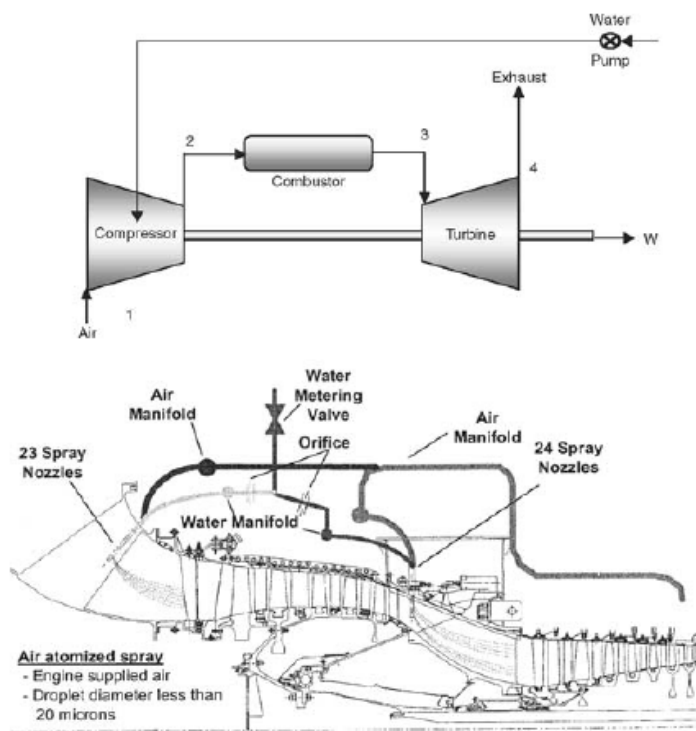
Η ενδιάμεση ψύξη του συμπιεσμένου αέρα έχει εφαρμοστεί με μεγάλη επιτυχία σε κινητήρες υψηλής πίεσης. Αυτό το σύστημα μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα προηγούμενα περιγραφέντα συστήματα.



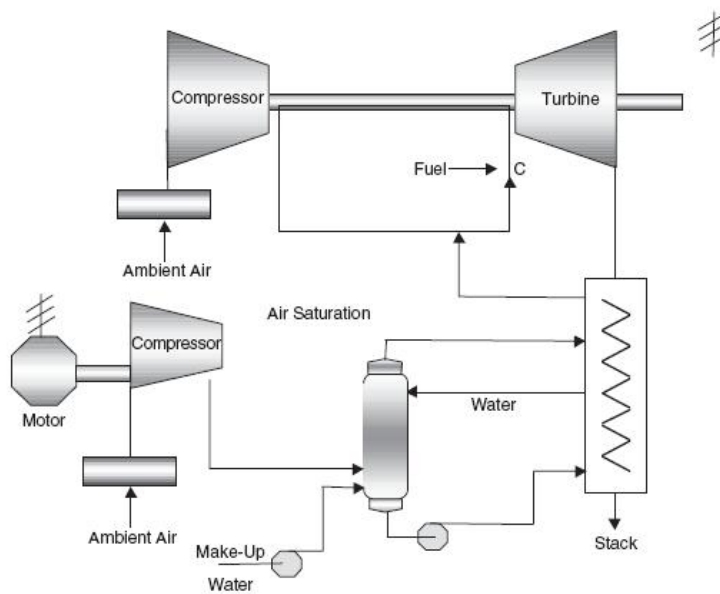
Εικόνα 2-39 : Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας εισόδου.

Έγχυση υγροποιημένου και θερμαινόμενου συμπιεσμένου αέρα. Συμπιεσμένος αέρας από ένα ξεχωριστό συμπιεστή θερμαίνεται και υγροποιείται σε περίπου 60% σχετική υγρασία με τη χρήση ενός HRSG και στη συνέχεια εγχέεται εντός της εκτόνωσης του συμπιεστή. Η Εικόνα 2-41 είναι ένα απλοποιημένο σχήμα μιας μονάδας με έγχυση συμπιεσμένου αέρα που αποτελείται από τα ακόλουθα κύρια εξαρτήματα:

1. Ένας στρόβιλος καύσης εμπορίου με διάταξη για έγχυση, σε οποιοδήποτε σημείο αντίθετα προς την κατεύθυνση του καυστήρα, του εξωτερικά παρεχόμενου υγροποιημένου και προθερμασμένου συμπληρωματικού συμπιεσμένου αέρα. Οι μηχανικές πτυχές της έγχυσης αέρα για τις έννοιες έγχυσης συμπιεσμένου αέρα στις μονάδες είναι παρόμοιες με την έγχυση ατμού για την επαύξηση της ισχύος, που έχει συσσωρεύσει σημαντική εμπειρία λειτουργίας.
2. Ένας συμπληρωματικός συμπιεστής (αποτελούμενος από έτοιμο συμπιεστή εμπορίου ή τυποποιημένα εξαρτήματα συμπιεστή) για παροχή της συμπληρωματικής ροής του αέρα αντίθετη προς την κατεύθυνση των καυστήρων.
3. Μια στήλη κορεσμού για την ύγρανση του συμπληρωματικού αέρα και προθέρμανση.
4. Θερμοσίφωνα ανάκτησης θερμότητας και προθερμαντήρας κορεσμένου αέρα.
5. Εξοπλισμός για την διατήρηση της ισορροπίας των μονάδων και συστήματα, συμπεριλαμβανομένων των σωληνώσεων αλληλοσύνδεσης, βαλβίδων, ελέγχων κ.τ.λ.



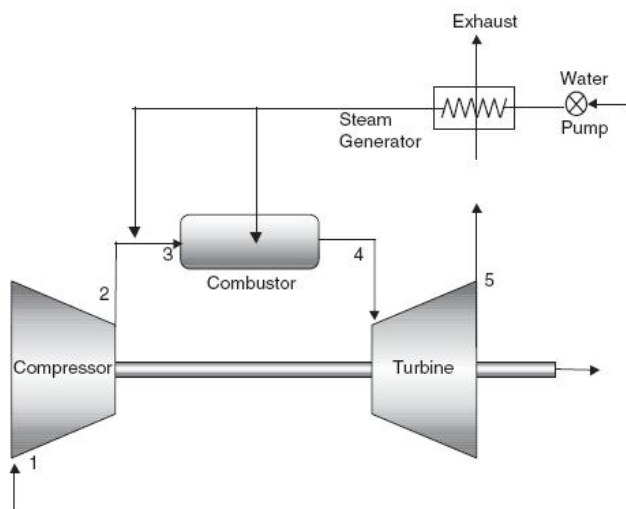
Εικόνα 2-40 : Ψύξη μέσω συμπίεση και σχηματική απεικόνιση πραγματικής εφαρμογής σε GE LM 6000 κινητήρα.



Εικόνα 2-41 : Σύστημα έγχυσης θερμαινόμενου και υγροποιημένου συμπιεσμένου αέρα για επαύξηση ισχύος ενός αεριοστροβίλου.

Έγχυση νερού ή ατμού στην έξοδο συμπιεστή του αεριοστροβίλου. Η έγχυση ατμού ή νερού έχει χρησιμοποιηθεί συχνά για την αύξηση της ενέργειας που παράγεται από το στροβίλο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-42. Ο ατμός μπορεί να παράγεται από τα καυσαέρια του αεριοστροβίλου. Ο HRSG για μια τέτοια μονάδα είναι πολύ βασικός, καθώς οι πιέσεις είναι χαμηλές. Αυτή η τεχνική αυξάνει την ισχύ καθώς και την απόδοση του στροβίλου. Η ποσότητα ατμού περιορίζεται σε περίπου 12% της ροής του αέρα, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μία αύξηση της ισχύος της τάξης του 25%. Τα όρια της γεννήτριας μπορεί να περιορίσουν την ποσότητα της ισχύος, που μπορεί να προστεθεί. Το κόστος για τέτοια συστήματα είναι περίπου 100 \$/kW.

Έγχυση ατμού στον καυστήρα των αεριοστροβίλων χρησιμοποιώντας τα παρόντα ακροφύσια διπλού καυσίμου. Η έγχυση ατμού στον καυστήρα συνήθως χρησιμοποιείται ευρέως για το έλεγχο των NO_x, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-43. Η ποσότητα του ατμού, που μπορεί να προστεθεί, είναι περιορισμένη λόγω ανησυχιών σχετικά με την καύση. Αυτό περιορίζεται σε περίπου 2-3% της ροής του αέρα. Αυτό θα παρέχει ένα επιπλέον 3-5% της ονομαστικής ισχύος. Τα ακροφύσια διπλού καυσίμου σε πολλούς από τους βιομηχανικούς στροβίλους θα μπορούσαν εύκολα να τροποποιηθούν για να επιτευχθεί ο στόχος της έγχυσης ατμού. Ο ατμός θα παραγόταν χρησιμοποιώντας στροβίλους HRSG. Επίσης, πολλαπλοί στροβίλοι θα μπορούσαν να συνδεθούν σε έναν HRSG.

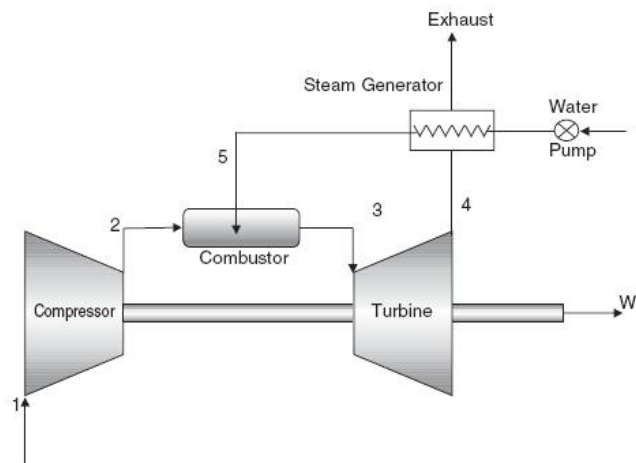


Εικόνα 2-42 : Έγχυση ατμού στην έξοδο του συμπιεστή και στον καυστήρα του αεριοστροβίλου.

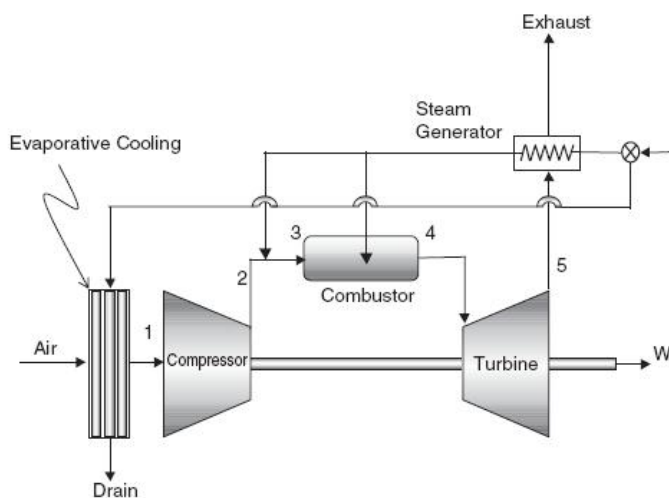
Συνδυασμός της εξατμιστικής ψύξης και της έγχυσης ατμού. Ο συνδυασμός των παραπάνω τεχνικών πρέπει επίσης να διερευνηθεί, καθώς καμία από αυτές τις τεχνικές δεν είναι ανεξάρτητη των άλλων τεχνικών και μπορούν να χρησιμοποιηθούν εύκολα σε συνδυασμό μεταξύ τους. Η Εικόνα 2-44 είναι μια σχηματική απεικόνιση του συνδυασμού της εξατμιστικής ψύξης εισόδου με έγχυση ατμού, στην έξοδο του συμπιεστή και στον καυστήρα. Σε αυτό το σύστημα, η ισχύς αυξάνεται επωφελούμενη από την ψύξη του αέρα, και στη συνέχεια αυξάνεται περαιτέρω με την προσθήκη του ατμού.

2.8. Σύνοψη στα συστήματα επαύξησης ισχύος.

Η ανάλυση των διαφόρων κύκλων που εξετάζονται εδώ, οι οποίοι κυμαίνονται από τον απλό κύκλο, όπως η εξατμιστική ψύξη, σε πιο σύνθετους κύκλους, όπως ο κύκλος υγροποιημένου και θερμαινόμενου συμπιεσμένου αέρα. Οι κύκλοι που εξετάζονται εδώ έχουν χρησιμοποιηθεί σε πραγματική λειτουργία μεγάλων μονάδων παραγωγής ενέργειας. Έτσι δεν υπάρχουν κύκλοι που αξιολογήθηκαν που να είναι μόνο εννοιολογικοί στη φύση.



