



ΑΝΟΙΚΤΑ
ΑΚΑΔΗΜΑΙΚΑ
ΜΑΘΗΜΑΤΑ



ΑΤΜΟΠΑΡΑΓΩΓΟΙ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ και ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Κατσανεβάκης Αθανάσιος
Διπλ. Μηχανολόγος μηχανικός
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΕ



Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Αφιερώνεται στον πατέρα μου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	7
Εισαγωγή στην μετατροπή ενέργειας και τα ενεργειακά συστήματα	7
Γενικά.....	7
Ενέργεια και μετατροπή ενέργειας.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	11
Ο ατμός και η χρήση του στην μετατροπή και την αξιοποίηση της ενέργειας.	
Ισοζύγια ενέργειας και μάζας.....	11
Εισαγωγή.....	11
Ο ατμός και οι ιδιότητές του.....	11
Εσωτερική ενέργεια.....	14
Ενθαλπία.....	15
Εντροπία	15
Πίνακες και διαγράμματα ατμών.....	16
Συμπεράσματα από τους πίνακες και τα διαγράμματα των ατμών.....	17
Ισοζύγια ενέργειας και μάζας	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	22
Μετάδοση θερμότητας.....	22
Εισαγωγή	22
Τα είδη της μετάδοσης θερμότητας.....	22
Μετάδοση θερμότητας με αγωγή.....	23
Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή.....	24
Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία.....	25
Σύνθετη μετάδοση θερμότητας.....	26
Παράδειγμα σύνθετης μετάδοσης θερμότητας.....	27
Ειδικές περιπτώσεις μετάδοσης θερμότητας	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	29
Η καύση	29
Γενικά.....	29
Οι εξισώσεις της καύσης.....	29
Τα καύσιμα.....	30
Η καύση	31
Ισοζύγια μάζας στην εστία καύσης.....	32
Ειδική απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου και αέρα	33
Ειδική παραγόμενη ποσότητα καυσαερίων και η σύστασή τους	34
Παράδειγμα: Υπολογισμός των συστατικών της καύσης σε στερεό καύσιμο	35
Ειδικά κεφάλαια που αφορούν τα ισοζύγια μάζας στην εστία καύσης.....	35
Υπολογισμοί των συστατικών της καύσης σε μίγμα αερίων καυσίμων	35
Προσδιορισμός της θερμοκρασίας υγροποίησης –δρόσου-των καυσαερίων.....	36
Ισοζύγιο ενέργειας στην εστία της καύσης.....	37
Αδιαβατική θερμοκρασία καύσης.....	39
Βαθμός απόδοσης της εστίας της καύσης.....	40
Ειδική θερμοχωρητικότητα των καυσαερίων.....	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	44
Ο ατμολέβητας ή ατμοπαραγωγός.....	44
Γενικά.....	44
Θερμοδυναμικοί υπολογισμοί στους ατμοπαραγωγούς.....	45

Θερμοδυναμικοί υπολογισμοί στους ατμοπαραγωγούς.....	48
Βρασμός.....	49
Υπέρθερμος ατμός εντός σωλήνος.....	50
Νερό εντός σωλήνος.....	50
Καυσαέρια εντός σωλήνων.....	50
Καυσαέρια εκτός σωλήνων.....	51
Συντλεστής μεταφοράς θερμότητας.....	52
Υπολογιστικές μέθοδοι ανάλυσης.....	52
Προσδιορισμός και υπολογισμός των κατασκευαστικών στοιχείων του ατμολέβητα.....	53
Ποιότητα υλικών, συγκολλήσεις.....	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	56
ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΟΥ ΑΤΜΟΥ.....	56
Γενικά.....	56
Σωληνώσεις ατμού.....	57
Απώλειες πίεσης σε σωληνώσεις.....	57
Κλίσεις σωληνώσεων – συλλογή συμπυκνωμάτων.....	58
Διακλαδώσεις από τον κεντρικό αγωγό.....	59
Ανάποδη κλίση σε κεντρικό αγωγό.....	60
Στηρίγματα σωληνώσεων ατμού και συμπυκνωμάτων.....	60
Θερμική διαστολή σωλήνων.....	61
Υπολογισμός του δικτύου επιστροφής συμπυκνωμάτων.....	63
Οι ατμοπαγίδες.....	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.....	68
Ο ατμοστρόβιλος.....	68
Γενικά.....	68
Γενικές διατάξεις.....	68
Ισοζύγιο ενέργειας στα όρια του ατμοστροβίλου.....	73
Τί γίνεται μέσα στον ατμοστροβίλο;.....	76
Στρόβιλοι δράσης και αντίδρασης.....	81
Δυνάμεις οι οποίες ασκούνται στην πτερύγωση.....	81
Ακτινικοί στρόβιλοι.....	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8.....	84
Ο κύκλος παραγωγής έργου με τη χρήση του ατμού.....	84
Γενικά.....	84
Ο κύκλος του Carnot -Καρνώ-.....	86
Ο κύκλος του RANKINE -Ράνκιν-.....	89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9.....	93
Συμπαγωγή Ηλεκτρισμού & Θερμότητας.....	93
Γενικά.....	93
Ορισμοί.....	93
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	97
ΣΥΜΒΟΛΑ.....	99
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	100

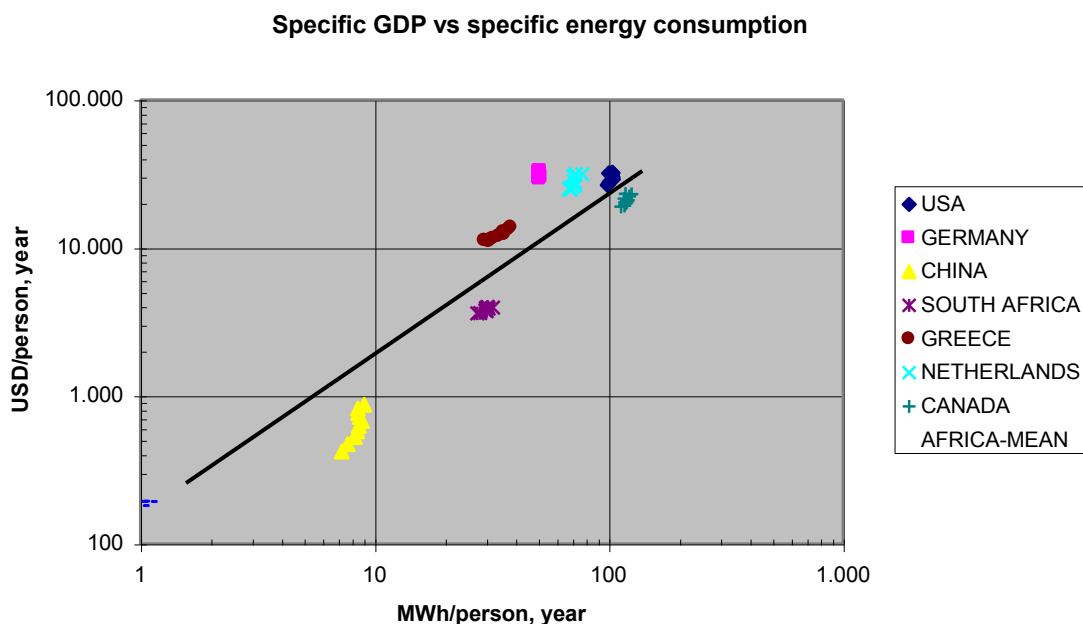
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή στην μετατροπή ενέργειας και τα ενεργειακά συστήματα

Γενικά.

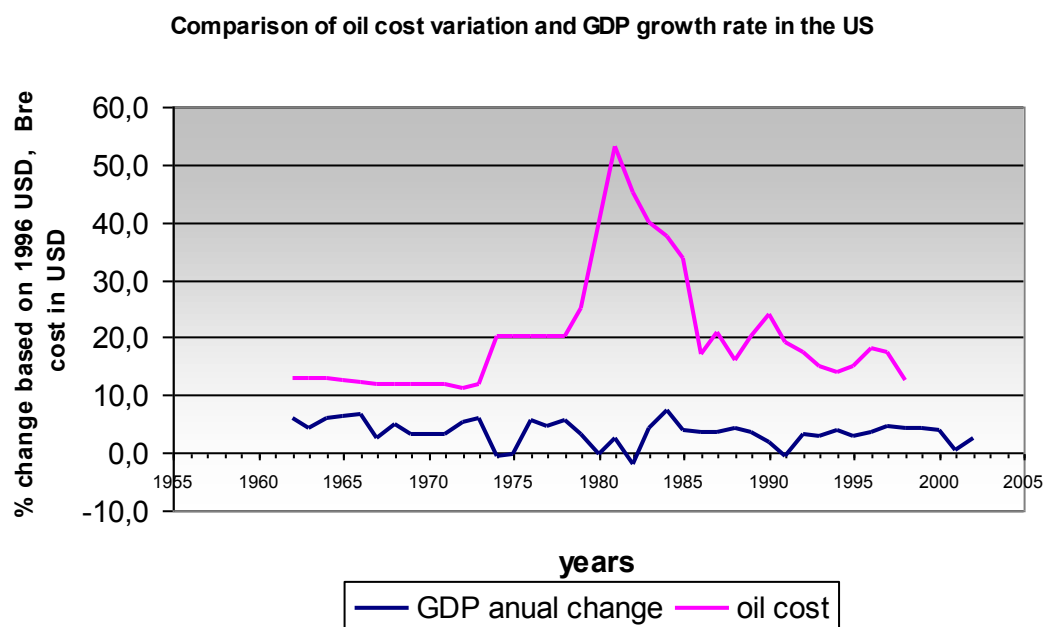
Η μετατροπή και η χρήση της ενέργειας είναι από τα βασικά πεδία της επιστήμης του Μηχανικού. Ο σύγχρονος τρόπος ζωής βασίζεται στη χρήση σημαντικών ποσών ενέργειας. Έτσι το βιοτικό επίπεδο των σύγχρονων κοινωνιών με τις ανέσεις και τις ευκολίες που το χαρακτηρίζουν είναι στενά συνδεδεμένο με τη διαθεσιμότητα ενεργειακών πόρων. Η ενέργεια χρησιμοποιείται σε όλο και περισσότερες στιγμές της ζωής μας: Τη χρησιμοποιούμε για να μετακινούμαστε, στο σπίτι μας για θέρμανση ή ζεστό νερό, για τη λειτουργία των υπολογιστών ή των οικιακών μας συσκευών κ.λ.π. Είναι δύσκολο να βρεθεί δραστηριότητα κατά την οποία δεν γίνεται χρήση κάποιας εξωτερικής πηγής ενέργειας –έξω από αυτήν την οποία μετατρέπεται και αξιοποιεί ο ανθρώπινος οργανισμός-.

Η σημασία της ύπαρξης ενεργειακών πόρων έχει οδηγήσει αρκετά κράτη στην εφαρμογή μακρόχρονου σχεδιασμού για την εξασφάλιση της ενεργειακής τους επάρκειας. Έχει επανειλημμένα διαπιστωθεί η συσχέτιση της διαθεσιμότητας ενεργειακών πόρων με την οικονομική ανάπτυξη και το κατά κεφαλήν εθνικό προϊόν. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η σχέση αυτή για διάφορα κράτη για το 1998. Με την πάροδο των ετών τα δεδομένα διαφοροποιούνται π.χ. το κατά κεφαλήν εθνικό προϊόν της Κίνας έχει αυξηθεί αλλά το ίδιο συνέβη και με την ειδική κατανάλωση ενέργειας. Έτσι για κάθε έτος μπορεί να παραχθεί ένα παρόμοιο διάγραμμα όπου επιβεβαιώνεται η παραπάνω τάση : υφίσταται έντονη συσχέτιση μεταξύ της κατά κεφαλήν ενεργειακής κατανάλωσης και του κατά κεφαλήν εθνικού προϊόντος: κράτη με μικρό κατά κεφαλήν προϊόν έχουν και μικρή κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας.



Σχήμα 1.1 Κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας και κατά κεφαλήν ακαθάριστο εθνικό προϊόν, [1]. Στοιχεία του 1998.

Έχει επίσης διαπιστωθεί η επίπτωση του κόστους ενέργειας στον ρυθμό οικονομικής ανάπτυξης. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η % αύξηση του ΑΕΠ στις ΗΠΑ σε σχέση με την τιμή του αργού πετρελαίου. Είναι φανερό ότι όποτε υπάρχει αύξηση της τιμής του αργού πετρελαίου έχουμε αντίστοιχα μείωση του ρυθμού οικονομικής ανάπτυξης.



Σχήμα 1.2 Μεταβολή τιμών αργού πετρελαίου και ετήσια μεταβολή ρυθμού οικονομικής ανάπτυξης στις ΗΠΑ, [1].

Είναι φανερό από τα παραπάνω ότι η οικονομική ανάπτυξη βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην χρήση ενεργειακών πόρων.

Παράλληλα με την αναγνώριση της σπουδαιότητας των ενεργειακών πόρων και της ενέργειας στην οικονομική ανάπτυξη αλλά και στη διατήρηση «υψηλού» βιοτικού επιπέδου έχει τις τελευταίες δεκαετίες ξεκινήσει έντονος προβληματισμός με κύριους άξονες την περιορισμένη διαθεσιμότητα των ενεργειακών πόρων αφενός και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την μετατροπή –παραγωγή ενέργειας αφετέρου. Είναι προφανές ότι η διαθεσιμότητα ενεργειακών πόρων είναι πεπερασμένη και επομένως δεν θα μπορεί να ικανοποιεί για πάντα μονοτόνως αύξουσες ενεργειακές «ανάγκες». Επιπλέον η παραγωγή ενέργειας εφόσον είναι συνυφασμένη με περιβαλλοντικές επιπτώσεις, μπορεί να οδηγήσει σε αρνητικές συνέπειες για το περιβάλλον. Έτσι έχουν αναπτυχθεί οι τομείς της εξοικονόμησης ενέργειας και των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

Ο στόχος του μαθήματος «Ατμοπαραγωγοί, Ατμοστρόβιλοι και Ενεργειακά συστήματα» είναι να εισάγει τον φοιτητή στις μετατροπές της θερμικής ενέργειας με στόχο την παραγωγή έργου. Κύριο βάρος θα δοθεί στον κλασικό κύκλο παραγωγής έργου με ατμό, τον κύκλο Rankine, ενώ εξετάζονται βασικά θέματα που αφορούν τις κύριες συσκευές και εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται στις ατμοπαραγωγικές εγκαταστάσεις. Άλλοι θερμικοί κύκλοι παραγωγής έργου θα προσεγγισθούν σε μικρότερη λεπτομέρεια. Δίδεται έμφαση στην κατανόηση των βασικών φυσικών φαινομένων και όχι στη λεπτομερή μαθηματική παρουσίασή τους. Για μεγαλύτερη εμβάθυνση ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στη σχετική

βιβλιογραφία. Απαραίτητο συμπλήρωμα στο μάθημα είναι η πρακτική εξάσκηση των φοιτητών στις συσκευές του εργαστηρίου οι οποίες περιλαμβάνουν μιά μικρή μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με κύκλο Rankine εξοπλισμένης με ατμογεννήτρια και ατμοστρόβιλο /ηλεκτρογεννήτρια ισχύος 5 kWel. Το εγχειρίδιο της μονάδας αυτής με τα πειράματα τα οποία περιγράφονται αποτελεί συμπλήρωμα των σημειώσεων αυτών και βρίσκεται στο παράρτημα. Επίτηδες έχει παραμείνει αμετάφραστο στην αρχική του αγγλική έκδοση ώστε να δοθεί η ευκαιρία στους φοιτητές να έρθουν σε επαφή με τεχνικό κείμενο σχετικό του μαθήματος στην αγγλική.

Ενέργεια και μετατροπή ενέργειας.

Έχουν δοθεί πολλοί ορισμοί για το τι είναι ενέργεια. Υπάρχουν πολλά είδη ενέργειας μερικά εκ των οποίων είναι η κινητική ενέργεια, η χημική ενέργεια, η δυναμική ενέργεια κ.λ.π. Ένας γενικός ορισμός θα μπορούσε να ήταν:

Ενέργεια είναι κάθε ανισορροπία ή δυνατότητα ανισορροπίας σε σχέση με το περιβάλλον.

Ο παραπάνω ορισμός εισάγει ορισμένα βασικά γνωρίσματα της ενέργειας:

-τη σχετικότητα της ως προς το εκάστοτε νοούμενο περιβάλλον,
-την περίπτωση όπου η ισορροπία μπορεί να διαταραχθεί από εν δυνάμει ενεργειακές μετατροπές όπως π.χ. η χημική ενέργεια μιάς ποσότητας καυσίμου η οποία μπορεί να μετατραπεί-απελευθερωθεί εφόσον συντρέξουν οι προϋποθέσεις έναυσης.

Από τον παραπάνω ορισμό είναι επίσης φανερό ότι σε μια κατάσταση πλήρους ισορροπίας σε σχέση με το περιβάλλον έχουμε μηδενισμό της δυνατότητας μετατροπής ενέργειας καθώς επίσης ότι σε πλήρη ισορροπία του σύμπαντος δεν υπάρχει πλέον η δυνατότητα ενεργειακών μετατροπών.

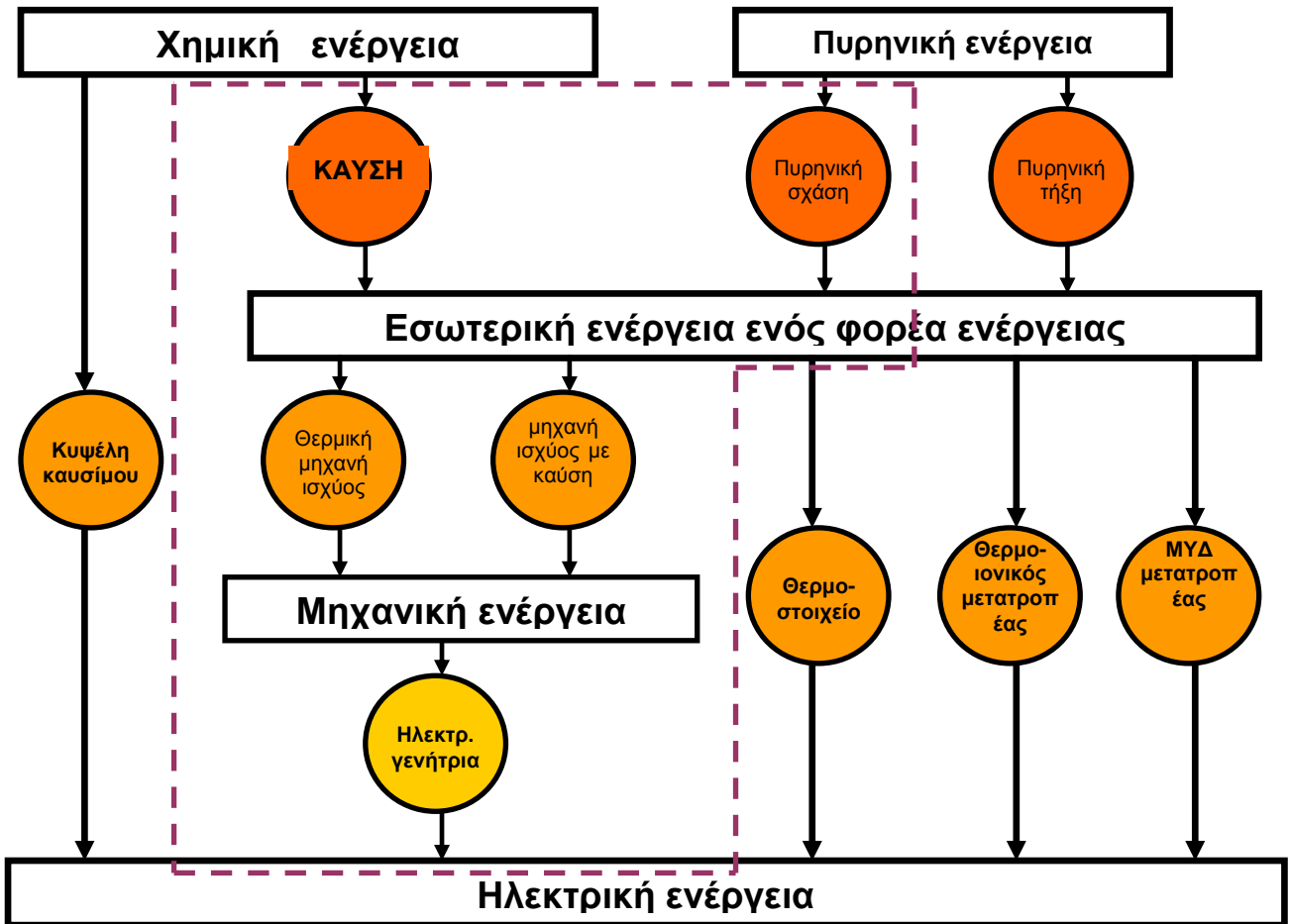
Στην πραγματικότητα του δικού μας χωροχρόνου η ενέργεια δεν παράγεται αλλά απλώς μετατρέπεται από μια μορφή σε άλλη π.χ. η χημική ενέργεια του καυσίμου μετατρέπεται σε θερμότητα ή ακόμα με βάση τη θεωρία της σχετικότητας οι μετατροπές αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν και τη μάζα. Στην κατάσταση πλήρους ισορροπίας παύει πλέον η δυνατότητα μετατροπής: απαιτείται μια επέμβαση έξω από το εκάστοτε νοούμενο περιβάλλον για να θέσει σε λειτουργία κάποιο ή κάποιους μηχανισμούς μετατροπής π.χ. σε επίπεδο σύμπαντος ο Θεός¹.

Πρίν προχωρήσουμε θα πρέπει να κάνουμε τη διαπίστωση ότι η μετατροπή και η χρήση της ενέργειας είναι ένα από τα γνωρίσματα που διαφοροποιούν τον άνθρωπο από την λοιπή κτίση : ο άνθρωπος μπορεί να χειρίζεται την φωτιά –η πρωτογενής μορφή ενέργειας- ενώ τα ζώα δεν μπορούν.

Η μετατροπή της ενέργειας είναι μια απαραίτητη διαδικασία για να μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε την ενέργεια προς όφελός μας. Για παράδειγμα μετατρέπουμε την χημική ενέργεια των ξύλων σε θερμική ενέργεια για να θερμάνουμε το σπίτι μας. Η επιστήμη του ενεργειακού μηχανικού έχει στόχο να μελετήσει τις μετατροπές ενέργειας ώστε να πετύχει καλύτερα το στόχο της αξιοποίησης της ενέργειας προς όφελος του ανθρώπου αλλά συγχρόνως να διατηρήσει τις αρνητικές επιπτώσεις των μετατροπών τις οποίες προκαλεί σε αποδεκτά όρια. Σήμερα στις περισσότερες περιπτώσεις επιζητείται η μετατροπή της ενέργειας με τελικό στόχο την παραγωγή ηλεκτρισμού που είναι μια εύκολα αξιοποιήσιμη μορφή ενέργειας. Μια εποπτεία των μεθόδων μετατροπής οι οποίες βασίζονται στη χρήση καυσίμων και οι οποίες

¹ Βλέπε άρθρο του Ι. Μαυρουδή σε δελτίο TEE τεύχος 2411 της 16/10/2006

υπάρχουν σήμερα είτε σε εμπορική χρήση είτε βρίσκονται υπό ανάπτυξη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Μέσα στην διακεκομμένη γραμμή βρίσκονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα σε εμπορικές εφαρμογές. Παρατηρούμε ότι στις περισσότερες περιπτώσεις μεσολαβεί ένας φορέας η εσωτερική ενέργεια του οποίου μετατρέπεται με κατάλληλες μηχανές –θερμικές μηχανές- σε έργο. Οι μεθοδολογίες αυτές χρησιμοποιούνται σήμερα και παράγουν πάνω από το 80% των παγκοσμίων αναγκών σε ηλεκτρισμό και προβλέπεται ότι αυτό θα συνεχίσει και τα επόμενα χρόνια. Στη μελέτη αυτών των μεθόδων θα επικεντρωθεί το μάθημα αυτό. Εξαιρέση στην παραπάνω διαδικασία μετατροπής ενέργειας αποτελούν οι κυψέλες καυσίμου οι οποίες έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται σε μικρής κλίμακας εμπορικές εφαρμογές τα τελευταία χρόνια, [2,3].



Σχήμα 1.3 Οι κύριοι μηχανισμοί μετατροπής ενέργειας από καύσιμα σήμερα. Εντός της διακεκομμένης γραμμής αυτοί που βρίσκονται σήμερα σε πλήρη εμπορική εφαρμογή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ο ατμός και η χρήση του στην μετατροπή και την αξιοποίηση της ενέργειας. Ισοζύγια ενέργειας και μάζας.

Εισαγωγή.