Εικόνα 2-43 : Έγχυση ατμού στον καυστήρα του αεριοστροβίλου.



Εικόνα 2-44 : Εξατμιστική ψύξη και έγχυση ατμού σε αεριοστρόβιλο.

Η ψύξη του αέρα εισαγωγής χρησιμοποιώντας έναν εξατμιστικό κύκλο, ο απλούστερος των κύκλων, η οποία μπορεί να τεθεί σε λειτουργία με ελάχιστη δαπάνη σε κεφάλαιο, δεν είναι πολύ χρήσιμη σε λειτουργία σε περιοχές με υψηλή υγρασία. Ένα τέτοιο σύστημα θα κοστίσει περίπου 300.000 \$ - 500.000 \$ ανά στρόβιλο, έτσι 135 \$ ανά kW.

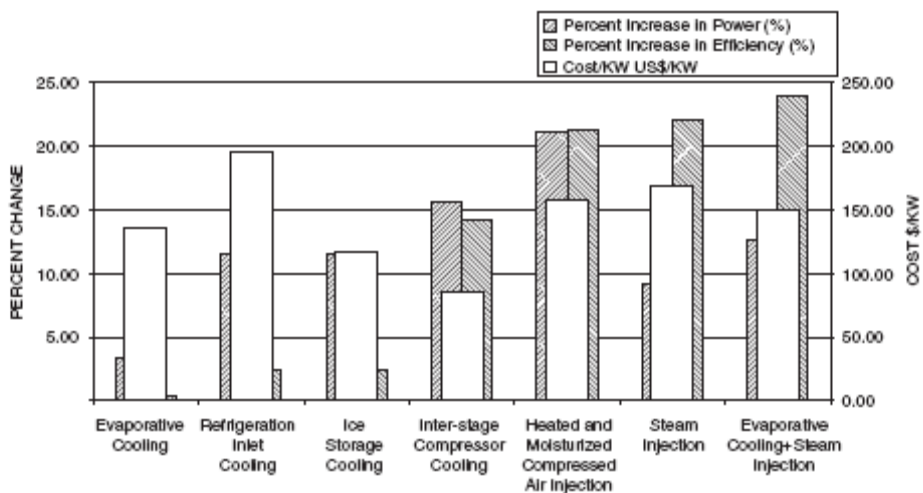
Η ψύξη εισόδου είναι πολύ πιο αποτελεσματική σε υγρές περιοχές και μπορεί να προσθέσει περίπου 12,8% στο έργο εξόδου του απλού κύκλου του αεριοστροβίλου. Το κόστος ενός τέτοιου συστήματος είναι μεταξύ των πιο δαπανηρών ανά KW από τους κύκλους που αξιολογήθηκαν. Η γενική ιδέα εδώ είναι να έχουμε έναν απλό HRSG με παροχή ατμού,

αρκετή ώστε να παρέχει ψύξη σε τρεις στροβίλους. Ο ατμός θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτήσει έναν ατμοστροβίλο, τον οποίο θα λειτουργεί ένας συμπιεστής ψύξης ή θα χρησιμοποιεί τον ατμό για να παρέχει ψύξη απορρόφησης για τους τρεις στροβίλους. Η ιδέα ήταν να μειωθεί η θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου για περίπου 30-50°F (17-27°C). Η μονάδα ψύξης μπορεί επίσης να αντικατασταθεί από την χρήση ενός συστήματος αποθήκευσης πάγου, η επίδραση του οποίου θα είναι η ίδια για την απόδοση του στροβίλου εκτός από το γεγονός ότι θα λειτουργούν για περίπου οκτώ ώρες σε μια ημέρα. Οι άλλες 16 ώρες θα χρειάζονται για να παράγουν τον πάγο που χρησιμοποιείται για την ψύξη του αέρα. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα ψύξης θα μπορούσε να είναι πολύ μικρότερο από το σύστημα που απαιτείται για την ψύξη του αέρα εισόδου 24 ώρες την ημέρα.

Η ψύξη του αέρα του συμπιεστή μεταξύ των σταδίων με έγχυση νερού, είναι επίσης ένας πολύ αποτελεσματικός τρόπος για να πάρουμε περισσότερη ισχύ από τον αεριοστροβίλο. Το πρόβλημα στις περισσότερες μονάδες είναι ότι δεν υπάρχει κατάλληλη θέση για να εγχυθεί το νερό. Οι αεριοστροβίλοι θα χρειαστούν σημαντική τροποποίηση για την εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος. Φροντίδα θα πρέπει να ληφθεί πως οποιαδήποτε τροποποίηση δεν θα επηρεάσει την ακεραιότητα του συστήματος. Αυτός ο τύπος συστήματος είναι πολύ αποδοτικός σε μονάδες όπου υπάρχει συμπιεστής χαμηλής και υψηλής πίεσης, παρέχοντας μια πολύ βολική θέση για να εγχυθεί το νερό. Αυτός ο τύπος του συμπιεστή είναι ως επί το πλείστον διαθέσιμος σε μονάδες αερο-παραγωγών.

Η ιδέα της έγχυσης υγροποιημένου και θερμαινόμενου συμπιεσμένου αέρα αμέσως μετά τον συμπιεστή αεριοστροβίλου, είναι ένας άλλος πολύ ενδιαφέρων τρόπος για την αύξηση της ισχύος και της απόδοσης. Σε αυτό το σύστημα, προστίθεται συμπιεσμένος αέρας στον αέρα εκτόνωσης του συμπιεστή. Ο συμπιεσμένος αέρας είναι περίπου το 5% του κύριου αέρα αεριοστροβίλου και αυτός ο αέρας αφού έχει συμπιεστεί χρησιμοποιώντας έναν εξωτερικό συμπιεστή στη συνέχεια με εγχέεται σε μία συσκευή κορεσμού αέρα όπου, ο ατμός που λαμβάνεται από την μονάδα HRSG κατόπιν εγχέεται μέσα στη συσκευή για τον κορεσμό του αέρα με νερό και ο κορεσμένος αέρας στη συνέχεια θερμαίνεται περαιτέρω στον HRSG πριν εγχυθεί μέσα στην εκκένωση του συμπιεστή του αεριοστροβίλου.

Η έγχυση του ατμού στην εκκένωση του συμπιεστή έχει χρησιμοποιηθεί τα τελευταία χρόνια και έχει διαπιστωθεί πως είναι πολύ αποτελεσματική. Η ποσότητα του ατμού προς έγχυση μπορεί να ποικίλλει από 5-15%. Η έγχυση ατμού που δημιουργείται από κατάλληλα επεξεργασμένο νερό δεν επηρεάζει τη ζωή του θερμού τμήματος των στροβίλων. Αυτό βασίζεται σε έναν μεγάλο αριθμό μονάδων, όπου η έγχυση ατμού έχει χρησιμοποιηθεί. Η έγχυση ατμού, με σύστημα εισαγωγής εξατμιστικής ψύξης θα ήταν καταλληλότερη για τις ζεστές, με υγρασία περιοχές. Αυτή η εφαρμογή βασίζεται στην απόδοση και το κόστος, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-45.



Εικόνα 2-45 : Σύγκριση διάφορων κύκλων με βάση το ποσοστό αλλαγής σε ισχύ, απόδοση και κόστος \$ / kW.

Οι πρόσθετες δαπάνες για την ενσωμάτωση των συστημάτων φαίνονται επίσης στην Εικόνα 2-45. Το κόστος ανά kW για την έγχυση ατμού και για το σύστημα έγχυσης θερμαινόμενου και υγροποιημένου συμπιεσμένου αέρα είναι περίπου το ίδιο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, το αρχικό κόστος για την εγκατάσταση του συστήματος συμπιεσμένου αέρα, για ένα στρόβιλο περίπου 100 MW, που είναι περίπου 3.700.000 \$, σε σύγκριση με τα περίπου 1.700.000 \$ για ένα σύστημα έγχυσης ατμού, η ισχύς που παράγεται από το σύστημα έγχυσης θερμαινόμενου και υγροποιημένου συμπιεσμένου αέρα είναι πολύ υψηλότερη.

Το ποσοστό επιστροφής για το σύστημα έγχυσης ατμού είναι μεγαλύτερο απ' ότι για το σύστημα έγχυσης συμπιεσμένου αέρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι παρόλο που η απόδοση του συστήματος έγχυσης ατμού και του συστήματος έγχυσης συμπιεσμένου αέρα είναι περίπου η ίδια, το αρχικό κόστος του συστήματος έγχυσης ατμού είναι πάνω από 50% χαμηλότερο από το σύστημα έγχυσης συμπιεσμένου αέρα και αυτό κάνει τη διαφορά.

Οι υπολογισμοί για την εξοικονόμηση καυσαερίων έχουν βασιστεί σε μια διεθνή τιμή των καυσίμων, σε περίπου 2,50 \$ ανά εκατομμύριο BTU (2,64 \$ ανά εκατομμύριο kJ). Η διαθεσιμότητα των μονάδων ελήφθη στο 97%, η οποία είναι η διαθεσιμότητα σε ολόκληρη τη βιομηχανία για τις περισσότερες μονάδες τύπου πλαισίου. Το κόστος πώλησης της νέας ισχύος είναι με βάση τη μέση τιμή των 0,04 \$ ανά kW-Hr.

Ορισμένοι από τους σημαντικότερους περιορισμούς στην τοποθέτηση αυτών των κύκλων σε υπάρχουσες μονάδες μπορούν να περιγραφούν ως εξής:

1. **Χωρητικότητα γεννήτριας ισχύος εξόδου.** Η γεννήτρια ως γενικός κανόνας είναι μεγάλου μεγέθους κατά περίπου 20% πάνω από το ονομαστικό φορτίο του στρόβιλου. Οι αλλαγές θα πρέπει να είναι περιορισμένες στην εν λόγω περιοχή με τον περιορισμό του ατμού ή της έγχυσης του συμπιεσμένου αέρα.
2. **Θερμοκρασία ανάφλεξης στρόβιλου.** Η θερμοκρασία ανάφλεξης στρόβιλου, η θερμοκρασία του αερίου που μετρείται στην είσοδο των ακροφυσίων των πρώτων

σταδίων, περιορίζεται στις θερμοκρασίες ανάφλεξης, καθώς μια αύξηση στις θερμοκρασίες ανάφλεξης θα μείωνε σημαντικά την διάρκεια ζωής του θερμού τμήματος του στροβίλου.

3. **Πίεση έγχυσης.** Η πίεση έγχυσης θα πρέπει να είναι μεταξύ 5-7 Bar πάνω από την πίεση εκτόνωσης του συμπιεστή. Στην περίπτωση του συστήματος έγχυσης θερμαινόμενου και υγροποιημένου συμπιεσμένου αέρα, ο αέρας πρέπει να είναι κορεσμένος.
4. **Περιοχή ακροφυσίου του πρώτου σταδίου του στροβίλου (στάδιο διαστολέα).** Αυτή είναι μια πολύ κρίσιμη παράμετρος και περιορίζει τη συνολική ροή αέρα εντός του τμήματος στροβίλου, με συνέπεια αυτό να περιορίζει την ποσότητα έγχυσης του ατμού ή την ποσότητα έγχυσης του θερμαινόμενου και υγροποιημένου συμπιεσμένου αέρα.
5. **Έλεγχος απότομης αύξησης.** Όλα τα συστήματα έγχυσης θα απαιτούν σημαντικές τροποποιήσεις στο σύστημα ελέγχου για την πρόληψη έγχυσης μέχρι οι μονάδες να φθάσουν σε πλήρες φορτίο και να σταθεροποιηθεί η λειτουργία τους. Κατά τη διάρκεια του τερματισμού λειτουργίας, το σύστημα πρέπει πρώτα να τερματίσει τις αλλαγές του συστήματος έγχυσης. Αυτές οι αλλαγές είναι πολύ αναγκαίες για την πρόληψη των μονάδων από απότομες αυξήσεις.
6. **Οι εκπομπές NOx.** Η ποσότητα των εκπομπών NOx είναι πολύ κρίσιμη στις περισσότερες περιοχές όπου οι αεροστρόβιλοι χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας. Το όριο είναι περίπου 22 ppm και ο στόχος είναι να πέσει σε 9 ppm. Οι τεχνικές που προσφέρονται εδώ είναι όλες φιλικές ως προς τις NOx εκπομπές, ως προς το ότι δεν αυξάνουν τα τωρινά επίπεδα τους. Στην πραγματικότητα, στην περίπτωση των συστημάτων έγχυσης, τόσο ο ατμός όσο και θερμαινόμενος και υγροποιημένος συμπιεσμένος αέρας θα μειώσουν τις εκπομπές NOx, καθιστώντας τη μονάδα περισσότερο φιλική προς το περιβάλλον, ιδιαίτερα σε αυτή την κρίσιμη περιοχή.
7. **Συστήματα ελέγχου.** Το κόστος σε όλα αυτά τα συστήματα έχουν λάβει υπόψη οι τροποποιήσεις των συστημάτων ελέγχου. Τα συστήματα ελέγχου στις περισσότερες από αυτές τις περιπτώσεις θα πρέπει να είναι νέα για να ληφθεί υπόψη η έγχυση ατμού και του θερμαινόμενου και υγροποιημένου συμπιεσμένου αέρα, του HRSG και όλους τους εξοπλισμούς τους που σχετίζονται, όπως οι αντλίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Χαρακτηριστικά αποδόσεων στροβίλου και συμπιεστή.