Ο ατμός υπήρξε ιστορικά το πρώτο μέσο που αξιοποιήθηκε στην ανάπτυξη των μεθόδων μετατροπής ενέργειας για την παραγωγή έργου. Για τον λόγο αυτό οι ιδιότητές του εξετάζονται πρίν από τα υπόλοιπα κεφάλαια τα οποία αφορούν τις μεθοδολογίες μετατροπής της ενέργειας μέσα από θερμικούς κύκλους. Συγχρόνως με την μελέτη των ιδιοτήτων του ατμού θα κάνουμε μια ανασκόπηση των βασικών στοιχείων της τεχνικής θερμοδυναμικής τα οποία θα αξιοποιήσουμε στα επόμενα κεφάλαια. Δεν θα υπάρξει εμβάθυνση σε θέματα που αφορούν την θερμοδυναμική, θέματα στα οποία ο ενδιαφερόμενος θα μπορεί να ανατρέξει χρησιμοποιώντας τη βιβλιογραφία στο τέλος του κεφαλαίου.

Ο ατμός και οι ιδιότητές του.

Ας ξεκινήσουμε με ένα υποθετικό πείραμα:

Έχουμε μια συσκευή η οποία αποτελείται από ένα διαφανές κυλινδρικό δοχείο μέσα στο οποίο ολισθαίνει χωρίς τριβές ένα έμβολο μιάς ορισμένης μάζας. Με κάποιον τρόπο εισάγεται στο δοχείο μέσα και κάτω από το έμβολο μια ποσότητα κρύου νερού. Συγχρόνως έχουμε τη δυνατότητα να μετράμε συνεχώς τη θερμοκρασία του νερού καθώς και τον όγκο που αυτό καταλαμβάνει.

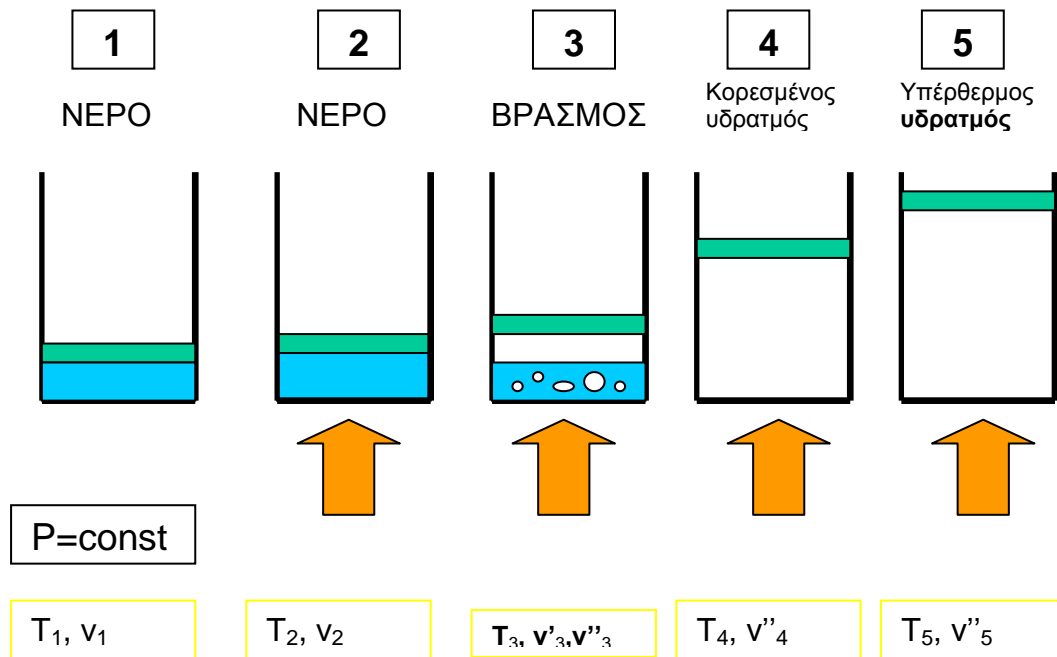
Το έμβολο λόγω της μάζας του ασκεί στην μάζα του νερού μια συγκεκριμένη πίεση P_1 . Στην αρχή του πειράματος η θερμοκρασία του νερού είναι T_1 και ο όγκος είναι V_1 .

Ξεκινάμε τη θέρμανση του νερού. Η θερμοκρασία και ο όγκος του αυξάνει και όταν φθάσουμε τη θερμοκρασία T_2 για τη συγκεκριμένη πίεση P_1^2 τότε εμφανίζεται η πρώτη φυσαλίδα ατμού μέσα στη μάζα του νερού³. Συνεχίζοντας τη θέρμανση του νερού ο βρασμός αναπτύσσεται και πλήθος φυσαλίδων δημιουργούνται και συγκεντρώνονται στο πάνω μέρος του δοχείου. Έχουμε πλέον ένα σύστημα με νερό που βράζει και ατμό. Τα δύο ρευστά βρίσκονται σε μιά δυναμική ισορροπία μεταξύ τους και σε κοινή πίεση P_1 . Την κατάσταση αυτή την ονομάζουμε κατάσταση κορεσμού σε πίεση P_1 . Η κατάσταση κορεσμού αρχίζει με την εμφάνιση της πρώτης φυσαλίδας ατμού και ολοκληρώνεται με την ατμοποίηση της τελευταίας σταγόνας

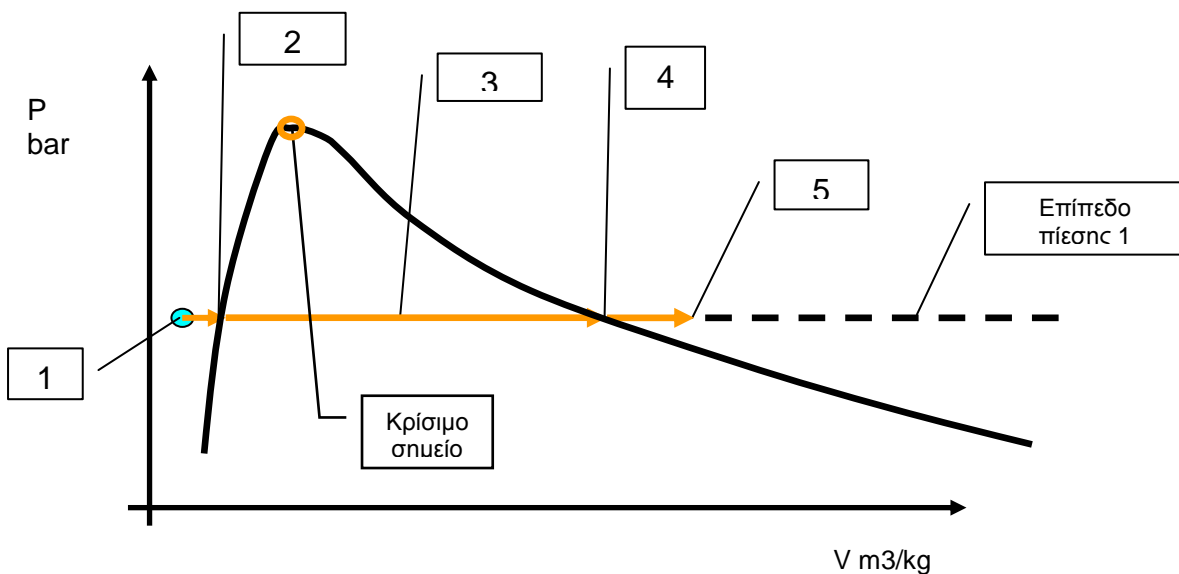
² Η πίεση P παραμένει σταθερή επειδή η μάζα του εμβόλου παραμένει ίδια.

³ Η εμφάνιση της πρώτης φυσαλίδας ατμού θα γίνει συνήθως πάνω στα τοιχώματα του δοχείου και μάλιστα προς την περιοχή της φλόγας. Η θερμοκρασία μέσα στην μάζα του νερού δεν είναι ακριβώς ίδια ούτε φυσικά μέσα στη μάζα των τοιχωμάτων. Υπάρχουν μεταβολές οι οποίες σε συνδυασμό με τους πόρους των τοιχωμάτων δημιουργούν τις πρώτες εστίες δημιουργίας του ατμού -ατμοποίησης- του νερού. Για περισσότερες πληροφορίες μπορεί ο ενδιαφερόμενος να ανατρέξει στη βιβλιογραφία [4].

νερού. Στην κατάσταση του κορεσμού η θερμοκρασία μέσα στο δοχείο παραμένει πρακτικά σταθερή. Μόλις ατμοποιηθεί και η τελευταία σταγόνα του νερού ο ατμός που πλέον έχει καταλάβει όλο το χώρο κάτω από το έμβολο αρχίζει και αυξάνει τη θερμοκρασία του στην τιμή T_5 : έχουμε τότε κατάσταση υπέρθερμου ατμού. Το πείραμα έχει ολοκληρωθεί. Αν αφήσουμε τον υπέρθερμο ατμό να ψυχθεί θα έχουμε αντίστροφη εξέλιξη των φαινομένων μέχρις ότου όλος ο ατμός συμπυκνωθεί και φθάσουμε στην αρχική μας κατάσταση η οποία ονομάζεται υπόψυκτο νερό. Βέβαια στην αντίστροφη αυτή πορεία δεν θα έχουμε φαινόμενο βρασμού αλλά συμπύκνωση του ατμού με σταγόνες πάνω στα κρύα τοιχώματα του δοχείου οι οποίες θα συγκεντρώνονται ως υγρή φάση στον πυθμένα του δοχείου.



Σχήμα 2.1 Το εικονικό πείραμα για τις διαδοχικές καταστάσεις του υδρατμού.



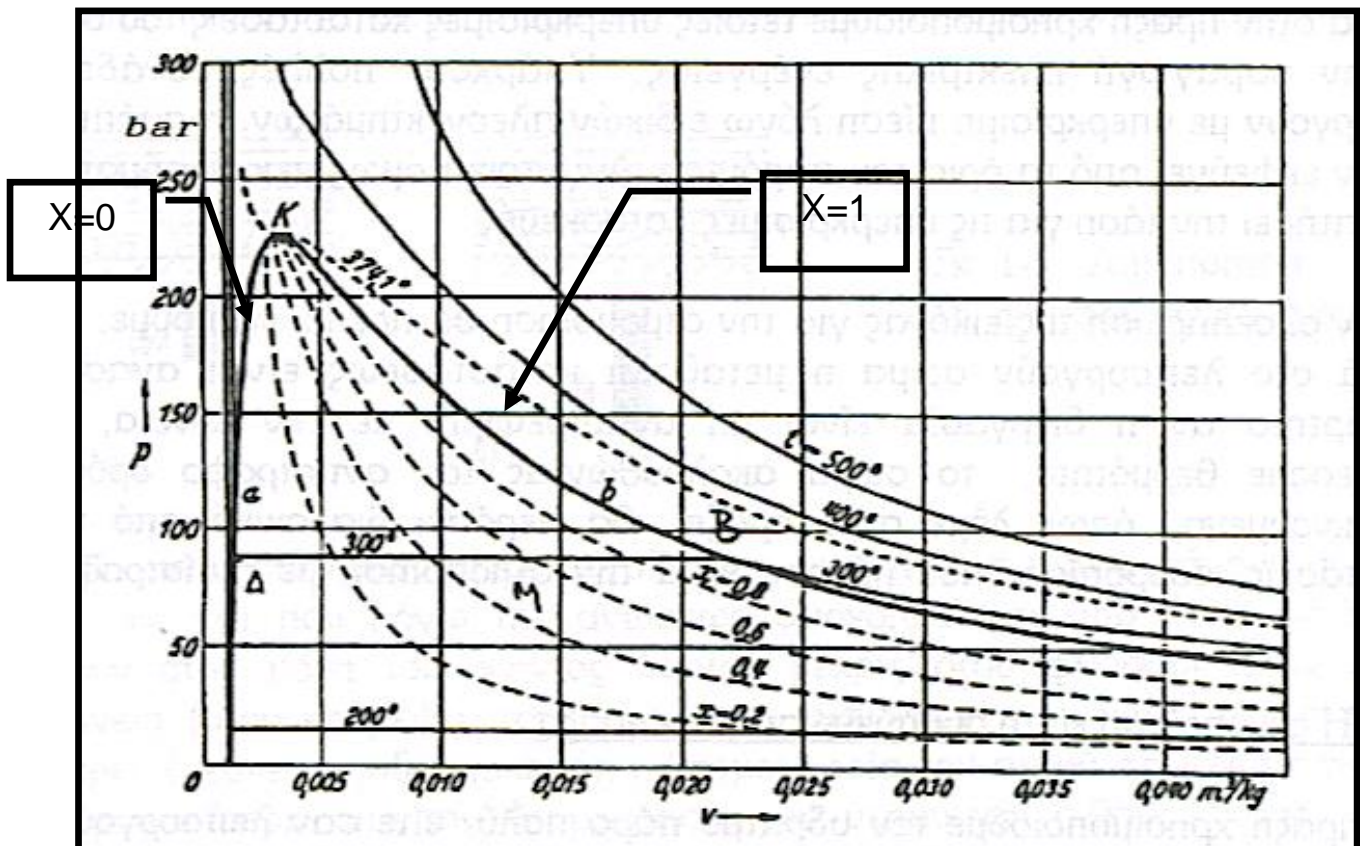
Σχήμα 2.2. Η καμπύλη πίεσης -ειδικού όγκου που προκύπτει από τις μετρήσεις του εικονικού πειράματος.

Καθόλη τη διάρκεια του πειράματος παρατηρούμε και τις αντίστοιχες μεταβολές του όγκου του-των ρευστών: έχουμε μία μικρή αύξηση του όγκου μέχρι την αρχή του κορεσμού και μία μεγάλη αύξηση κατά τη διάρκεια της ατμοποίησης. Κατά την υπερθέρμανση έχουμε επίσης αύξηση του όγκου του ρευστού.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος πραγματοποιούμε μετρήσεις του όγκου V που καταλαμβάνουν τα ρευστά μέσα στο δοχείο καθώς και της θερμοκρασίας T . Αν σημειώσουμε σε ένα διάγραμμα τις τιμές αυτές και επαναλάβουμε το πείραμα με διαφορετική μάζα εμβόλου και άρα σε διαφορετική πίεση και ενώσουμε τα σημεία στα οποία παρατηρείται η αρχή και το τέλος της κατάστασης κορεσμού τότε θα προκύψει η καμπύλη του σχήματος 2.2. Η καμπύλη αυτή αν μετατρέψουμε το όγκο σε ειδικό όγκο διαιρώντας με τη συνολική μάζα του ρευστού μέσα στην συσκευή, είναι το διάγραμμα P, v -πίεσης/ ειδικού όγκου- των καταστάσεων του ατμού. Οι μετρήσεις αυτές έχουν πραγματοποιηθεί κατά το παρελθόν και έχει προκύψει το διάγραμμα των καταστάσεων του ατμού που φαίνεται στο σχήμα 2.3.

Στο σχήμα αυτό παρατηρούμε ότι εφόσον ορίσουμε δύο από τις ιδιότητες του ατμού π.χ. την πίεση και τη θερμοκρασία, μπορούμε να προσδιορίσουμε την τρίτη ιδιότητα π.χ. τον ειδικό όγκο. Αυτά τα τρία μεγέθη -πίεση, θερμοκρασία, ειδικός όγκος- που έχουν αυτή την ιδιότητα δηλαδή γνωρίζοντας τα δύο από αυτά να προσδιορίζουμε το τρίτο, λέγονται καταστατικά μεγέθη. Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη σχέση μεταξύ των καταστατικών μεγεθών δηλ. οι γραμμές στο σχήμα 2.3, ονομάζονται καταστατικές εξισώσεις και έχουν τη γενική μορφή

$$v = f(P, T)$$



Σχήμα 2.3. το διάγραμμα των καταστάσεων του ατμού -Πίεση/θερμοκρασία/ειδικός όγκος.

Οι μεταβολές που υπέστη το νερό κατά το πείραμα ονομάζονται θερμοδυναμικές μεταβολές και μπορούν να περιγραφούν με τις καταστατικές εξισώσεις χρησιμοποιώντας τα καταστατικά μεγέθη.

Κατά την εξέλιξη της επιστήμης της θερμοδυναμικής έγινε χρήση και άλλων καταστατικών μεγεθών για την περιγραφή των θερμοδυναμικών φαινομένων. Αυτά τα μεγέθη σχετίζονται με την πίεση, τη θερμοκρασία και τον ειδικό όγκο και είναι:

-η ειδική εσωτερική ενέργεια η οποία είναι συνάρτηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας και της θερμοκρασίας,

$$u = f_1 (c_v, T), \text{ [kJ/kg]}$$

-η ειδική Ενθαλπία η οποία είναι συνάρτηση της ειδικής εσωτερικής ενέργειας και της πίεσης

$$h = f_2 (u, P), \text{ [kJ/kg]}$$

- η Ειδική Εντροπία, η οποία είναι συνάρτηση της ειδικής ενθαλπίας και της θερμοκρασίας

$$s = f_3 (h, T), \text{ [kJ/kgK]}$$

Οι συναρτήσεις $f_1, 2, 3$ είναι γενικά περίπλοκες και μεταβάλλονται ανάλογα με την περιοχή στην οποία βρισκόμαστε – υγρό, υγρό/ατμός, ατμός- και είναι διαφορετικές για κάθε ρευστό.

Για τον υπολογισμό και την περιγραφή των συναρτήσεων αυτών έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες προσεγγίσεις όπως για παράδειγμα αυτή των τελείων αερίων. Γενικά στην τεχνική του ατμού/υδρατμού και της παραγωγής έργου χρησιμοποιούμε πειραματικά δεδομένα και όχι δεδομένα υπολογισμένα από θεωρητικές προσεγγίσεις. Τα πειραματικά αυτά δεδομένα βρίσκονται σε πίνακες – πίνακες ατμών- και διαγράμματα. Τα δεδομένα αυτά έχουν προκύψει μετά από επίπονες μετρήσεις σε διάφορες εποχές και μετά από σειρά διεθνών συναντήσεων εργασίας έχουν καθιερωθεί οι γενικά αποδεκτές τιμές των καταστατικών μεγεθών του νερού/ατμού αλλά και άλλων ουσιών και ενώσεων οι οποίες χρησιμοποιούνται στην πράξη του μηχανικού. Στο παράρτημα δίδονται οι πίνακες με τα στοιχεία που αφορούν το σύστημα νερό/ατμός για χρήση από τους φοιτητές. Υπάρχουν επίσης προγράμματα υπολογιστή τα οποία δίδουν τις τιμές για τα καταστατικά μεγέθη του ατμού και πραγματοποιούν και τους σχετικούς υπολογισμούς π.χ. [5].

Η περιγραφή και εμβάθυνση στις έννοιες της εσωτερικής ενέργειας, της ενθαλπίας και της εντροπίας είναι θεμελιώδης για την κατανόηση και περιγραφή των θερμοδυναμικών διεργασιών και της μετατροπής ενέργειας. Εδώ θα δώσουμε ορισμένες βασικές συνιστώσες. Ο ενδιαφερόμενος μπορεί να ανατρέξει στην βιβλιογραφία, [7,8,9].

Εσωτερική ενέργεια.

Σε ένα μέσο που δεν κινείται είναι η ενέργεια που περιέχεται μέσα στο ίδιο το μέσο και απλοικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι οφείλεται στην κίνηση των μορίων του. Η εσωτερική ενέργεια ενός μέσου μηδενίζεται σε κατάσταση πλήρους ακινησίας που είναι η κατάσταση του απολύτου μηδενός.

Η εσωτερική ενέργεια είναι μια ιδιότητα του μέσου, π.χ. ένα δοχείο ζεστό νερό περιέχει ένα ποσό εσωτερικής ενέργειας. Επίσης άλλη είναι η εσωτερική ενέργεια που περιέχει 1 kg νερό και άλλη αυτή ενός kg χάλυβα στην ίδια θερμοκρασία. Η παράμετρος η οποία επηρεάζει ποσοτικά το περιεχόμενο της εσωτερικής ενέργειας

μίας μονάδας μάζας ουσίας σε σχέση με τη θερμοκρασία είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα της ουσίας αυτής. Η ειδική θερμοχωρητικότητα μπορεί να είναι είτε υπό σταθερό όγκο –cv- είτε υπό σταθερή πίεση–cp-, [7].

Αν θέλουμε να ποσοτικοποιήσουμε την εσωτερική ενέργεια τότε αυτό μπορεί να γίνει με τη χρήση της εικόνας του κλειστού αδιαβατικού συστήματος εντός του οποίου σκεδάζουμε έργο ατράκτου⁴:

τότε

$$U_1 - U_2 = W_{12} \text{ αδιαβ.}$$

Ενθαλπία.

Η ενθαλπία προκύπτει από την εσωτερική ενέργεια λαμβάνοντας υπόψη και το έργο εξωθήσεως –pdV-. Με απλά λόγια λαμβάνει υπόψη της και το έργο που θα μπορούσε να προκύψει από την μεταβολή του όγκου του μέσου το οποίο περιέχει την εσωτερική ενέργεια.

Η ενθαλπία προκύπτει από τη σχέση

$$H = U + p^*V \quad [1.1]$$

Έτσι μια απειροστή μεταβολή της ενθαλπίας υπό σταθερή πίεση θα είναι

$$dH = dU + p^*dV \quad [1.2]$$

Για την ειδική ενθαλπία (ενθαλπία ανά μονάδα ύλης) έχουμε

$$h = u + pv \quad [1.3]$$

Επομένως για δύο μέσα με την ίδια εσωτερική ενέργεια και τον ίδιο ειδικό όγκο αυτό που έχει μεγαλύτερη πίεση έχει μεγαλύτερη ενθαλπία.

Εντροπία

Η εντροπία είναι ένα καταστατικό μέγεθος που λαμβάνει υπόψη του την «ποιότητα» της ενέργειας.

Η ποιότητα της ενέργειας λαμβάνεται υπόψη με τη βοήθεια της απόλυτης θερμοκρασίας: όσο μεγαλύτερη είναι αυτή τόσο υψηλότερης ποιότητας είναι η αντίστοιχη ενέργεια.

Σε ένα σύστημα χωρίς άλλες συντεταγμένες έργου παρά μόνον τη μεταβολή του ειδικού όγκου υπό σταθερή πίεση, η απειροστή μεταβολή της εντροπίας ορίζεται μέσω της εσωτερικής ενέργειας ως εξής:

$$dS = dH/T = (dU + pdV)/T \quad [1.4]$$

όπου η απειροστή μεταβολή της εντροπίας συνδέεται με την απειροστή μεταβολή της ενθαλπίας υπό τη θερμοδυναμική θερμοκρασία στην οποία αυτή πραγματοποιήθηκε.

Ας παρακολουθήσουμε ένα παράδειγμα για να κατανοήσουμε τη φύση της εντροπίας.

⁴ H. D. Baehr, Θερμοδυναμική, μετάφραση Κ. Πάττα, σελ. 57

Έστω ότι έχουμε δυο μάζες νερού από 1 kg η κάθε μία. Και οι δύο βρίσκονται αρχικά στους 0°C. Η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού υπό σταθερή πίεση είναι $c_p = 4,18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$.

Θερμαίνουμε τη μιά μάζα στους 20°C και την άλλη στους 100°C. Θα έχουμε προσδώσει στη μιά μάζα θερμότητα ίση με $4,18 \cdot 20 = 83,6 \text{ kJ}$ ενώ στην άλλη μάζα του νερού $4,18 \cdot 100 = 418 \text{ kJ}$.

Αν αναμείξουμε τις δύο μάζες νερού θα πάρουμε μιά νέα μάζα νερού 2 kg και θερμοκρασίας $(20+100)/2 = 60^\circ\text{C}$.

Ας εξετάσουμε τη μεταβολή του πηλίκου Q/T.

Πρίν την ανάμιξη έχουμε

$$Q_1/T_1 + Q_2/T_2 = 83,6/293 + 418/373 = 1,40 \text{ kJ/}^\circ\text{K}$$

Μετά την ανάμιξη έχουμε:

$$(83,6+418)/333 = 1,50 \text{ kJ/}^\circ\text{K}$$

Βλέπουμε ότι το μέγεθος Q/T του συστήματος των δύο μαζών του νερού αυξήθηκε μετά την ανάμιξη. Το μέγεθος αυτό ονομάζουμε εντροπία -βλέπε σχέση 1.4-.

Σχεδόν σε κάθε μεταβολή η οποία συμβαίνει στη φύση και ανάλογα και με το σύστημα αναφοράς μας, συμβαίνει συγχρόνως και αύξηση της εντροπίας. Η μελέτη των μεταβολών της εντροπίας είναι βασικό τμήμα της θερμοδυναμικής με ιδιαίτερα σημαντικές συνέπειες στην επιστήμη του μηχανικού, στους υπολογισμούς των θερμοδυναμικών συστημάτων αλλά και σε κοσμοθεωριακό και υπαρξιακό επίπεδο. Για περισσότερα ο ενδιαφερόμενος μπορεί να ανατρέξει στη σχετική βιβλιογραφία, [7,8].

Πίνακες και διαγράμματα ατμών

Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο να μελετήσει κάποιος τους πίνακες των ατμών -βλέπε παράρτημα-. Θα πρέπει να εξοικιωθεί με τα μεγέθη στις διάφορες στήλες των πινάκων και πώς εφαρμόζοντας τις βασικές εξισώσεις που αναφέρθηκαν στα παραπάνω προκύπτουν οι τιμές στις στήλες των πινάκων ατμών από τα θεμελιώδη καταστατικά μεγέθη που είναι η θερμοκρασία, ο ειδικός όγκος και η πίεση.