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται τα συνολικά χαρακτηριστικά απόδοσης των συμπιεστών και των στροβίλων. Αυτό το υλικό παρουσιάζεται εδώ για να μελετηθεί η συμπεριφορά αυτών των μηχανών, που ταξινομούνται υπό την ευρεία έννοια των "στροβιλομηχανών". Οι αντλίες και οι συμπιεστές χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πίεσης και οι στροβίλοι παράγουν ενέργεια. Τα μηχανήματα αυτά έχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά. Το κύριο στοιχείο είναι ένας ρότορας με λεπίδες ή σταθερά πτερύγια και η διαδρομή του ρευστού στο ρότορα μπορεί να είναι αξονική, ακτινική, ή ένας συνδυασμός και των δύο.

Υπάρχουν τρεις μέθοδοι μελέτης των στοιχείων της λειτουργίας των στροβιλομηχανών. Πρώτον, με την εξέταση των δυνάμεων και διαγραμμάτων ταχύτητας, είναι δυνατόν να ανακαλύψουμε μερικές γενικές σχέσεις μεταξύ χωρητικότητας, πίεσης, ταχύτητας και δύναμης. Δεύτερον, ο ολοκληρωμένος πειραματισμός μπορεί να αναλάβει να μελετήσει τις σχέσεις μεταξύ των διαφορετικών μεταβλητών. Τρίτον, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η πραγματική μηχανική, μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει διαστατική ανάλυση για να αποκομίσει μια σειρά από παράγοντες των οποίων η ομαδοποίηση μπορεί να ρίξει φως στη συνολική συμπεριφορά. Η ανάλυση που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζει τα τυπικά διαγράμματα απόδοσης που μπορεί να αναμένει κανείς από τις στροβιλομηχανές. Η απόδοση του εκτός λειτουργίας σχεδιασμού είναι επίσης σημαντική για την κατανόηση των τάσεων και καμπυλών λειτουργίας.

3.1. Αεροθερμοδυναμική στροβιλομηχανών.

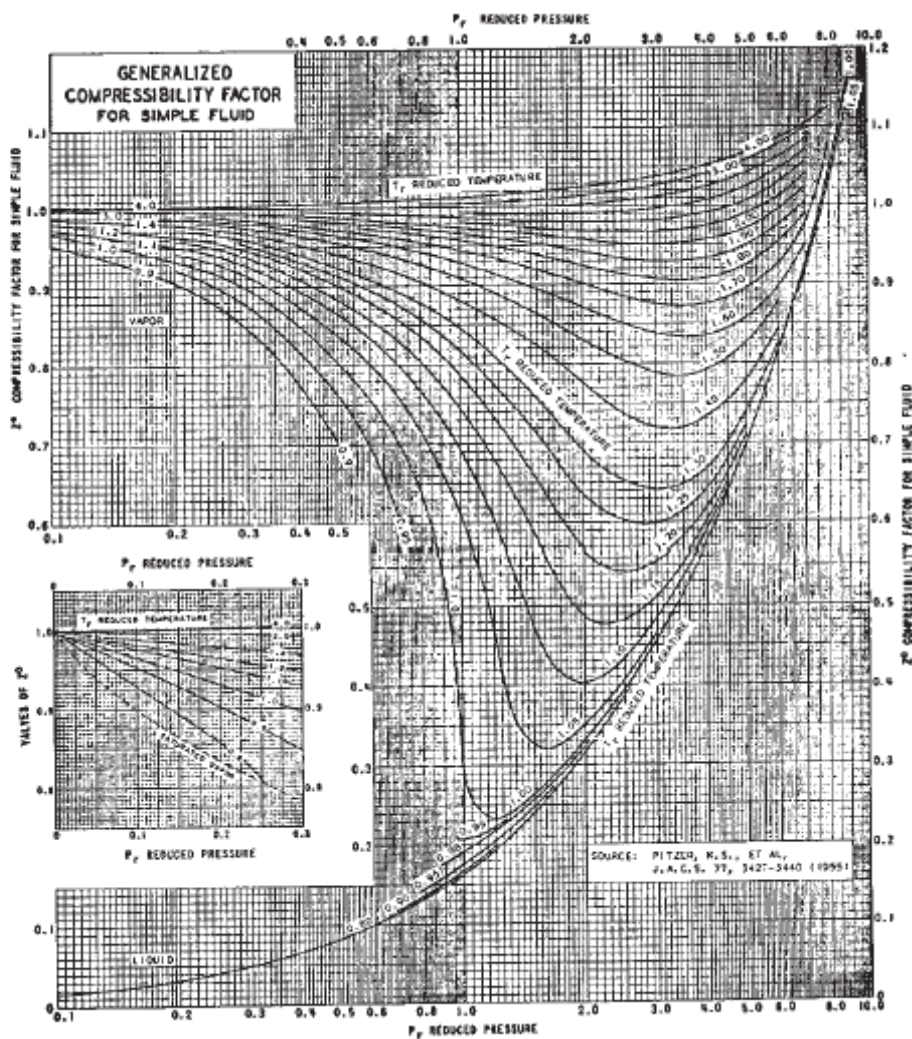
Η κίνηση ενός αερίου μπορεί να μελετηθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους: (1) η κίνηση του κάθε σωματιδίου αερίου μπορεί να μελετηθεί για να προσδιοριστεί η θέση του, η ταχύτητα, η επιτάχυνση και η διακύμανση κατάστασης με το χρόνο και (2) κάθε σωματίδιο μπορεί να μελετηθεί για να προσδιοριστεί η διακύμανση στην ταχύτητα, την επιτάχυνση και την κατάσταση των διαφόρων σωματιδίων σε κάθε θέση στο χώρο και στο χρόνο. Κατά τη μελέτη της κίνησης του κάθε σωματιδίου του υγρού, μελετούμε την Lagrangian κίνηση. Στη μελέτη για το χωρικό σύστημα μελετούμε την Eulerian κίνηση. Αυτή η πτυχιακή θα εξετάσει την Eulerian κίνηση της ροής. Η ροή θα θεωρείται πλήρως περιγεγραμμένη, εάν προσδιορίζονται οι ιδιότητες μεγέθους, η κατεύθυνση και η θερμοδυναμική του αερίου σε κάθε σημείο στο χώρο.

Για να κατανοήσουμε τη ροή σε στροβιλομηχανές, η κατανόηση των βασικών σχέσεων της πίεσης, της θερμοκρασίας και του τύπου της ροής πρέπει να αποκτηθεί. Ιδανική ροή σε στροβιλομηχανές υπάρχει όταν δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας μεταξύ του αερίου και των περιχώρων της και η εντροπία του αερίου παραμένει αμετάβλητη. Αυτό το είδος της ροής χαρακτηρίζεται ως *αναστρέψιμη αδιαβατική ροή*. Για να περιγράψουμε αυτή τη ροή, οι συνολικές και στατικές συνθήκες πίεσης, θερμοκρασίας και η έννοια ενός ιδανικού αερίου πρέπει να γίνουν κατανοητά.

3.1.1. Ιδανικό αέριο.

Το ιδανικό αέριο υπακούει στην εξίσωση της κατάστασης: $PV = MRT$ ή $P / \rho = MRT$, όπου P η πίεση, V ο όγκος, ρ η πυκνότητα, M η μάζα, T η θερμοκρασία του αερίου και R η σταθερά αερίου ανά μονάδα μάζας που είναι ανεξάρτητη από την πίεση και τη θερμοκρασία. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι νόμοι των ιδανικών αερίων είναι επαρκείς για να περιγράψουν τη ροή στο 5% των πραγματικών συνθηκών. Όταν οι νόμοι των ιδανικών αερίων δεν ισχύουν, ο συντελεστής συμπιεστότητας του αερίου Z μπορεί να δοθεί από:

$$Z(P,T) = \frac{PV}{RT} \quad (3-1)$$



Εικόνα 3-1 : Γενικός συντελεστής συμπιεστότητας για απλό υγρό.

Η Εικόνα 3-1 δείχνει τη σχέση μεταξύ του συντελεστή συμπιεστότητας με την πίεση και τη θερμοκρασία, διατυπωμένη από πλευράς ελαττωμένης πίεσης και θερμοκρασίας:

$$P_r = \frac{F}{F_c}, T_r = \frac{T}{T_c} \quad (3-2)$$

όπου P_c και T_c είναι η πίεση και η θερμοκρασία του αερίου στο κρίσιμο σημείο αντίστοιχα.

Στατική πίεση είναι η πίεση του κινούμενου ρευστού. Η στατική πίεση ενός αερίου είναι ίδια σε όλες τις κατευθύνσεις και είναι μία συνάρτηση βαθμωτού σημείου. Είναι δυνατόν να μετρηθεί με τρύπημα μιας οπής εντός του σωλήνα και με τη διατήρηση του ακροθέτη συνεπίπεδο με το τοίχωμα του σωλήνα.

Ολική πίεση είναι η πίεση του αερίου σε κατάσταση ηρεμίας με ένα αναστρέψιμο αδιαβατικό τρόπο. Είναι δυνατόν να μετρηθεί από ένα σωλήνα Pitot, τοποθετημένο στο ρεύμα ροής. Το αέριο έρχεται να ξεκουραστεί στο άκρο του καθετήρα. Η σχέση μεταξύ της ολικής και της στατικής πίεσης δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$P_1 = P_s + \frac{\rho V^2}{2g_c} \quad (3-3)$$

όπου $\frac{\rho V^2}{2g_c}$ είναι η δυναμική πίεση που υποδηλώνει την ταχύτητα του κινούμενου αερίου.

Στατική θερμοκρασία είναι η θερμοκρασία του ρέοντος αερίου. Αυτή η θερμοκρασία αυξάνεται λόγω της τυχαίας κίνησης των μορίων του ρευστού. Η στατική θερμοκρασία μπορεί να μετρηθεί μόνο με μια μέτρηση σε κατάσταση ηρεμίας σε σχέση με το κινούμενο αέριο. Η μέτρηση της στατικής θερμοκρασίας αποτελεί ένα δύσκολο, αν όχι αδύνατο, έργο.

Ολική θερμοκρασία είναι η αύξηση της θερμοκρασίας στο αέριο, εάν η ταχύτητα του είναι σε κατάσταση ηρεμίας με ένα αναστρέψιμο αδιαβατικό τρόπο. Η ολική θερμοκρασία μπορεί να μετρηθεί με την εισαγωγή ενός θερμοστοιχείου, *RTD*, ή θερμομέτρου στο ρεύμα του ρευστού. Η σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και ολικής στατικής θερμοκρασίας μπορεί να δοθεί από τη σχέση:

$$T_t = T_s + \frac{V^2}{2c_p g_c} \quad (3-4)$$

3.1.2. Επίδραση συμπίεστούτητας.