Αντίστοιχα με τους πίνακες ατμών είναι και τα διαγράμματα των ατμών. Στα διαγράμματα παριστάνονται γραφικά τα διάφορα καταστατικά μεγέθη και κυρίως τα ειδικά μεγέθη δηλαδή τα μεγέθη ανοιγμένα στη μονάδα της μάζας.

Τα κύρια διαγράμματα είναι το διάγραμμα Ts (Θερμοκρασίας -ειδικής εντροπίας) και το hs (ειδικής ενθαλπίας-ειδικής εντροπίας). Τα διαγράμματα αυτά δίδονται για το σύστημα νερό-ατμός στο παράρτημα. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να γίνει κατανοητή και να αποκτηθεί ευχέρεια στη χρήση τους. Η οπτική απεικόνιση των θερμοδυναμικών μεταβολών στα διαγράμματα είναι ιδιαίτερος χρήσιμη στην τεχνική θερμοδυναμική.

Παράδειγμα.

Έστω ότι έχουμε 1 kg κορεσμένου ατμού σε θερμοκρασία 200°C και 1 kg κορεσμένου νερού σε ίδια θερμοκρασία 200°C. Και οι δύο μάζες κινούνται μέσα σε έναν σωλήνα με ταχύτητα 20m/s.

Από τους πίνακες ατμών μπορούμε να βρούμε την εσωτερική ενέργεια, την ενθαλπία, την εντροπία και να υπολογίσουμε την κινητική ενέργεια των δύο μαζών ατμού. Τα αποτελέσματα βρίσκονται στον παρακάτω πίνακα.

	ατμός	νερό
Θερμοκρασία °C	200	200
Πίεση bar	15,5	15,5
Ειδικός όγκος m ³ /kg	0,12730	0,0011568
Εσ. Ενέργεια kJ/kg	2595,7	850
Ειδική ενθαλπία kJ/kg	2793,7	851,8
Ειδική εντροπία kJ/kg ^o K	6,4322	2,3293
Ειδ. Κινητική ενέργεια kJ/kg	0,2	0,2

Στον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε το πόσο μεγαλώνει η διαφορά μεταξύ ενθαλπίας και εσωτερικής ενέργειας καθώς μεταβαίνουμε από την υγρή στην αέρια φάση όπως επίσης και πόσο μικρή είναι η κινητική ενέργεια της μάζας του νερού/ατμού σε σχέση με την ενθαλπία του.

Συμπεράσματα από τους πίνακες και τα διαγράμματα των ατμών.

Μελετώντας τα διαγράμματα και τους πίνακες των ατμών προκύπτουν ορισμένα σημαντικά συμπεράσματα τα οποία είναι θεμελιώδη στην επιστήμη και την τεχνική του ενεργειακού μηχανικού. Ορισμένα από αυτά συνοψίζονται παρακάτω:

Ειδικός όγκος του ατμού.

Κατά την ατμοποίηση ο ειδικός όγκος του νερού πολλαπλασιάζεται. Από τους πίνακες ατμών προκύπτει ότι ο όγκος 1 κιλού νερού δεκαπλασιάζεται όταν αυτό ατμοποιηθεί. Αυτό έχει σημαντικές συνέπειες στην τεχνική: Περιορισμένο το νερό στον ίδιο χώρο εφόσον ατμοποιηθεί αναπτύσσει πολύ μεγάλες πιέσεις. Το υπέρθερμο νερό εάν φθάσει σε περιβάλλον χαμηλότερης πίεσης δεκαπλασιάζει τον όγκο του. Έτσι συστήματα παραγωγής υπερθέρμου νερού είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα σε περίπτωση διαρροής του υπερθέρμου νερού: δημιουργείται μιά "εκρηκτική" διεργασία με ταχύτατη αύξηση του όγκου του νερού καθώς αυτό ατμοποιείται ταχύτατα.

Ενθαλπία ατμοποίησης.

Η ενθαλπία ατμοποίησης είναι μεγάλη. Παρατηρούμε ότι για μηδενική διαφορά θερμοκρασίας -θερμοκρασία ατμοποίησης- προσδίδουμε μεγάλο ποσό θερμότητας στο νερό για να το ατμοποιήσουμε. Αντίστοιχα θα πρέπει να αφαιρέσουμε μεγάλο ποσό θερμότητας για να συμπυκνώσουμε τον ατμό. Η ιδιότητα αυτή του νερού-ατμού έχει κάνει τον ατμό το πλέον δημοφιλές μέσο μεταφοράς θερμότητας στη βιομηχανία: Μπορεί να μεταφέρει μεγάλα ποσά θερμότητας σε σταθερή θερμοκρασία.

Ο ενδιαφερόμενος μπορεί να παρατηρήσει τους πίνακες και τα διαγράμματα των ατμών και να βρει και άλλες σημαντικές ιδιότητες του συστήματος νερό -υδρατμός. Είναι επίσης χρήσιμο να εφαρμόσει κανείς τις σχέσεις υπολογισμού των

καταστατικών μεγεθών της εσωτερικής ενέργειας, της ενθαλπίας και τις εντροπίας μεταξύ των τιμών των μεγεθών αυτών που φαίνονται στους πίνακες των ατμών.

Ισοζύγια ενέργειας και μάζας

Έχοντας μελετήσει τις βασικές ιδιότητες του συστήματος νερό-υδρατμός θα πρέπει να γνωρίσουμε και τη μεθοδολογία με βάση την οποία αξιοποιούνται οι ιδιότητες αυτές. Η μεθοδολογία αυτή είναι η κατάστρωση των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας.

Γενικά ο στόχος των θερμοδυναμικών και ενεργειακών υπολογισμών είναι να μπορέσουμε έχοντας γνωστά ορισμένα δεδομένα να εκτιμήσουμε τις τιμές για άλλες άγνωστες παραμέτρους τις οποίες χρειαζόμαστε για την μελέτη των συστημάτων και των διεργασιών μας. Για να πετύχουμε τα παραπάνω χρησιμοποιούμε τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας. Για παράδειγμα ας δούμε το εξής:

Παράδειγμα.

Σε κάποιο εργοστάσιο τροφίμων θα πρέπει να τροφοδοτήσουμε με ατμό ένα θερμαντήρα νερού ο οποίος θα πρέπει να παράγει θερμό νερό 70oC για τις ανάγκες καθαρισμού των συσκευών. Ο θερμαντήρας είναι ένας εναλλάκτης ο οποίος στη μιά του πλευρά χρησιμοποιεί κορεσμένο ατμό ο οποίος συμπυκνώνεται και δίδει την θερμότητά του στο κρύο νερό των 20oC το οποίο θερμαίνεται στους 70 oC και κατόπιν αποθηκεύεται στις δεξαμενές του CIP⁵. Έστω ότι χρειαζόμαστε να παράγουμε 1 m³ νερό/ ώρα, 70oC. Τι παροχή κορεσμένου ατμού πίεσης 6 bar θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε;

Για να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε την απαιτούμενη παροχή ατμού θα πρέπει πρώτα να κάνουμε ορισμένες ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ:

- Υποθέτουμε ότι ο θερμαντήρας μας έχει πολύ μικρές θερμικές απώλειες από τα τοιχώματά του.
- Υποθέτουμε ότι ο θερμαντήρας έχει τον κατάλληλο σχεδιασμό ώστε να μπορεί να επιτύχει τα παραπάνω π.χ. αρκετά μεγάλη επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας.
- Δεν θα εξετάσουμε το εσωτερικό του θερμαντήρα τον οποίο θα θεωρήσουμε ως ένα "μαύρο κουτί"
- Υποθέτουμε ότι ο θερμαντήρας είναι κατασκευασμένος έτσι ώστε για τις παραπάνω συνθήκες ο ατμός εξέρχεται του θερμαντήρα ως υπόψυκτο νερό θερμοκρασίας 100oC και πίεσης 6bar. Επίσης υποθέτουμε ότι οι απώλειες πίεσης κατά τη διέλευση των ρευστών μέσα από τον εναλλάκτη είναι αμελητέες.

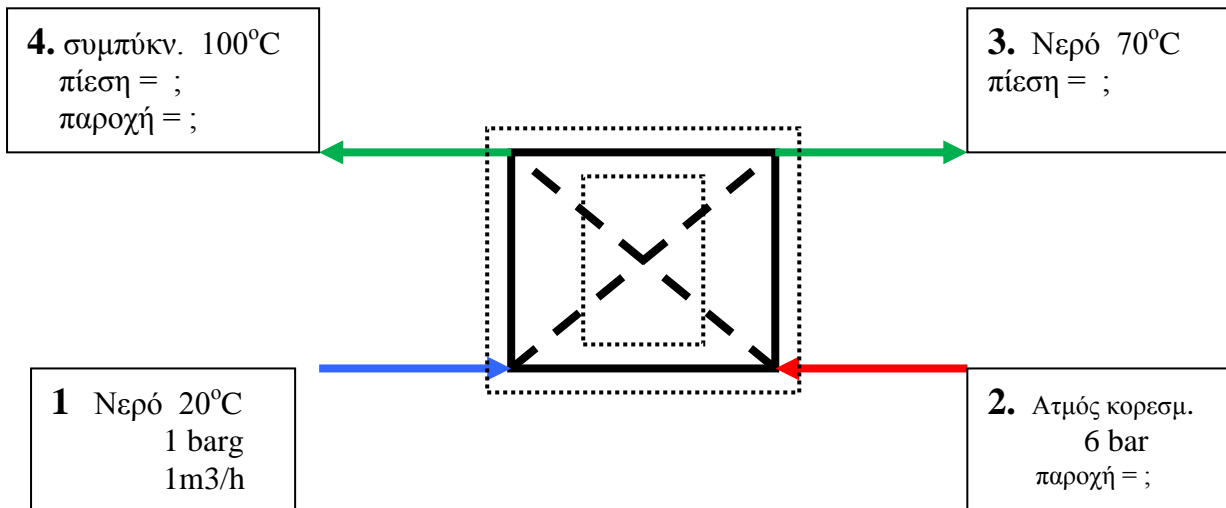
Με βάση τις παραπάνω υποθέσεις μπορούμε να σχεδιάσουμε τη διεργασία θέρμανσης του νερού όπως παρακάτω:

Στο σχήμα 2.5 φαίνεται σχηματικά ο εναλλάκτης (θερμαντήρας) με τα ρεύματα νερού και ατμού που τον διαπερνούν.

Κάθε ρεύμα ουσίας χαρακτηρίζεται με ένα αριθμό : 1, 2, 3, 4. Σε κάθε ρεύμα ουσίας αναγράφεται το είδος της ουσίας και τα χαρακτηριστικά του: πίεση και θερμοκρασία. Εάν θεωρούμε ότι και άλλες παράμετροι του ρεύματος είναι σημαντικές όσον αφορά

⁵Cleaning In Process. Όρος που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία τροφίμων για το νερό καθαρισμού των συσκευών επεξεργασίας της άυλης.

το ενεργειακό του περιεχόμενο θα πρέπει να αναγράψουμε και αυτές τις παραμέτρους π.χ. ταχύτητα η οποία θα προσέδιδε στο συγκεκριμένο ρεύμα ουσίας ένα σημαντικό ποσό κινητικής ενέργειας. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα έχουμε κάνει άλλη μία σημαντική υπόθεση : όλες οι άλλες ενεργειακές παράμετροι του εξεταζόμενου συστήματος είναι πολύ μικρές και μπορούν να μὴν ληφθούν υπόψη π.χ. κινητική ενέργεια, δυναμική ενέργεια, ηλεκτρομαγνητική ενέργεια κ.λ.π.



Σχήμα 2.5. αναπαράσταση των ρευμάτων στον εναλλάκτη

Τα γνωστά μεγέθη και οι τιμές τους φαίνονται στο σχήμα. Επίσης φαίνονται και τα άγνωστα μεγέθη. Αυτά είναι που προσπαθούμε να προσδιορίσουμε.

Το επόμενο βήμα είναι να ορίσουμε τον όγκο ελέγχου γύρω από τον οποίο θα καταστρώσουμε τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας. Ο όγκος ελέγχου θα μπορούσε να είναι αυτός που φαίνεται μέσα στον εναλλάκτη ή αυτός που περιλαμβάνει τον εναλλάκτη. Προτιμάμε τον δεύτερο διότι για αυτόν έχουμε ορισμένα γνωστά δεδομένα -αυτά που φαίνονται μέσα στις ετικέτες των ρευμάτων- ενώ για τον άλλο όγκο ελέγχου δεν έχουμε γνωστά δεδομένα διότι καθώς τα ρεύματα ουσίας έχουν ήδη εισέλθει στον εναλλάκτη έχουν υποστεί μεταβολές τις οποίες δεν γνωρίζουμε από τα διαθέσιμα στοιχεία μας.