Η επίδραση της συμπίεστούτητας είναι σημαντική σε μηχανές με μεγάλο αριθμό Mach. Ο αριθμός *Mach* είναι ο λόγος της ταχύτητας με την ταχύτητα του ήχου ενός αερίου σε μία δεδομένη θερμοκρασία $M = V / a$. Η ταχύτητα του ήχου ορίζεται ως ο λόγος μεταβολής της πίεσης του αερίου σε σχέση με την πυκνότητά του, εάν η εντροπία διατηρείται σταθερή:

$$\alpha^2 \equiv \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{s=c} \quad (3-5)$$

Στα ασυμπίεστα ρευστά, η τιμή της ταχύτητας του ήχου τείνει προς το άπειρο. Για ισεντροπική ροή, η εξίσωση της κατάστασης για τα ιδανικά αέρια μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\frac{P}{\rho^{\gamma}} = \text{const}$$

Οπότε:

$$\ln P - \gamma \ln \rho = \text{const} \quad (3-6)$$

Διαφοροποιώντας την προηγούμενη εξίσωση, θα έχουμε την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{dP}{P} - \gamma \frac{d\rho}{\rho} = 0 \quad (3-7)$$

Για μια ισεντροπική ροή, η ταχύτητα του ήχου μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$a^2 = \frac{dP}{d\rho}$$

Οπότε έχουμε:

$$a^2 = \gamma \frac{P}{\rho} \quad (3-8)$$

Αντικαθιστώντας την γενική εξίσωση της κατάστασης και τον ορισμό της ταχύτητας του ήχου, παίρνουμε την ακόλουθη εξίσωση:

$$a^2 = \gamma g_c R T_s \quad (3-9)$$

όπου T_s (στατική θερμοκρασία) είναι η θερμοκρασία του ρεύματος του κινουμένου αερίου.

Επειδή η στατική θερμοκρασία δεν μπορεί να μετρηθεί, η τιμή της στατικής θερμοκρασίας πρέπει να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις της στατικής πίεσης, της ολικής πίεσης και της θερμοκρασίας. Η σχέση μεταξύ της στατικής και ολικής θερμοκρασίας δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{T_t}{T_s} = 1 + \frac{V^2}{2g_c c_p T_s} \quad (3-10)$$

όπου η ειδική θερμότητα c_p σε σταθερό όγκο μπορεί να γραφτεί:

$$c_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1} \quad (3-11)$$

και όπου γ είναι ο λόγος της ειδικών θερμότητων:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (3-10) και (3-11) έχουμε την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{T_t}{T_s} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \quad (3-12)$$

Η σχέση μεταξύ των ολικών και στατικών συνθηκών είναι ισεντροπική. Συνεπώς:

$$\frac{T_t}{T_s} = \left(\frac{P_t}{P_s} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \quad (3-13)$$

και η σχέση μεταξύ της ολικής και στατικής πίεσης μπορεί να γραφτεί:

$$\frac{P_t}{P_s} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (3-14)$$

Με τη μέτρηση της ολικής και στατικής πίεσης και χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3-14), ο αριθμός Mach μπορεί να υπολογιστεί. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3-12), η στατική θερμοκρασία μπορεί να υπολογιστεί, εφόσον η συνολική θερμοκρασία μπορεί να μετρηθεί. Τέλος, χρησιμοποιώντας τον ορισμό του αριθμού Mach, η ταχύτητα του ρεύματος αερίου μπορεί να υπολογιστεί.

3.2. Αεροθερμικές εξισώσεις.

Το ρεύμα αερίου μπορεί να οριστεί από τις τρεις βασικές αεροθερμικές εξισώσεις: (1) της συνέχειας, (2) της ορμής και (3) της ενέργειας.

3.2.1. Εξίσωση συνέχειας.

Η εξίσωση της συνέχειας είναι μια μαθηματική διατύπωση του νόμου της διατήρησης της μάζας ενός αερίου που είναι συνεχές. Ο νόμος της διατήρησης της μάζας αναφέρει ότι η μάζα του όγκου που κινείται με το ρευστό, παραμένει αμετάβλητη:

$$\dot{m} = \rho AV$$

όπου:

\dot{m} = ρυθμός ροής μάζας.

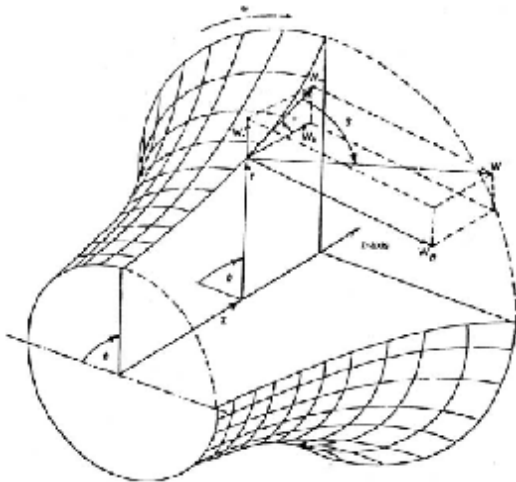
ρ = πυκνότητα του ρευστού.

A = εμβαδόν διατομής.

V = ταχύτητα αερίου.

Η προηγούμενη εξίσωση μπορεί να γραφτεί με τη μορφή διαφορικού:

$$\frac{dA}{A} + \frac{dV}{V} + \frac{d\rho}{\rho} = 0 \quad (3-15)$$



Εικόνα 3-2 : Διανύσματα ταχύτητας στη ροή του ρότορα του συμπιεστή.

3.2.2. Εξίσωση ορμής.

Η εξίσωση της ορμής είναι μια μαθηματική διατύπωση του νόμου της διατήρησης της ορμής. Αναφέρει ότι ο ρυθμός μεταβολής σε γραμμική ορμή ενός όγκου που κινείται με ένα ρευστό, είναι ίσος με τις δυνάμεις της επιφάνειας και του σώματος που ενεργούν σε ένα ρευστό. Η Εικόνα 3-2 δείχνει τις συνιστώσες ταχύτητας σε μια γενικευμένη στροβιλομηχανή. Τα διανύσματα ταχύτητας όπως φαίνονται, επιλύονται σε τρεις αλληλοϋποστηριζόμενες κάθετες συνιστώσες: την αξονική (V_a), την εφαπτομενική (V_θ) και την ακτινική (V_m).

Με την εξέταση κάθε μίας από αυτές τις ταχύτητες, μπορούμε να παρατηρήσουμε τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: η μεταβολή του μεγέθους της αξονικής ταχύτητας οδηγεί σε αύξηση μιας αξονικής δύναμης η οποία παραλαμβάνεται από ένα ωστικό έδρανο (ρουλεμάν) και η αλλαγή στην ακτινική ταχύτητα οδηγεί σε μία ακτινική δύναμη η οποία λαμβάνεται από το έδρανο του στροφέα άξονα. Η εφαπτομενική συνιστώσα είναι η μόνη συνιστώσα που προκαλεί μια δύναμη που αντιστοιχεί σε αλλαγή της στροφορμής. Οι άλλες δύο συνιστώσες της ταχύτητας δεν έχουν καμία επίδραση σε αυτή τη δύναμη, με εξαίρεση το τι μπορεί να προκύψει από την τριβή των εδράνων.

Με την εφαρμογή της αρχής διατήρησης της ορμής, η μεταβολή της στροφορμής που προκύπτει από την αλλαγή της εφαπτομενικής ταχύτητας είναι ίση με το άθροισμα όλων των δυνάμεων που εφαρμόζονται στον ρότορα. Αυτό το άθροισμα είναι η καθαρή ροπή του ρότορα. Μια ορισμένη μάζα ρευστού εισέρχεται στην στροβιλομηχανή με μια αρχική ταχύτητα V_{θ_1} σε μία ακτίνα r_1 και εξέρχεται με μία εφαπτομενική ταχύτητα V_{θ_2} σε μια ακτίνα r_2 . Υποθέτοντας ότι ο ρυθμός ροής της μάζας μέσω της στροβιλομηχανής παραμένει αμετάβλητος, η ροπή στρέψης που ασκείται από τη μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας μπορεί να γραφεί:

$$\tau = \dot{m} \frac{r}{g_c} (r_1 V_{\theta_1} - r_2 V_{\theta_2}) \quad (3-16)$$

Ο ρυθμός μεταβολής της μεταφοράς ενέργειας είναι το προϊόν της ροπής και της γωνιακής ταχύτητας (ω).

$$\tau \omega = \dot{m} \frac{r}{g_c} (r_1 \omega V_{\theta_1} - r_2 \omega V_{\theta_2}) \quad (3-17)$$

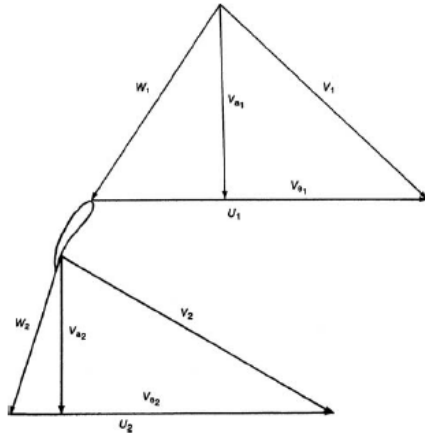
Έτσι, η συνολική μεταφορά ενέργειας μπορεί να γραφεί:

$$E = \dot{m} \frac{r}{g_c} (U_1 V_{\theta_1} - U_1 V_{\theta_2}) \quad (3-18)$$

όπου U_1 και U_2 είναι η γραμμική ταχύτητα του ρότορα κατά την αντίστοιχη ακτίνα. Η προηγούμενη σχέση ανά μονάδα ροής μάζας μπορεί να γραφεί:

$$H = \frac{1}{g_c} (U_1 V_{\theta_1} - U_1 V_{\theta_2}) \quad (3-19)$$

όπου H είναι η μεταφορά ενέργειας ανά μονάδα ροής μάζας ή πίεσης του ρευστού. Η εξίσωση (3-19) είναι γνωστή ως εξίσωση στροβίλου του Euler.



Εικόνα 3-3 : Τρίγωνα ταχύτητας για συμπιεστή αξονικής ροής.

Η εξίσωση της κίνησης, όπως δίνεται από την άποψη της στροφορμής μπορεί να μετατραπεί σε άλλες μορφές που είναι πιο εύκολες για την κατανόηση μερικών βασικών συνιστωσών του σχεδιασμού. Για να κατανοήσουμε τη ροή σε μια στροβιλομηχανή, οι έννοιες της απόλυτης και σχετικής ταχύτητας πρέπει να αξιοποιηθούν. Απόλυτη ταχύτητα (V) είναι η ταχύτητα του αερίου σε σχέση με ένα σταθερό σύστημα συντεταγμένων. Σχετική ταχύτητα (W) είναι η ταχύτητα σε σχέση με τον ρότορα. Στις στροβιλομηχανές, ο αέρας που εισέρχεται στο ρότορα θα έχει μία συνιστώσα, σχετικής ταχύτητας παράλληλη στο περυγίο του ρότορα και μια συνιστώσα, απόλυτης ταχύτητας παράλληλη στα ακίνητα περυγία. Από μαθηματική άποψη, η σχέση αυτή γράφεται:

$$\bar{V} = \bar{W} \rightarrow \bar{U} \quad (3-20)$$

όπου η απόλυτη ταχύτητα (V) είναι η αλγεβρική προσθήκη της σχετικής ταχύτητας (W) και της γραμμικής ταχύτητας του ρότορα (U). Η απόλυτη ταχύτητα μπορεί να διαχωριστεί στις συνιστώσες της, την ακτινική ή μέση ταχύτητα (V_m) και την εφαπτομενική συνιστώσα (V_θ). Από την Εικόνα 3-3, προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$V_1^2 = V_{\theta_1}^2 + V_{m_1}^2$$

$$V_2^2 = V_{\theta_2}^2 + V_{m_2}^2$$

$$W_1^2 = (U_1 - V_{\theta_1})^2 + V_{m_1}^2$$

$$W_2^2 = (U_2 - V_{\theta_2})^2 + V_{m_2}^2 \quad (3-21)$$

Θέτοντας αυτές τις σχέσεις στην εξίσωση στροβίλου του Euler, η ακόλουθη σχέση προκύπτει:

$$H = \frac{1}{2gc} [(V_1^2 - V_2^2) + (U_1^2 - U_2^2) + (W_2^2 - W_1^2)] \quad (3-22)$$

3.2.3. Εξίσωση ενέργειας.

Η εξίσωση της ενέργειας είναι η μαθηματική διατύπωση του νόμου διατήρησης της ενέργειας. Αναφέρει ότι ο ρυθμός με τον οποίο η ενέργεια εισέρχεται του όγκου ενός κινούμενου ρευστού είναι ίση με την ταχύτητα με την οποία η εργασία γίνεται με το περιβάλλον από το ρευστό εντός του όγκου και του ρυθμού με τον οποίο η ενέργεια αυξάνεται εντός του κινούμενου υγρού. Η ενέργεια σε ένα κινούμενο ρευστό αποτελείται από εσωτερική, τη ροή, κινητική και δυναμική ενέργεια:

$$\epsilon_1 + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2g_c} + Z_1 + {}_1Q_2 = \epsilon_2 + \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2g_c} + Z_2 + {}_1(E\rho\gamma o)_2 \quad (3-23)$$

Για ισεντροπική ροή, η εξίσωση της ενέργειας μπορεί να γραφεί ως εξής, σημειώνοντας ότι η προσθήκη της εσωτερικής και της ροής ενεργειών μπορεί να γραφτεί όπως η ενθαλπία:

$${}_1(E\rho\gamma o)_2 = (h_1 - h_2) + \left(\frac{V_1^2}{2g_n} - \frac{V_2^2}{2g_n} \right) + (Z_1 - Z_2) \quad (3-24)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις της ενέργειας και της ορμής παρέχει τις ακόλουθες σχέσεις:

$$(h_1 - h_2) + \left(\frac{V_1^2}{2g_c} - \frac{V_2^2}{2g_c} \right) + (Z_1 - Z_2) = \frac{1}{g_c} [U_1 V_{\theta_1} - U_2 V_{\theta_2}] \quad (3-25)$$

Υποθέτοντας ότι δεν υπάρχει καμία μεταβολή στο δυναμικό ενέργειας, η εξίσωση μπορεί να γραφεί:

$$\left(h_1 + \frac{V_1^2}{2g_c} \right) - \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2g_c} \right) + (h_{1r} - h_{2r}) = \frac{1}{g_c} [U_1 V_{\theta_1} - U_2 V_{\theta_2}] \quad (3-26)$$

Υποθέτοντας ότι το αέριο είναι θερμικά και θερμιδικά τέλει, η εξίσωση μπορεί να γραφεί:

$$T_{1r} - T_{2r} = \frac{1}{c_p g_c} [U_1 V_{\theta_1} - U_2 V_{\theta_2}] \quad (3-27)$$

Για ισεντροπική ροή:

$$\frac{T_{2r}}{T_{1r}} = \left(\frac{P_{2r}}{P_{1r}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (3-28)$$

Με τον συνδυασμό των εξισώσεων (3-27) και (3-28) έχουμε:

$$T_{1r} \left[1 - \left(\frac{P_{2r}}{P_{1r}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] = \frac{1}{c_p g_c} [U_1 V_{\theta_1} - U_2 V_{\theta_2}] \quad (3-29)$$

3.3. Αποδόσεις.

3.3.1. Αδιαβατική απόδοση.

Το έργο σε ένα συμπιεστή ή στρόβιλο υπό ιδανικές συνθήκες λαμβάνει χώρο υπό σταθερή εντροπία, όπως φαίνεται στις Εικόνες 3-4 και 3-5, αντίστοιχα. Το πραγματικό έργο που πραγματοποιείται υποδεικνύεται από τη διακεκομμένη γραμμή. Η ισεντροπική απόδοση του συμπιεστή μπορεί να γραφτεί αν λάβουμε υπόψη το σύνολο των αλλαγών στην ενθαλπία:

$$\eta_{\text{αδ}_\tau} = \frac{\text{Ισεντροπικό Έργο}}{\text{Πραγματικό Έργο}} = \frac{(h_{2\tau} - h_{4\tau})_{\text{id}}}{(h_{2\tau} - h_{4\tau})_{\text{act}}} \quad (3-30)$$

Αυτή η εξίσωση μπορεί να ξαναγραφεί για ένα θερμικά και θερμοδυναμικά τέλει αέριο από την άποψη της ολικής πίεσης και της θερμοκρασίας ως εξής:

$$\eta_{\text{αδ}_\tau} = \left[\left(\frac{P_{2\tau}}{P_{4\tau}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] / \left[\frac{T_{2\tau}}{T_{4\tau}} - 1 \right] \quad (3-31)$$

Η διαδικασία μεταξύ 1 και 2 μπορεί να οριστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{P}{\rho^n} = \text{const} \quad (3-32)$$

όπου n είναι μια πολυτροπική διαδικασία. Η αδιαβατική απόδοση μπορεί κατόπιν να δοθεί από:

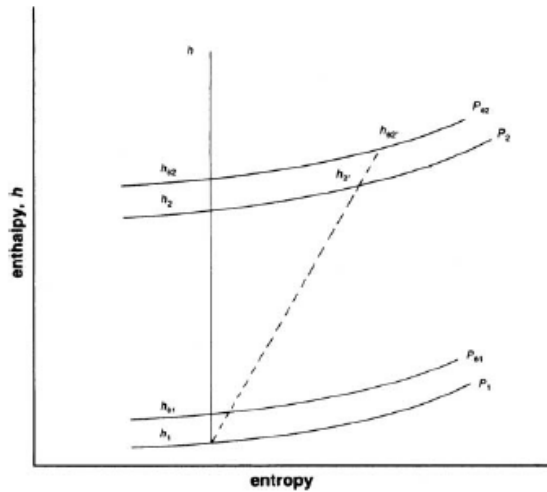
$$\eta_{\text{αδ}_\tau} = \left[\left(\frac{P_{2\tau}}{P_{4\tau}} \right)^{\frac{\gamma-n}{\gamma}} - 1 \right] / \left[\left(\frac{P_{2\tau}}{P_{4\tau}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (3-33)$$

Η ισεντροπική απόδοση του στρόβιλου μπορεί να γραφεί λαμβάνοντας υπόψη την μεταβολή της ολικής ενθαλπίας ως εξής:

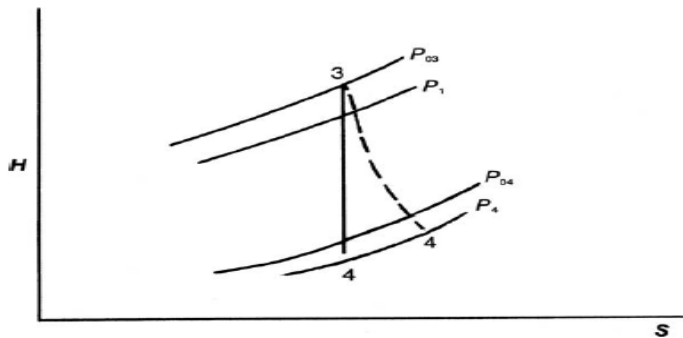
$$\eta_{\text{αδ}_\tau} = \frac{\text{Πραγματικό Έργο}}{\text{Ισεντροπικό Έργο}} = \frac{(h_{2\tau} - h_{4\tau}')}{(h_{2\tau} - h_{4\tau})} \quad (3-34)$$

Αυτή η εξίσωση μπορεί να ξαναγραφεί για ένα θερμικά και θερμοδυναμικά τέλει αέριο από την άποψη της συνολικής πίεσης και της θερμοκρασίας ως εξής:

$$\eta_{\text{αδ}_\tau} = \frac{\left[1 - \frac{T_{4\tau}'}{T_{2\tau}} \right]}{1 - \left(\frac{P_{4\tau}'}{P_{2\tau}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad (3-35)$$



Εικόνα 3-4 : Διάγραμμα εντροπίας-ενθαλπίας συμπίεστη.



Εικόνα 3-5 : Διάγραμμα εντροπίας-ενθαλπίας στροβίλου.

3.3.2. Πολυτροπική απόδοση.

Η πολυτροπική απόδοση είναι μια άλλη έννοια της απόδοσης που χρησιμοποιείται συχνά για την αξιολόγηση ενός συμπίεστη. Συχνά αναφέρεται ως απόδοση μικρού ή απειροελάχιστου σταδίου. Είναι η πραγματική αεροδυναμική απόδοση αποκλειστικά από την επίδραση της αναλογίας πίεσης. Η απόδοση είναι η ίδια όπως όταν το ρευστό είναι ασυμπίεστο και πανομοιότυπο με την υδραυλική απόδοση:

$$\eta_{pol} = \frac{\left[1 + \frac{dP_{2T}}{P_{2T}}\right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\left[1 + \frac{dP_{2T}}{P_{2T}}\right]^{\frac{\eta-1}{\eta}} - 1} \quad (3-36)$$

η οποία μπορεί να επεκταθεί αν υποθέσουμε ότι: $\frac{dP_{2T}}{P_{2T}} \ll 1$

Απαλείφοντας τους όρους εντός των αγκυλών, θα έχουμε την ακόλουθη σχέση:

$$n_{\text{pol}} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \quad (3-37)$$

Από την σχέση αυτή, είναι προφανές ότι η πολυτροπική απόδοση είναι η οριακή τιμή της ισεντροπικής απόδοσης καθώς η αύξηση της πίεσης προσεγγίζει το μηδέν και η τιμή της πολυτροπικής απόδοσης είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη της αδιαβατικής απόδοσης. Η Εικόνα 3-6 δείχνει τη σχέση μεταξύ αδιαβατικής και πολυτροπικής απόδοσης καθώς η αναλογία πίεσης στον συμπιεστή αυξάνει. Η Εικόνα 3-7 δείχνει τη σχέση σε ολόκληρο τον στρόβιλο.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό της πολυτροπικής απόδοσης είναι ότι η πολυτροπική απόδοση μιας μονάδας πολλαπλών σταδίων είναι ίση με την απόδοση του σταδίου αν κάθε στάδιο έχει την ίδια απόδοση.

3.4. Διαστατική Ανάλυση.

Οι στροβιλομηχανές μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους με *διαστατική ανάλυση*. Η ανάλυση αυτή έχει διάφορους τύπους από γεωμετρικά παρόμοιες παραμέτρους. Η διαστατική ανάλυση είναι μια διαδικασία όπου οι μεταβλητές που αντιπροσωπεύουν μια φυσική κατάσταση, μειώνονται σε ομάδες, οι οποίες είναι αδιάστατες. Αυτές οι αδιάστατες ομάδες μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση της απόδοσης των διαφόρων τύπων των μηχανών μεταξύ τους. Η διαστατική ανάλυση όπως χρησιμοποιείται στις στροβιλομηχανές μπορεί να χρησιμοποιηθεί για: (1) σύγκριση δεδομένων από διάφορους τύπους μηχανών, που είναι μια χρήσιμη τεχνική για την εξέλιξη των περασμάτων πτερυγίων και των ίδιων των πτερυγίων, (2) επιλογή διαφόρων τύπων μονάδων με βάση τη μέγιστη απόδοση και το φορτίο πίεσης που απαιτείται και (3) πρόβλεψη μιας απόδοσης πρωτότυπου από δοκιμές που έγιναν σε ένα μικρότερο μοντέλο κλίμακας ή σε χαμηλότερες ταχύτητες.

Η διαστατική ανάλυση οδηγεί σε διάφορες αδιάστατες παραμέτρους, οι οποίες βασίζονται στη μάζα της διάστασης (M), στο μήκος (L), και τον χρόνο (T). Με βάση αυτά τα στοιχεία, μπορεί κανείς να λάβει διάφορες ανεξάρτητες παραμέτρους, όπως την πυκνότητα (ρ), το ιξώδες (μ), την ειδική ταχύτητα (N), τη διάμετρο (D) και την ταχύτητα (V). Οι ανεξάρτητες παράμετροι οδηγούν στην διαμόρφωση διαφόρων αδιάστατων ομάδων, οι οποίες χρησιμοποιούνται στην μηχανική ρευστών των στροβιλομηχανών. Ο αριθμός Reynolds είναι ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις ιξώδους.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (3-38)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του αερίου, V η ταχύτητα, D η διάμετρος της περωτής, και μ το ιξώδες του αερίου.

Η ειδική ταχύτητα συγκρίνει το ποσοστό φορτίου και ροής σε γεωμετρικά παρόμοιες μηχανές, σε διάφορες ταχύτητες:

$$N_s = \frac{N \sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (3-39)$$

όπου H είναι το αδιαβατικό φορτίο, Q η αναλογία όγκου και N η ταχύτητα.