Αν υποθέσουμε ότι η μάζα των ρευμάτων των ουσιών που διαπερνούν τον εναλλάκτη δεν εξαφανίζεται κάπου ή δεν γενιέται πρόσθετη μάζα μέσα στον όγκο ελέγχου μας είναι λογικό να σκεφτούμε ότι σε μόνιμη και όχι μεταβατική κατάσταση η μάζα η οποία εισέρχεται στον χώρο ελέγχου η ίδια εξέρχεται ή με άλλα λόγια το σύνολο των εισροών μάζας στον όγκο ελέγχου είναι ίσο με μηδέν. Αν αυτή τη σκέψη την γράψουμε ως μία εξίσωση τότε:

$$m_1 + m_2 + m_3 + m_4 = 0 \quad [2.1]$$

Η σχέση 2.1 είναι το ισοζύγιο μάζας στον χώρο ελέγχου μας.

Πρίν προχωρήσουμε θα πρέπει να κάνουμε μία ακόμα σύμβαση: να ορίσουμε πότε το πρόσημο σε μία τιμή θα είναι θετικό και πότε αρνητικό. Ας επιλέξουμε το αρνητικό

πρόσιμο να δείχνει κάποιο ρεύμα το οποίο εξέρχεται από τον όγκο ελέγχου και αντίθετα το θετικό να δείχνει αυτό το οποίο εισέρχεται.

Έχοντας υποθέσει ότι τα δύο ρεύματα ουσίας είναι χωρισμένα μεταξύ τους και επομένως δεν μεταφέρεται μάζα από το ρεύμα του νερού σε αυτό του ατμού μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το ισοζύγιο μάζας που αναφέρθηκε παραπάνω ισχύει και για το κάθε ρεύμα χωριστά. Επομένως:

$$m_1 + m_3 = 0 \quad \text{και} \quad m_1 = -m_3 \quad [2.2]$$

Παρομοίως

$$m_2 + m_4 = 0 \quad \text{και} \quad m_2 = -m_4 \quad [2.3]$$

Ας δούμε τώρα τι ποσό ενέργειας μεταφέρει μέσα στο χώρο ελέγχου το ρεύμα 1. Εφόσον έχουμε υποθέσει ότι όλες οι άλλες παράμετροι ενέργειας είναι αμελητέες το ποσό αυτό ενέργειας είναι

$$E_1 = m_1 * c_{p1} * \Delta T_1 \quad [2.4]$$

Το ίδιο ισχύει και για τα άλλα ρεύματα ουσίας 2,3 και 4.

Εφόσον η ανάλυσή μας αφορά μόνιμη και όχι μεταβαλλόμενη ή μεταβατική κατάσταση για τον όγκο ελέγχου μας θα ισχύει το Α' Θερμοδυναμικό αξίωμα. Εφόσον δεν έχουμε παραγωγή ή κατανάλωση ενέργειας εντός του χώρου ελέγχου μπορούμε να γράψουμε το Α' Θερμοδυναμικό αξίωμα με μιά σχέση ως εξής:

$$E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + \text{απώλειες} = 0 \quad [2.5]$$

Η σχέση 2.5 είναι το ισοζύγιο ενέργειας γύρω από το χώρο ελέγχου δηλ. γύρω από τον εναλλάκτη.

Χρησιμοποιώντας τη σχέση 2.4 αντικαθιστούμε τα ρεύματα ενέργειας στη σχέση 2.5 και έχουμε

$$m_1 * c_{p1} * \Delta T_1 + m_2 * c_{p2} * \Delta T_2 + m_3 * c_{p3} * \Delta T_3 + m_4 * c_{p4} * \Delta T_4 = 0 \quad [2.6]$$

μιά και έχουμε υποθέσει ότι οι απώλειες του εναλλάκτη είναι αμελητέες.

Στην παραπάνω σχέση θα μπορούσαμε να αντικαταστήσουμε τα γινόμενα $C_p * \Delta T$ με την ενθαλπία h εάν οι ενθαλπίες είναι υπολογισμένες ως προς την ίδια θερμοκρασία αναφοράς με το C_p και το ΔT . Στην περίπτωση αυτή η σχέση 2.6 γίνεται:

$$m_1 * h_1 + m_2 * h_2 + m_3 * h_3 + m_4 * h_4 = 0 \quad [2.7]$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 2.2 και 2.3 μπορούμε να ξαναγράψουμε τη σχέση 2.7 όπως παρακάτω:

$$m_1 * h_1 + m_2 * h_2 - m_1 * h_3 - m_2 * h_4 = 0$$

$$m_1 * (h_1 - h_3) + m_2 * (h_2 - h_4) = 0 \quad [2.8]$$

Από τους πίνακες ατμών οι οποίοι βρίσκονται στο παράρτημα βρίσκουμε τις ειδικές ενθαλπίες h_1, h_2, h_3 και h_4 . Επίσης έχουμε γνωστή την ροή μάζας m_1 η οποία είναι $1\text{m}^3/\text{h} = 0,277\text{ kg/s}$ αν θεωρήσουμε ότι 1m^3 νερού = 1000kg νερού.

Οι ενθαλπίες είναι:

$h_1 = 83,9\text{ kJ/kg}$	(πίνακας VI)
$h_2 = 2755,2\text{ KJ/kg}$	(πίνακας IV)
$h_3 = 292,8\text{ KJ/kg}$	(πίνακας VI)
$h_4 = 419,3\text{ KJ/kg}$	(πίνακας VI)

Αντικαθιστώντας τις τιμές και επιλύοντας την εξίσωση 2.8 βρίσκουμε τον μοναδικό άγνωστο της εξίσωσης που είναι η ροή μάζας m_2 δηλαδή η ροή μάζας του ατμού που απαιτείται για να θερμανθεί το $1\text{m}^3/\text{h}$ νερό από τους 20 στους 70 οC.

Η απάντηση στο παραπάνω πρόβλημα κατέστη εφικτή επειδή μπορέσαμε να καταστρώσουμε τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας. Αυτά δημιούργησαν τις εξισώσεις 2,3 και 6 τις οποίες, κανοντας ορισμένες παραδοχές, τις επιλύσαμε και βρήκαμε τους αγνώστους m_2, m_3 και m_4 .

Με την παραπάνω μεθοδολογία μπορούμε να καταστρώσουμε και να επιλύσουμε πολύ σύνθετα ισοζύγια μάζας και ενέργειας τα οποία ίσως οδηγήσουν στην απαίτηση για επίλυση συστημάτων πολλών εξισώσεων με πολλούς αγνώστους. Στις περιπτώσεις αυτές η επίλυση γίνεται με τις μεθοδολογίες που προσφέρουν τα μαθηματικά, η άλγεβρα των μητρώων και η αριθμητική ανάλυση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Μετάδοση θερμότητας

Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα κάνουμε μία σύντομη ανασκόπηση στα βασικά τμήματα της μετάδοσης θερμότητας τα οποία θα χρησιμοποιήσουμε στα παρακάτω κεφάλαια. Περισσότερο το κεφάλαιο αυτό στοχεύει στο να ενσωματώσει τις υφιστάμενες γνώσεις των φοιτητών στο αντικείμενο της μετάδοσης θερμότητας στο στόχο του συγκεκριμένου μαθήματος. Προυποτίθεται ότι ο αναγνώστης έχει τις απαραίτητες γνώσεις που αφορούν τη μετάδοση θερμότητας και οι οποίες μπορούν να ανακτηθούν από τα εγχειρίδια της βιβλιογραφίας, [11,12].

Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο ο εναλλάκτης θερμότητας θεωρήθηκε ως ένα μαύρο κουτί μέσα στο οποίο δεν γνωρίζουμε ποιά φαινόμενα λαμβάνουν χώρα. Το ισοζύγιο ενέργειας που κάναμε γύρω από τον εναλλάκτη μας έδωσε πληροφορίες μόνον για τις τιμές ορισμένων παραμέτρων στα ρεύματα εισόδου και εξόδου όχι όμως τι συμβαίνει στα ρεύματα αυτά καθώς αυτά διαπερνούν τον εναλλάκτη. Εάν για παράδειγμα ο εναλλάκτης δεν κατάφερνε να θερμάνει το νερό στους 70°C παρέχοντας τον ατμό που υπολογίσαμε με το ισοζύγιο ενέργειας του προηγούμενου κεφαλαίου αυτό δεν θα μπορούσαμε να το διορθώσουμε χωρίς να κατανοήσουμε τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα μέσα στο μαύρο κουτί δηλ. τον εναλλάκτη. Η κατανόηση και η περιγραφή με βάση μαθηματικές σχέσεις αυτών των φαινομένων είναι το αντικείμενο της μετάδοσης θερμότητας.

Τα είδη της μετάδοσης θερμότητας.

Όπως από την εμπειρία γνωρίζουμε, η θερμότητα μεταφέρεται από τα ποιά θερμά στα πιά ψυχρά μέσα. Με ποιά τρόπο όμως γίνεται αυτή η διεργασία και πώς μπορούμε να την περιγράψουμε ποσοτικά και όχι απλώς ποιοτικά; Στην προσπάθεια αυτή συμμετείχαν και συμμετέχουν πολλοί φυσικοί, μαθηματικοί μηχανικοί και άλλοι επιστήμονες. Καταρχήν έγινε μία προσπάθεια εξιδανίκευσης των πραγματικών φαινομένων μετάδοσης θερμότητας που απαντώνται στην φύση και στην τεχνική και έτσι προέκυψαν 3 διακριτοί τρόποι μετάδοσης θερμότητας: Η μετάδοση θερμότητας με

- αγωγή
- συναγωγή
- ακτινοβολία.

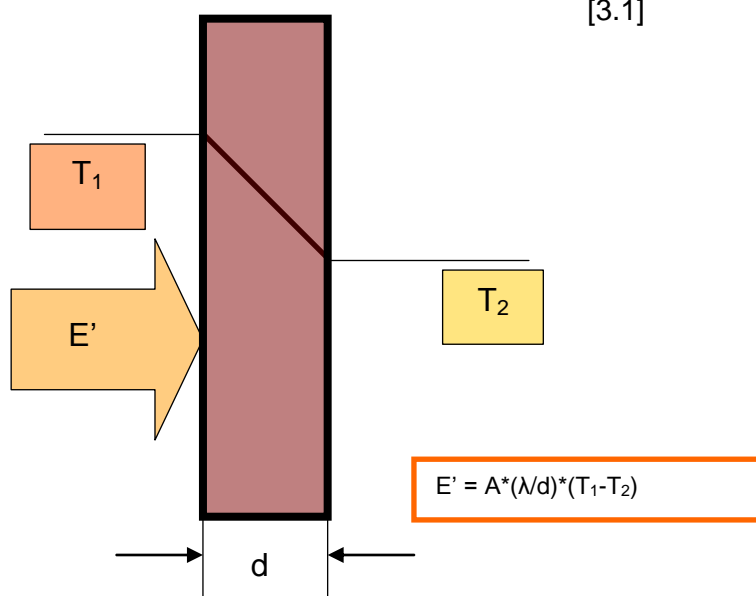
Στην πραγματικότητα είναι εξαιρετικά σπάνιο στη φύση να συμβαίνει μετάδοση θερμότητας αποκλειστικά με έναν μόνον τρόπο: στις περισσότερες περιπτώσεις έχουμε μετάδοση θερμότητας με συνδυασμό δύο ή και των τριών τρόπων που αναφέρθηκαν.

Μετάδοση θερμότητας με αγωγή.

Ας φανταστούμε ένα χαλύβδινο έλασμα πάχους αρκετών χιλιοστών. Έστω ότι στη μιά επιφάνεια του ελάσματος εφαρμόζουμε ένα τρόπο θέρμανσης και διατηρούμε τη θερμοκρασία του σταθερή σε π.χ. 150°C. Στην άλλη πλευρά του ελάσματος έστω ότι εφαρμόζουμε ένα τρόπο ψύξης και διατηρούμε τη θερμοκρασία του σε π.χ. 10 °C βλέπε σχήμα 3.1. Προφανώς θα μεταδίδεται θερμότητα από τη θερμή πλευρά του ελάσματος προς την ψυχρή μέσα από την μάζα του μετάλλου. Αυτός ο τρόπος μετάδοσης θερμότητας μέσα από την μάζα ενός μέσου λέγεται μετάδοση θερμότητας με αγωγή. Το μέσο μπορεί να είναι καλός ή κακός αγωγός θερμότητας εφόσον επιτρέπει με μεγαλύτερη ή μικρότερη ευκολία την αγωγή της θερμότητας. Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή περιγράφεται σε μία διάσταση από το νόμο του Fourier ο οποίος είναι:

$$E' = A \cdot (\lambda/d) \cdot (T_1 - T_2)$$

[3.1]



Σχήμα 3.1 Μετάδοση θερμότητας με αγωγή

Στην παραπάνω σχέση οι συμβολισμοί είναι:

A = επιφάνεια αγωγής

λ = συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού. Είναι μία σταθερά του υλικού και είναι γενικά διαφορετική από υλικό σε υλικό.

d = το πάχος του ελάσματος

T1 και T2 οι θερμοκρασίες στην θερμή και ψυχρή επιφάνεια του ελάσματος.

Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί ως μονοδιάστατη διαφορική εξίσωση όπως παρακάτω:

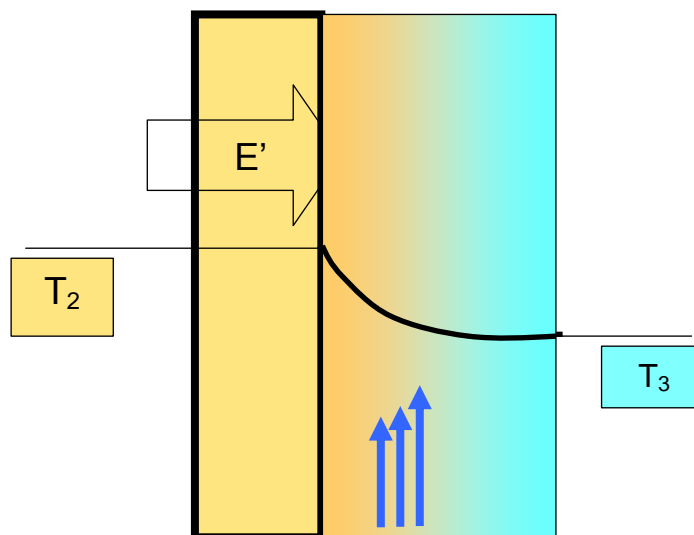
$$dE = A \cdot (\lambda/d) dT$$

[3.2]

Στη βιβλιογραφία, [11,12,13], μπορεί ο ενδιαφερόμενος να βρεί την έκφραση της εξίσωσης μετάδοσης θερμότητας με αγωγή σε τρεις διαστάσεις καθώς και σε κυλινδρικές ή σφαιρικές συντεταγμένες. Στην πράξη του μηχανικού οι εκφράσεις αυτές χρησιμοποιούνται σπάνια ενώ ποιά συνηθισμένη είναι η χρήση τους μέσω μεθόδων αριθμητικής ανάλυσης σε υπολογιστικά προγράμματα τα οποία πάλι στις περισσότερες περιπτώσεις είναι έτοιμα προς χρήση. Ο ενδιαφερόμενος μπορεί να βρεί σχετικά παραδείγματα χρήσης και προγραμματισμού των παραπάνω σχέσεων στη βιβλιογραφία, [14,15].

Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή.

Ας υποθέσουμε ότι το έλασμα του προηγούμενου παραδείγματος το ψύχουμε στην μιά πλευρά του κυκλοφορώντας κρύο νερό. Τότε το νερό που θα ήταν σε άμεση επαφή με το θερμό τοίχωμα του ελάσματος θα θερμαινόταν σε αντίθεση με αυτό το νερό το οποίο θα βρισκόταν σε μεγαλύτερη απόσταση από το τοίχωμα. Καθώς όμως το νερό θα έρεε παράλληλα με το τοίχωμα και ανάλογα με το αν η ροή του νερού θα ήταν στρωτή ή τυρβώδης θα δημιουργούνταν μικρότερη ή μεγαλύτερη ανάμιξη στα στοιχειώδη τμήματα του νερού που θα βρίσκονταν κοντά στο θερμό τοίχωμα με αυτά τα οποία θα βρίσκονταν μακριά του. Εφόσον περνούσε ικανός χρόνος ώστε τα φαινόμενα να αποκτήσουν μόνιμα χαρακτηριστικά θα περιμέναμε να σταθεροποιηθεί μιά μεταβολή θερμοκρασίας : μεγαλύτερη θερμοκρασία του νερού σε επαφή με το τοίχωμα-μικρότερη μακριά από αυτό. Τελικά θα υπήρχε μιά μετάδοση θερμότητας από το θερμό τοίχωμα προς την κύρια μάζα του νερού μέσω του στρώματος του νερού που είναι σε επαφή με το τοίχωμα και το οποίο ονομάζεται οριακό στρώμα. Αυτός ο τρόπος μετάδοσης θερμότητας διαμέσου ενός κινούμενου ρευστού λέγεται μετάδοση θερμότητας με συναγωγή, βλέπε σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2 Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή

Η σχέση που περιγράφει ένα απλό μονοδιάστατο φαινόμενο συναγωγής είναι η

$$E' = A \cdot k \cdot (T_2 - T_3) \quad [3.3]$$

Βλέπουμε ότι η σχέση 3.3 έχει μεγάλες ομοιότητες με την 3.1

Πράγματι εδώ ο παράγοντας d/λ έχει αντικατασταθεί από τον παράγοντα k . Ο παράγοντας k λέγεται συντελεστής συναγωγής και εξαρτάται όχι μόνον από τις φυσικές ιδιότητες του ρευστού μεταξύ των οποίων και την αγωγιμότητά του λ αλλά και από τη διάσταση του οριακού στρώματος, το βαθμό τύρβης της ροής και κατεπέκταση από τη γεωμετρία της περιοχής και τις συνθήκες ροής. Ένα μεγάλο μέρος της επιστήμης και της τεχνικής στον τομέα της μετάδοσης θερμότητας έχει επικεντρωθεί στον προσδιορισμό/υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής εφόσον είναι γνωστές ορισμένες βασικές παράμετροι όπως π.χ. η γεωμετρία, οι ταχύτητες ροής κ.λ.π. Μέχρι το 1970 ο προσδιορισμός του συντελεστή συναγωγής γινόταν αποκλειστικά με πειραματικές μεθόδους και χρησιμοποιώντας τους αδιάστατους αριθμούς οι οποίοι έχουν αναπτυχθεί για τη μελέτη της μετάδοσης θερμότητας και της ροής. Από τότε, στην αρχή με αργά βήματα αλλά πιά γρήγορα από το 1990 και μετά, αναπτύχθηκαν οι μεθοδολογίες προσδιορισμού του συντελεστή συναγωγής επιλύοντας τις εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν το τυρβώδες πεδίο ροής με τη βοήθεια υπολογιστή -μεθοδολογίες υπολογιστικής ρευστομηχανικής, [15,16]. Τις περισσότερες φορές απαιτούνται επαληθεύσεις με πειραματικά δεδομένα αλλά είναι πλέον δυνατός σε πολλές περιπτώσεις ο προσδιορισμός με αποδεκτή ακρίβεια του συντελεστή συναγωγής χωρίς καμιά πειραματική επαλήθευση.

Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία.

Ας φανταστούμε μία φλόγα η οποία περιβάλλεται από ένα χαλυβδοέλασμα. Η πλευρά του ελάσματος προς τη φλόγα θα θερμανθεί υψώνοντας σημαντικά τη θερμοκρασία του. Είναι το ίδιο φαινόμενο που παρατηρείται όταν καθόμαστε απέναντι από το τζάκι. Έχει αποδειχθεί ότι και κενό να υπήρχε μεταξύ της πηγής που ακτινοβολεί και του ελάσματος θα συνέβαινε και πάλι μετάδοση θερμότητας. Ο τρόπος αυτός μετάδοσης θερμότητας διαμέσου του κενού και ο οποίος οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δύο σωμάτων λέγεται μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία. Το πώς ακριβώς συμβαίνει είναι ένα θέμα που έχει να κάνει με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και το οποίο θα μπορούσαμε να πούμε ότι ακόμα δεν έχει απαντηθεί με απόλυτη βεβαιότητα. Το θέμα αυτό το εξετάζει η φυσική και η πυρηνική φυσική. Μακροσκοπικά όμως το φαινόμενο αυτό μεταξύ δύο επιφανειών με διαφορετική θερμοκρασία –βλέπε σχήμα 3.3- περιγράφεται από τις σχέσεις

$$E'_{12} = A \cdot \sigma \cdot (T_1/100)^4, \quad [3.4]$$

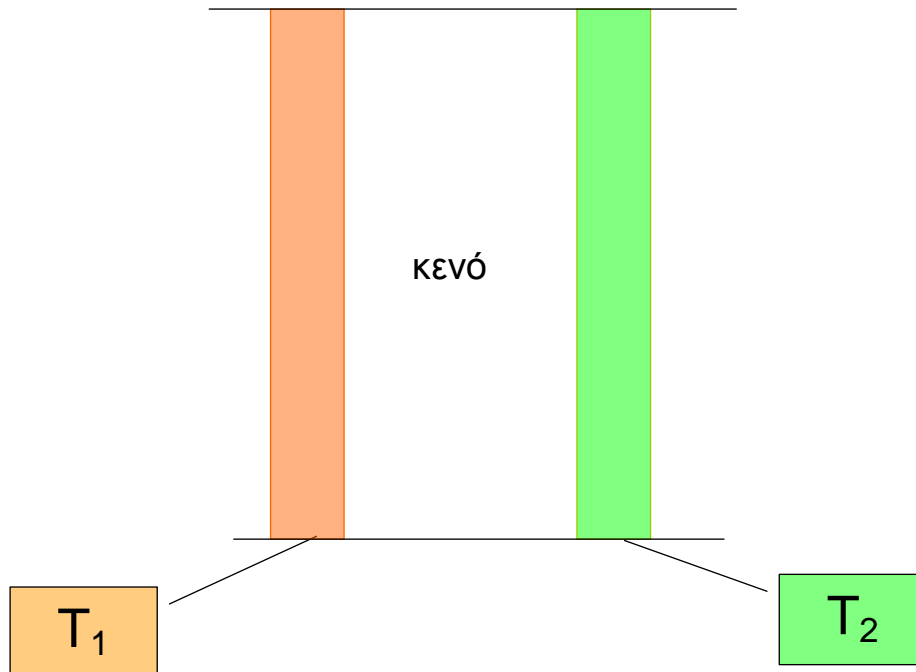
για τη μεταφορά θερμότητας από το σώμα 1 προς το 2 και

$$E'_{21} = A \cdot \sigma \cdot (T_2/100)^4 \quad [3.5]$$

για τη μεταφορά θερμότητας από το σώμα 2 προς το 1

Η καθαρή μεταφορά θερμότητας μεταξύ των σωμάτων 1 & 2 εφόσον τα A και σ ίδια θα είναι :

$$E' = A \cdot \sigma \cdot [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \quad [3.6]$$



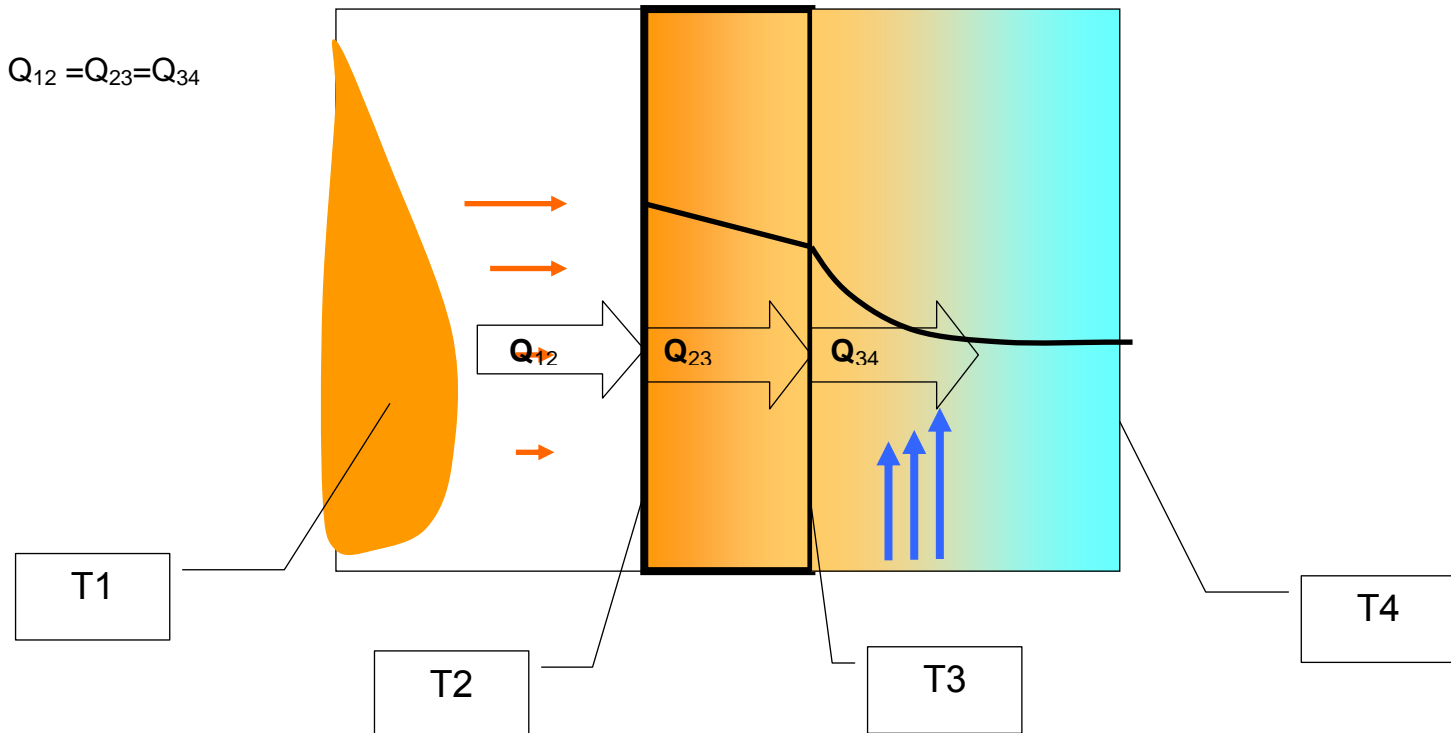
Σχήμα 3.3 Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία.