Η ειδική διάμετρος συγκρίνει το ποσοστό φορτίου και ροής σε γεωμετρικά παρόμοιες μηχανές σε διαφορετικές διαμέτρους:

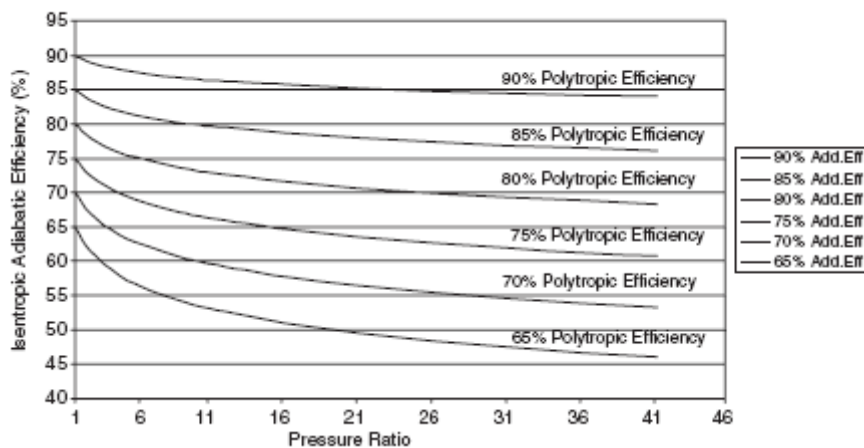
$$D_s = \frac{DH^{1/4}}{\sqrt{Q}} \quad (3-40)$$

Ο συντελεστής ροής είναι η χωρητικότητα του ρυθμού ροής εκφρασμένη σε αδιάστατη μορφή:

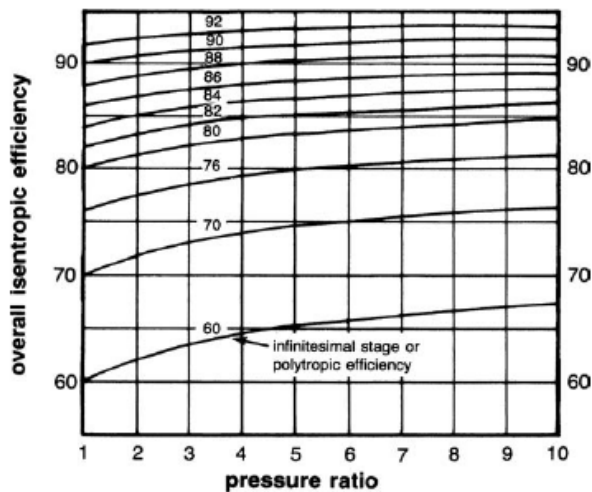
$$\phi = \frac{Q}{ND^3} \quad (3-41)$$

Ο συντελεστής πίεσης είναι η πίεση ή αύξηση πίεσης που εκφράζεται σε αδιάστατη μορφή:

$$\psi = \frac{H}{N^2 D^2} \quad (3-42)$$



Εικόνα 3-6 : Σχέση μεταξύ αδιαβατικής και πολυτροπικής απόδοσης.



Εικόνα 3-7 : Ολική και πολυτροπική απόδοση διαστολής.

Οι προηγούμενες εξισώσεις είναι μερικές από τις σημαντικότερες αδιάστατες παραμέτρους. Η ροή για να παραμένει δυναμικά ίδια, πρέπει να παραμένουν σταθερές όλες οι παράμετροι, ωστόσο, η σταθερότητα δεν είναι δυνατή με την πρακτική έννοια, οπότε κάποιος πρέπει να κάνει επιλογές.

Κατά την επιλογή σε στροβιλομηχανές η επιλογή της ειδικής ταχύτητας και ειδικής διαμέτρου καθορίζει τον πιο κατάλληλο συμπιεστή (Εικόνα 3-8α) και στρόβιλο (Εικόνα 3-8β). Είναι προφανές από την Εικόνα 3-8α ότι το υψηλό φορτίο και η χαμηλή ροή απαιτούν μια μονάδα θετικής μετατόπισης, το μέσο φορτίο και η μέση ροή απαιτούν μια φυγοκεντρική μονάδα και το χαμηλό φορτίο και η υψηλή ροή απαιτούν μονάδα αξονικής ροής. Η Εικόνα 3-8α δείχνει επίσης την απόδοση των διαφόρων τύπων των συμπιεστών. Αυτή η σύγκριση μπορεί να γίνει με τους διάφορους τύπους συμπιεστών. Ενώ τα αποτελέσματα από τις Εικόνες 3-8α και 3-8β μπορεί να ποικίλλουν με πραγματικές μηχανές, τα αποτελέσματα παρέχουν μια καλή ένδειξη του τύπου της στροβιλομηχανής που απαιτείται για το φορτίο στην υψηλότερη απόδοση.

Οι συντελεστές ροής και πίεσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό διαφόρων χαρακτηριστικών εκτός σχεδιασμού. Ο αριθμός Reynolds επηρεάζει τους υπολογισμούς ροής για τριβή επιφάνειας και κατανομή ταχύτητας.

Όταν χρησιμοποιούμε τη διαστατική ανάλυση στον υπολογισμό ή την πρόβλεψη της απόδοσης, με βάση δοκιμές που διεξάγονται σε μονάδες μικρότερης κλίμακας, δεν είναι φυσικά δυνατόν να κρατήσουμε όλες τις παραμέτρους σταθερές. Η παρέκκλιση των τελικών αποτελεσμάτων θα εξαρτάται από τον παράγοντα κλιμάκωσης και τη διαφορά στο ρευστό μέσο. Είναι σημαντικό σε κάθε τύπο αδιάστατης μελέτης να καταλάβουμε το όριο των παραμέτρων και ότι η γεωμετρική κλιμάκωση των παρόμοιων παραμέτρων πρέπει να παραμένει σταθερή.

Πολλές κλιμακώσεις έχουν αναπτύξει σημαντικά προβλήματα εξαιτίας της πίεσης, των δονήσεων και άλλων δυναμικών παραγόντων που δεν εξετάστηκαν.

3.5. Χαρακτηριστικά απόδοσης συμπιεστή.

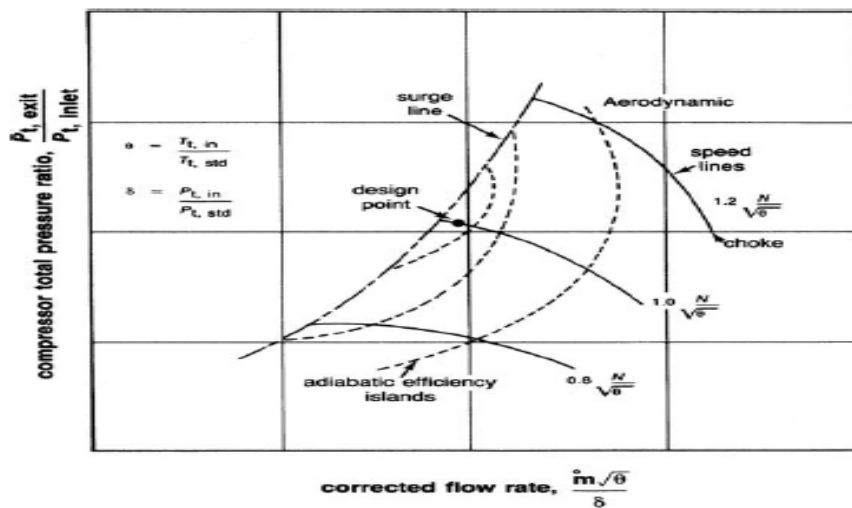
Η απόδοση του συμπιεστή μπορεί να αναπαρασταθεί με ποικίλους τρόπους. Η κοινώς αποδεκτή πρακτική είναι να σχεδιάσουμε τις γραμμές της ταχύτητας ως συνάρτηση της πίεσης και της ροής. Η Εικόνα 3-9 είναι ένας χάρτης αποδόσεων για φυγοκεντρικό συμπιεστή. Οι σταθερές γραμμές της ταχύτητας που φαίνονται στην Εικόνα 3-9 είναι σταθερές αεροδυναμικές γραμμές ταχύτητας και όχι σταθερές μηχανικές γραμμές ταχύτητας.

Οι πραγματικοί ρυθμοί ροής μάζας και ταχύτητας διορθώθηκαν με τους παράγοντες $(\sqrt{\theta}/\delta)$ και $(1/\sqrt{\theta})$ αντιστοίχως, αντικατοπτρίζοντας μεταβολές στην θερμοκρασία εισόδου και στην πίεση. Η γραμμή απότομης αύξησης ενώνεται με διάφορες γραμμές ταχύτητας όπου η λειτουργία του συμπιεστή γίνεται ασταθής. Ένας συμπιεστής έχει απότομη αύξηση, όταν η κύρια ροή μέσω ενός συμπιεστή αντιστρέφει την κατεύθυνση για σύντομα χρονικά διαστήματα, κατά τη διάρκεια των οποίων η αντίθλιψη (έξοδος) μειώνεται και η κύρια ροή παραμένει στη σωστή κατεύθυνσή της. Αυτή η διαδικασία ακολουθείται από αύξηση της αντίθλιψης, προκαλώντας την κύρια ροή να αντιστραφεί. Αν επιτραπεί να συνεχιστεί, η ασταθής αυτή διαδικασία μπορεί να οδηγήσει σε ανεπανόρθωτη βλάβη στη μηχανή. Οι γραμμές σταθερής αδιαβατικής απόδοσης (μερικές φορές ονομάζονται "νησιά" απόδοσης) και είναι επίσης χαραγμένα στον χάρτη του συμπιεστή. Η κατάσταση που είναι γνωστή ως σημείο "στραγγαλισμού" δείχνει τον μέγιστο ρυθμό ροής μάζας πιθανόν μέσω ενός συμπιεστή σε ταχύτητα λειτουργίας (Εικόνα 3-9). Ο ρυθμός ροής δεν μπορεί να αυξηθεί, δεδομένου πως στο σημείο αυτό είναι πολύ υψηλότερο από $Mach=1$ στην ελάχιστη περιοχή του συμπιεστή ή συμβαίνει ένα φαινόμενο γνωστό ως "πέτρινο τοίχο", προκαλώντας μία ταχεία μείωση στην απόδοση και την αναλογία πίεσης.

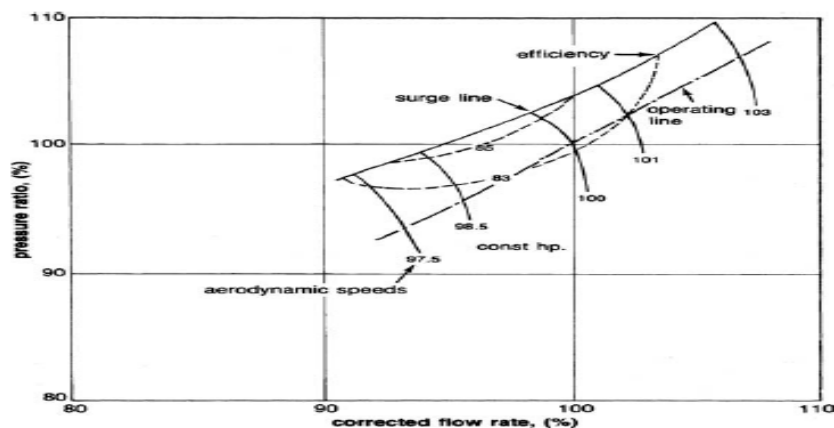
3.6. Χαρακτηριστικά απόδοσης στροβίλου.

Οι δύο τύποι στροβίλων, αξονικής-ροής και ακτινικής εισροής στρόβιλοι, μπορούν να διαιρεθούν περαιτέρω σε μονάδες τύπου ώθησης ή αντίδρασης. Οι στρόβιλοι ώθησης λαμβάνουν ολόκληρη την πτώση ενθαλπίας τους μέσω των ακροφυσίων, ενώ οι στρόβιλοι αντίδρασης λαμβάνουν μια μερική πτώση, τόσο μέσω των ακροφυσίων αλλά και των περυγίων στροφεύου.

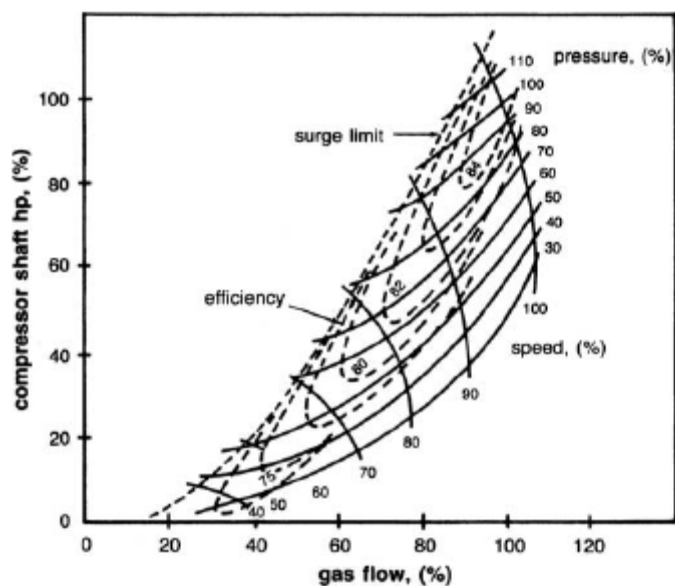
Οι δύο συνθήκες που ποικίλλουν περισσότερο σε έναν στρόβιλο, είναι η πίεση εισόδου και η θερμοκρασία. Δυο διαγράμματα απαιτούνται για την εμφάνιση των χαρακτηριστικών τους. Το διάγραμμα στην Εικόνα 3-12, είναι ένας χάρτης απόδοσης που δείχνει την επίδραση της θερμοκρασίας εισόδου του στροβίλου και της πίεσης, ενώ η ισχύς είναι εξαρτώμενη από την απόδοση της μονάδας, το ρυθμό ροής, και την διαθέσιμη ενέργεια (θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου). Η επίδραση της απόδοσης με ταχύτητα φαίνεται στην Εικόνα 3-13. Η Εικόνα 3-13 δείχνει επίσης τη διαφορά μεταξύ ενός στροβίλου ώθησης και ενός 50% αντίδρασης. Ένας στρόβιλος ώθησης είναι στρόβιλος μηδενικής αντίδρασης.



Εικόνα 3-9 : Χαρακτηριστικά απόδοσης τυπικού φυγοκεντρικού συμπιεστή.



Εικόνα 3-10 : Τυπικός χάρτης ροής για συμπιεστή αξονικής ροής.



Εικόνα 3-11 : Χάρτης τυπικού συμπιεστή, όπου οι γραμμές ταχύτητας είναι συνάρτηση της υποδύναμης και του ποσοστού ροής.

3.7. Υπολογισμός απόδοσης αεριοστροβίλου.

Τα ακόλουθα είναι ένας δειγματοληπτικός υπολογισμός από τις τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της απόδοσης ενός αεριοστροβίλου. Μια δοκιμή διεξήχθη σε G.E. μονάδα ενιαίου άξονα απλού κύκλου πλαισίου 5, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-14. Η ενέργεια των καυσαερίων από αυτή τη μονάδα ανακτήθηκε σε έναν λέβητα ανάκτησης θερμότητας, όπου με συμπληρωματική ανάφλεξη του αερίου, απέδωσε 175.000 lbs/hr (79.545 kg/hr) ατμού σε 655 psi (44,8 Bar) και 750°F (398°C). Είχε έναν μικρό ατμοστρόβιλο που λειτουργούσε ως μονάδα εκκίνησης. Η Εικόνα 3-15 είναι μια σχηματική απεικόνιση του συστήματος. Ο αεριοστρόβιλος λειτουργούσε από περίπου 25% φορτίο έως πλήρες φορτίο. Το πλήρες φορτίο ήταν αποφασισμένο ως επιλογή όταν οι αυτόματοι έλεγχοι του στροβίλου ανέλαβαν. Οι έλεγχοι αυτοί ενεργοποιούνται από τη θερμοκρασία των καυσαερίων.

Η Εικόνα 3-16 δείχνει την επίδραση της απόδοσης ως συνάρτηση του φορτίου τόσο για τον συμπιεστή όσο και για τον στρόβιλο. Οι αποδόσεις μερικού φορτίου του στροβίλου, επηρεάζονται περισσότερο από τις αποδόσεις του συμπιεστή. Η απόκλιση αποτελεσμάτων από τον συμπιεστή λειτουργώντας σε μία σχετικά σταθερή θερμοκρασία εισόδου, πίεση, και αναλογία πίεσης, ενώ η θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου είναι σε μεγάλο βαθμό μεταβληθείσα (Εικόνα 3-17).

Η αναλογία πίεσης στροβίλου, ωστόσο, παραμένει σχετικά σταθερή. Η αντίθλιψη στον στρόβιλο μετρήθηκε σε μία σχετικά σταθερή τιμή των 30,25 ιντσών Hg abs (1,02 bar). Αυτή η τιμή δημιουργεί μια αντίθλιψη περίπου 9 ιντσών H₂O (228 mm H₂O) στον στρόβιλο. Η απόδοση του συμπιεστή βασίζεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$n_c = \frac{T_{t1} \left[\left(\frac{P_{t2}}{P_{t1}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}{\Delta T_{act}} \quad (3-43)$$

όπου:

T_{t1} = θερμοκρασία εισόδου.

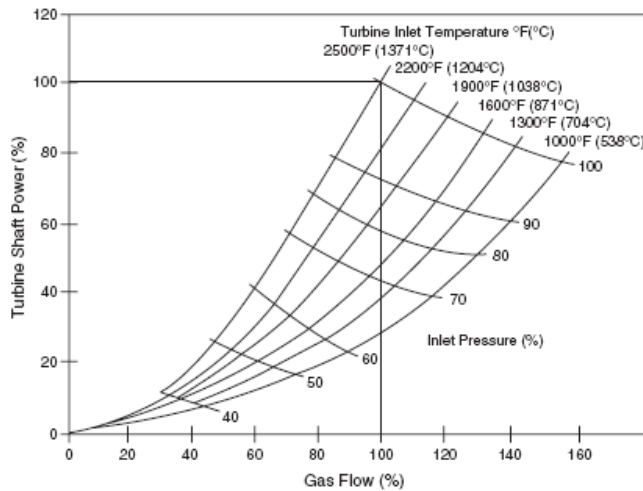
P_{t2} = πίεση στην έξοδο του συμπιεστή.

P_{t1} = πίεση στην είσοδο του συμπιεστή.

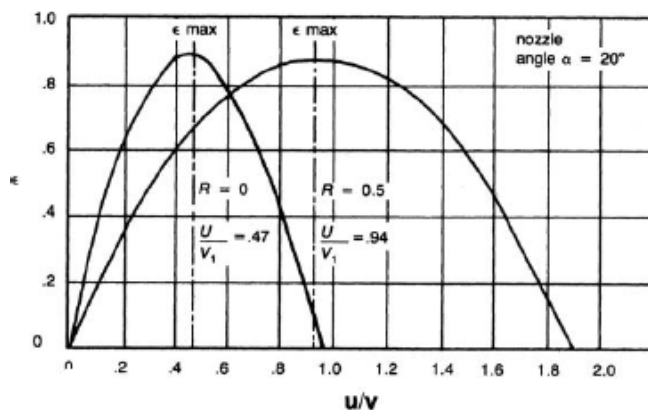
ΔT_{act} = αύξηση πραγματικής θερμοκρασίας στον συμπιεστή.

γ = συγκεκριμένη αναλογία θερμότητας, μέση τιμή μεταξύ θερμοκρασίας εξόδου και εισόδου που χρησιμοποιήθηκε.

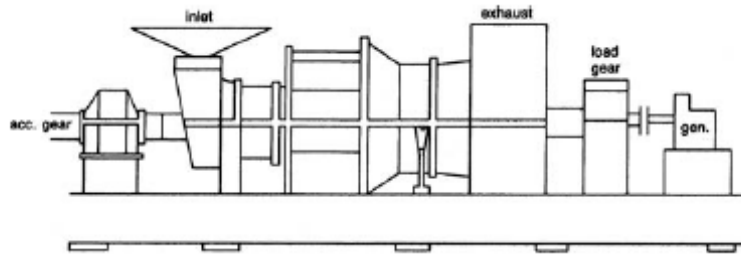
Ο υπολογισμός της απόδοσης του αεροστρόβιλου είναι πιο σύνθετος. Το πρώτο μέρος είναι ο υπολογισμός της θερμοκρασίας εισόδου του στροβίλου.



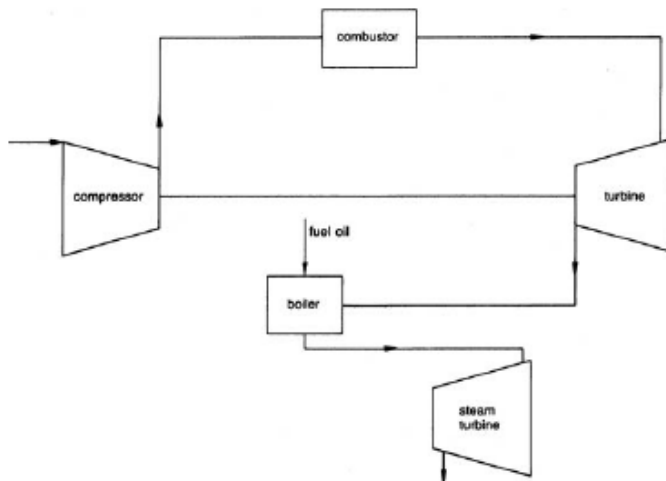
Εικόνα 3-12 : Χάρτης απόδοσης στροβίλου.



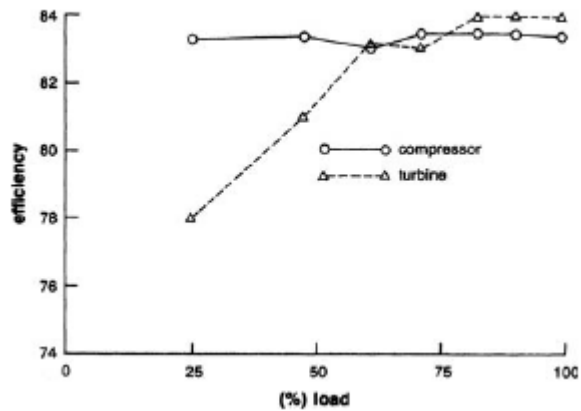
Εικόνα 3-13 : Μεταβολή του συντελεστή χρήσης με U/V_1 για $R=0$ και $R=0,5$.



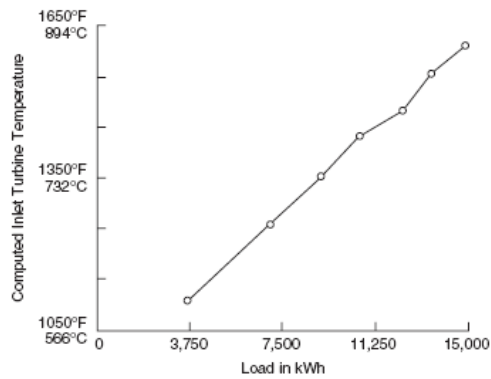
Εικόνα 3-14 : Τυπικός βιομηχανικός αεριοστρόβιλος.



Εικόνα 3-15 : Συνδυασμένος κύκλος αεριοστρόβιλου.



Διάγραμμα 3-16 : Απόδοση συμπιεστή και στροβίλου σε συνάρτηση με το φορτίο στροβίλου.



Εικόνα 3-17 : Θερμοκρασία εισόδου στροβίλου σε συνάρτηση με το φορτίο στροβίλου.

Ο υπολογισμός βασίζεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$T_{t3} = \frac{a c_{p2} T_{t2} + n_b f (LHV \text{ φυσικό αέριο})}{c_{p2} c_{p3} (m_f + m_a)} \quad (3-44)$$

όπου:

T_{t2} = θερμοκρασία στην έξοδο του συμπιεστή.

c_p = ειδική θερμότητα σε σταθερή πίεση.

m_f = ρυθμός ροής μάζας για το καύσιμο.

m_a = ρυθμός ροής της μάζας του αέρα.

n_b = απόδοση καύσης.

(LHV) = χαμηλότερη τιμή θέρμανσης του φυσικού αερίου που παρέχεται (950 Btu/cu ft [(35,426 kJ/cu m)] και ειδική βαρύτητα 0,557).

Η τιμή της ροής μάζας του αέρα ελήφθη με μέτρηση της ροής στην είσοδο του αεροστροβίλου χρησιμοποιώντας ένα ιονικό ταχύμετρο. Η Εικόνα 3-18 δείχνει τις τιμές που λαμβάνονται σε όλη την είσοδο. Αυτές οι τιμές παρέχουν ένα μέσο ρυθμό ροής των 720.868 lbs/hr (327,667 kg/hr). Αυτός ο ρυθμός ροής είναι με πειραματική ακρίβεια. Η πτώση της θερμοκρασίας στον στροβίλο βασίζεται σε ενεργειακό ισοζύγιο και δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\Delta T_{act} = \frac{W_{load}}{n_{gen} (m_f + a) c_{p avg}} + \frac{a}{(f + a)} \frac{c_{p avg}}{c_{p avg}} \Delta T_{act} \quad (3-45)$$

όπου:

W_{load} = παραγόμενο έργο της γεννήτριας σε kW.

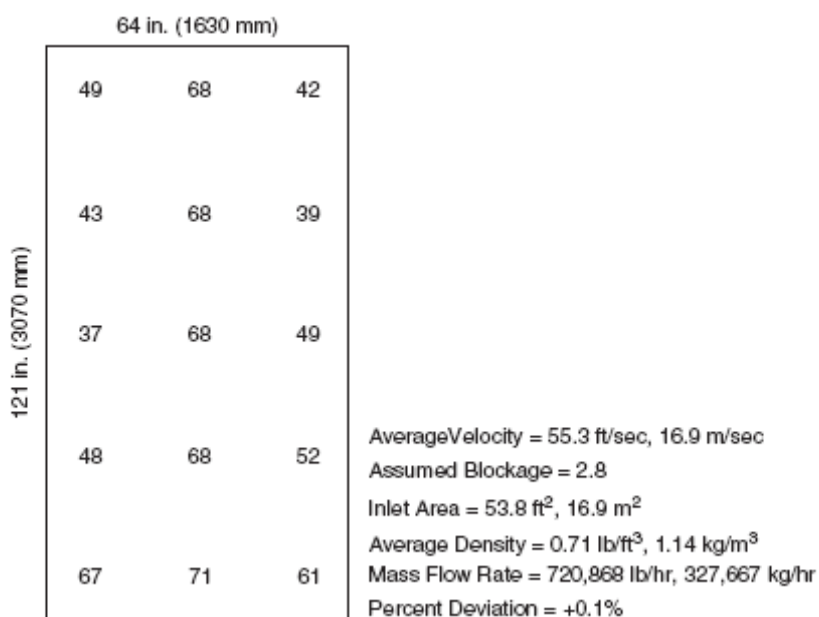
n_{gen} = απόδοση της γεννήτριας.

$c_{p avg}$ = μέση ειδική θερμότητα του στροβίλου.

$c_{p,cavg}$ = μέση ειδική θερμότητα του συμπιεστή.

ΔT_{act} = πτώση θερμοκρασίας στον στρόβιλο.

Η πτώση της θερμοκρασίας που υπολογίζεται με τον τρόπο αυτό συγκρίθηκε με την πτώση που υπολογίζεται αφαιρώντας τη μετρηθείσα μέση θερμοκρασία καυσαερίων, αναγνωσμένη από την θερμοκρασία εισόδου, όπως λαμβάνεται από την προηγούμενη εξίσωση. Η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο μεθόδων ήταν περίπου 20°C στην έξοδο υψηλής θερμοκρασίας. Η δεύτερη μέθοδος δίνει μια μικρότερη πτώση, υποδεικνύοντας ότι η θερμοκρασία που καταγράφει είναι χαμηλότερη από την πραγματική θερμοκρασία. Αυτό το αποτέλεσμα αναμενόταν, δεδομένου ότι τα θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν σε απόσταση και αντίθετη φορά από τα πτερύγια του στρόβιλου και δεν μετρούσαν την πραγματική θερμοκρασία των καυσαερίων. Αυτό το σχόλιο δεν είναι μια κριτική του πακέτου ελέγχου, δεδομένου ότι αυτό λειτουργεί με βασική θερμοκρασία καυσαερίων.



Εικόνα 3-18 : Ταχύτητα εισόδου για βιομηχανικό αεριοστρόβιλο.

Η απόδοση του στρόβιλου μπορεί τώρα να υπολογισθεί με τη χρήση της παρακάτω σχέσης:

$$n_t = \frac{\Delta T_{act}}{T_{t3} \left\{ \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma-1} \left(\frac{P_{t3}}{P_{t4}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \right) \right\}} \quad (3-46)$$

όπου η τιμή του γ ήταν μια μέση τιμή στο στρόβιλο.

Ο αεριοστρόβιλος συνδυάζεται με έναν λέβητα ανάκτησης ατμού. Τα καυσαέρια από τον στρόβιλο χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματική καύση για τον λέβητα. Η θερμική απόδοση μόνο του αεριοστρόβιλου, υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$n_{ad} = \frac{W_{load} + K}{(LHV) \cdot Q} \quad (3-47)$$

όπου:

$$K = 3412 \text{ BTU/kW-Hr (3600 kJ/kW-Hr)}$$

$$LHV = \text{τιμή θερμότητας, σε BTU/ft}^3 \text{ (kJ/cu m)}$$

$$Q_{ft} = \text{Ρυθμός ροής όγκου του καυσίμου προς τον στρόβιλο, σε ft}^3/\text{hr (cu m/hr)}$$

Η απόδοση του ολικού συστήματος βασίζεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$n_{sad} = \frac{W_{load} + K}{(LHV) \cdot Q - m_{sb}(h_s - h_{fw}) + (LHV) \cdot Q_{fb}} \quad (3-48)$$

όπου:

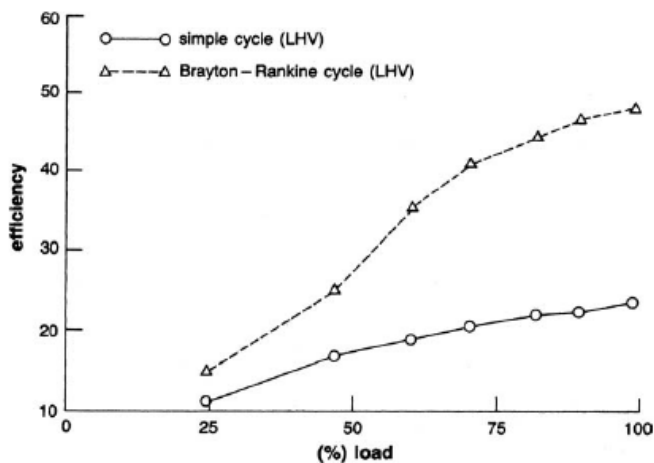
$$m_{sb} = \text{ροή μάζας του ατμού από λέβητα ανάκτησης.}$$

$$h_s = \text{ενθαλπία του υπέρθερμου ατμού.}$$

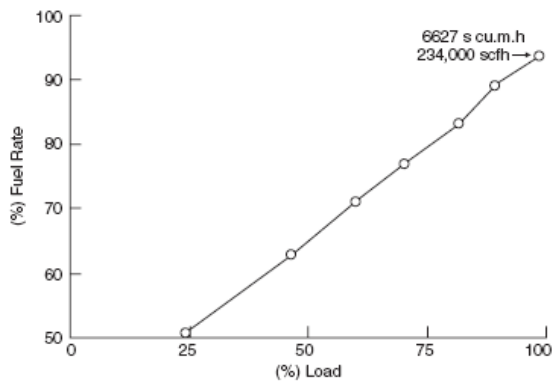
$$h_{fw} = \text{ενθαλπία του νερού τροφοδοσίας.}$$

$$Q_{fb} = \text{ρυθμός ροής του όγκου του καυσίμου προς τον λέβητα.}$$

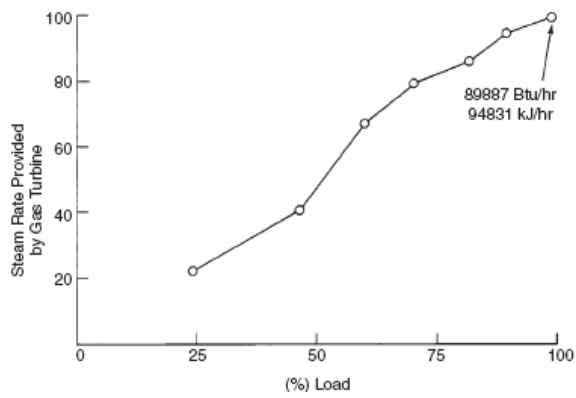
Η Εικόνα 3-19 δείχνει την θερμική απόδοση του αεριοστρόβιλου και τον κύκλο Brayton-Rankine (τα καυσαέρια του αεριοστρόβιλου που χρησιμοποιούνται στο λέβητα) με βάση την LHV του αερίου. Η εικόνα αυτή δείχνει ότι για λιγότερο από το 50% του ονομαστικού φορτίου, ο συνδυασμένος κύκλος δεν είναι αποδοτικός. Στο πλήρες φορτίο, είναι προφανή τα πλεονεκτήματα που μπορεί κανείς να αποκομίσει από έναν συνδυασμένο κύκλο. Η Εικόνα 3-20 δείχνει την κατανάλωση καυσίμου ως συνάρτηση του φορτίου και η Εικόνα 3-21 δείχνει την ποσότητα του ατμού που παράγεται από τον λέβητα ανάκτησης.



Εικόνα 3-19 : Απόδοση συνδυασμένου και απλού κύκλου σε συνάρτηση με το φορτίο του αεριοστρόβιλου.



Εικόνα 3-20 : Κατανάλωση καυσίμου σε συνάρτηση με το φορτίο του αεριοστροβίλου.



Εικόνα 3-21 : Παραγόμενος ατμός από τα καυσαέρια του αεριοστροβίλου σε συνάρτηση με το φορτίο του αεριοστροβίλου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Barker, Thomas, “Siemens’ New Generation,” Turbomachinery International, January–February 1995.
2. Boyce, M.P., “Cutting Edge Turbine Technology,” Middle East Electricity, August 1999.
3. Boyce, M.P., “Turbo-Machinery for the Next Millennium,” Russia Gas Turbo-Technology Publication, September–October 2000.
4. Boyce, M.P., “Cogeneration and Combined Cycle Power Plants,” Chapter 1, ASME Press, NY, 2001.
5. Horner, M.W., “GE Aero-derivative Gas Turbines—Design and Operating Features,” GE Turbine State-of-the-Art Technology, Seminar, 2006.
6. Ingersoll-Rand Corporation, “Cogeneration System Package for Micro-Turbines,” 2010, Portsmouth, New Hampshire.
7. Paul, T.C., Schonewald, R.W., and Marolda, P.J., “Power Systems for the 21st Century—“H” Gas Turbine Combined Cycles” , GE Turbine State-of-the-Art Technology, Seminar, 2006.
8. United Nations Framework Convention on Climate Change, “Kyoto Protocol of 1997,” United Nations, 1997, N.Y.
9. Valenti, Michael, “ATurbine for Tomorrow’s Navy,” ASME Mechanical Engineering, NY, September 2009.
10. Boyce, M.P., “Advanced Cycles for Combined Cycle Power Plants,” Russia Gas Turbo-Technology Publication, 2009.

11. Boyce, M.P., Meher-Homji, C.B., and Lakshminarasimha, A.N., "Gas Turbine and Combined Cycle Technologies for Power and Efficiency Enhancement in Power Plants,".
12. Chodkiewicz, R. "A Recuperated Gas Turbine Incorporating External Heat Sources in the Combined Gas-Steam Cycle," ASME Paper No. 2000-GT-0593.
13. Cyrus, B., Meher-Homji, T.R., and Mee III, "Gas Turbine Power Augmentation by Fogging of Inlet Air," Turbomachinery Symposium Proceedings.
14. Holden, P., Moen, D., and DeCorso, M., "Alabama Electric Cooperative Compressed Air Energy Storage (CAES) Plant Improvements," ASME Paper No. 2000-GT-0595.
15. Kehlhofer, R.H., et al., "Combined Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants," 3rd Edition.
16. Lane, A.W., and Hoffman, P.A., "The U.S. Dept. of Energy Advanced Turbine System Program".
17. Nakhamkin, M. "Increasing Gas Turbine or Combined Cycle Power Production with Compressed Air to Meet Peak Power Demands," ASME Paper No. 2000-GT-0596.
18. Narula, R.G., "The Single-Shaft Combined Cycle Myth," ASME Paper No. 2000-GT-0594
19. Wieler, C.L., "WR-21 Intercooled Recuperated Gas Turbine," U.S. DOE Advanced Turbine Systems Meeting, 2009.
20. Ν.Α. Νανούσης, Βασικές αρχές στροβιλομηχανών, Εκδόσεις ΙΩΝ, 2003.
21. Ν.Α.Νανούσης, Ρευστομηχανική, Τόμος Α, Εκδόσεις ΙΩΝ, 2003
22. Ν.Α.Νανούσης, Ρευστομηχανική, Τόμος Β Εκδόσεις ΙΩΝ, 2003
23. Παπανίκας Δημήτριος, Εφαρμοσμένη Ρευστομηχανική, Τόμοι Α & Β, Εκδόσεις ΑΧΑΙΟΣ, 1980.