Η σχέση 3.6 είναι ο νόμος του Stefan -Boltzmann και περιγράφει την μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ δύο σωμάτων. Το σ είναι η σταθερά ακτινοβολίας ενώ το A είναι η επιφάνεια η οποία ακτινοβολεί. Εάν μεταξύ των δύο σωμάτων υπάρχει κάποιο υλικό διαφανές π.χ. αέρας τότε λαμβάνει χώρα και κάποια απορρόφηση ακτινοβολίας οπότε υπάρχει και ένας συντελεστής απορρόφησης ο οποίος παίρνει μέρος στην παραπάνω εξίσωση. Συνήθως ο συντελεστής αυτός συμβολίζεται με ϵ .

Σύνθετη μετάδοση θερμότητας.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην πράξη τις περισσότερες φορές η μετάδοση θερμότητας λαμβάνει χώρα ως ένας συνδυασμός των παραπάνω τρόπων. Θα μπορούσε αυτό να αναπαρασταθεί στο παρακάτω σχήμα 3.4.

Στο σχήμα αυτό θα μπορούσαμε να έχουμε την απλοποιημένη μετάδοση θερμότητας στο θάλαμο καύσης ενός φλογοαυλωτού λέβητα: Στον άξονα συμμετρίας του κυλινδρικού θαλάμου καύσης βρίσκεται η φλόγα του καυστήρα του λέβητα. Έξω από το χαλυβδοέλασμα του θαλάμου καύσης ρέει το νερό το οποίο θερμαίνει ο λέβητας. Τελικά η θερμότητα της φλόγας μεταβιβάζεται πρώτα κυρίως με ακτινοβολία προς το τοίχωμα του θαλάμου καύσης μετά με αγωγιμότητα από την εσωτερική πλευρά -της φλόγας- προς την εξωτερική πλευρά -του νερού- του ελάσματος με αγωγιμότητα και τέλος με συναγωγή από την εξωτερική πλευρά του ελάσματος του θαλάμου καύσης προς το ρέον νερό.



Σχήμα 3.4 Σύνθετη Μετάδοση θερμότητας

Παράδειγμα σύνθετης μετάδοσης θερμότητας.

Ας επικεντρωθούμε στα φαινόμενα του σχήματος 3.4. Θα μπορούσε το σχήμα 3.4 να είναι η τομή ενός ατμολέβητα όπου η φλόγα στο θάλαμο καύσης μεταδίδει με ακτινοβολία τη θερμότητά της στο εσωτερικό του τοιχώματος του θαλάμου καύσης από όπου με αγωγή η θερμότητα μεταφέρεται στο εξωτερικό του τοιχώματος και από εκεί με συναγωγή στο αναβράζον νερό που ρέει έξω από το θάλαμο καύσης. Η επίλυση αυτού του προβλήματος παρουσιάζεται στο παράρτημα.

Παράδειγμα.

Σε μια σύνθετη διαδικασία μεταφοράς θερμότητας έχουμε τοίχωμα το οποίο από την μια μεριά ακτινοβολείται ενώ από την άλλη ψύχεται με τη ροή ρευστού. Η θερμοκρασία του ακτινοβολούντος μέσου είναι $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η θερμοκρασία του ρευστού είναι $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Δίδονται τα παρακάτω:

1. σταθερά ακτινοβολίας μέλανος σώματος $\sigma = 5,67\text{ W/m}^2\text{oK}^4$
2. συντελεστής αγωγιμότητας τοιχώματος, $\lambda = 50\text{ W/moK}$.
3. Πάχος τοιχώματος $d = 10\text{ mm}$
4. συντελεστής συναγωγής από τη μεριά του ρευστού $\alpha = 10000\text{ W/m}^2\text{ oK}$
5. Θεωρείται ότι και η πηγή ακτινοβολίας και το τοίχωμα μπορούν να θεωρηθούν ως μέλανα σώματα. Επίσης μεταξύ της πηγής της ακτινοβολίας και του ακτινοβολούμενου τοιχώματος δεν υπάρχει καμιά απορρόφηση ακτινοβολίας και καμιά απώλεια ακτινοβολίας προς άλλες διευθύνσεις.

Να βρεθούν οι θερμοκρασίες στις δύο πλευρές του τοιχώματος.

Ειδικές περιπτώσεις μετάδοσης θερμότητας

Ως ειδικές περιπτώσεις μετάδοσης θερμότητας εννοούμε τις περιπτώσεις εκείνες όπου έχουμε π.χ. αλλαγή φάσης δηλ. βρασμό ή συμπύκνωση αλλά και άλλες διαμέσου πορώδους υλικού -πορώδες μέσο- κ.λ.π. Και αυτές οι περιπτώσεις είναι τελικά συνδυασμός των παραπάνω βασικών τρόπων μετάδοσης θερμότητας. Ο ενδιαφερόμενος μπορεί να βρεί σημαντικές πληροφορίες και δεδομένα στη βιβλιογραφία, [12].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Η καύση

Γενικά

Μια από τις βασικές διεργασίες που θα μελετήσουμε στη διάρκεια του μαθήματός μας είναι η καύση. Η καύση είναι το ξεκίνημα κάθε διαδικασίας παραγωγής έργου με θερμότητα εφόσον χρησιμοποιούμε ως πρωτογενή πηγή ενέργειας καύσιμα.

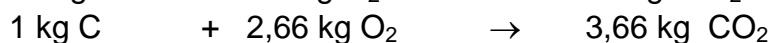
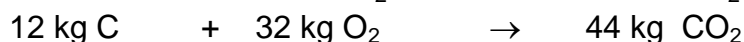
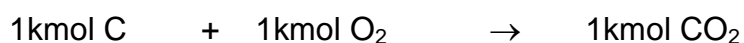
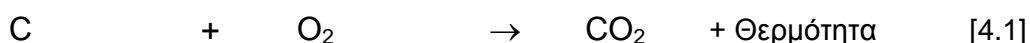
Η καύση είναι με απλά λόγια η μετατροπή της χημικής ενέργειας η οποία περιέχεται σε ορισμένες ουσίες σε θερμότητα εφόσον υπάρξουν κατάλληλες συνθήκες – συνθήκες έναυσης-. Κατόπιν, με βάση τα όσα θα μάθουμε για τις μετατροπές της ενέργειας προσπαθούμε να μετατρέψουμε αυτή τη θερμότητα σε έργο. Από χημικής απόψεως η καύση είναι η οξείδωση ορισμένων συστατικών των καυσίμων και κυρίως του άνθρακα προς οξείδια. Οξείδωση είναι η ένωση αυτών των συστατικών με το οξυγόνο. Συνήθως η χημική αυτή αντίδραση είναι εξώθερμη εκλύεται λοιπόν κατά την οξείδωση αυτή σημαντικό ποσό θερμότητας το οποίο προσπαθούμε να αξιοποιήσουμε ενεργειακά.

Οι εξισώσεις της καύσης.

Η μελέτη της καύσης ξεκινά πάντα από την μελέτη των εξισώσεων της καύσης.

Η κύρια αντίδραση η οποία λαμβάνει χώρα κατά την καύση ενός τυπικού καυσίμου είναι η οξείδωση του άνθρακα προς διοξείδιο του άνθρακα και του υδρογόνου προς νερό. Αυτή περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση εφαρμόζοντας τα γραμμομοριακά ισοζύγια που είναι γνωστά από τη Χημεία. Έτσι γράφονται και τα αντίστοιχα ισοζύγια μάζας.

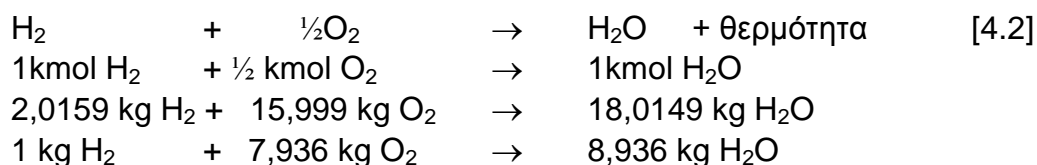
Οξείδωση άνθρακα.



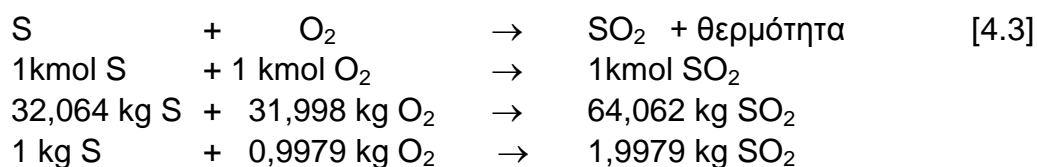
Η παραπάνω εξίσωση οξειδωσης του άνθρακα λέγεται **στοιχειομετρική** διότι οι ποσότητες ουσίας που χρησιμοποιούνται είναι ακριβώς αυτές που απαιτούνται για μια τέλεια αντίδραση –ούτε περισσότερες ούτε λιγότερες-.

Με ίδιο τρόπο αντιμετωπίζεται και η οξειδωση των άλλων ουσιών οι οποίες απαντώνται συνήθως στα καύσιμα και οι οποίες αντιδρούν με το οξυγόνο.

Οξειδωση υδρογόνου



Οξειδωση θείου



Μια ακόμα αντίδραση η οποία λαμβάνει χώρα κατά την καύση ενός τυπικού καυσίμου είναι η οξειδωση του αζώτου προς οξειδία του αζώτου –NO_x-. Το μεγαλύτερο μέρος του αζώτου παραμένει αδρανές και έτσι εμφανίζεται ως καθαρό άζωτο στα προϊόντα της καύσης μαζί με το CO₂ το νερό κ.λ.π. μικρό τμήμα όμως του αζώτου οξειδώνεται προς οξειδία του αζώτου –NO_x-. Αυτή η αντίδραση ενώ έχει μεγάλη περιβαλλοντική σημασία λόγω της παραγωγής των βλαβερών οξειδίων του αζώτου, επειδή λαμβάνει χώρα σε πολύ μικρότερη έκταση σε σχέση με τις προαναφερθείσες οξειδώσεις παράγοντας πολύ μικρές ποσότητες –ppm- από οξειδία του αζώτου δεν έχει σημαντική άμεση ενεργειακή σημασία. Για τον λόγο αυτό δεν θα μελετηθεί στο παρόν μάθημα. Ο ενδιαφερόμενος μπορεί να ανατρέξει στην βιβλιογραφία για να μάθει τις παραμέτρους οι οποίες επηρεάζουν την παραγωγικότητα της οξειδωσης του αζώτου καθώς και άλλες σημαντικές λεπτομέρειες που αφορούν την παραγωγή οξειδίων του αζώτου, [17].

Τα καύσιμα.

Τα καύσιμα περιέχουν συστατικά τα οποία όταν ενωθούν με το οξυγόνο εκλύουν θερμότητα. Τέτοια συστατικά συνήθως είναι:

-ο άνθρακας [c]
 -το υδρογόνο [h]
 -το θείο [s]

Οι παραπάνω χημικές ουσίες αποτελούν και τα κύρια συστατικά των καυσίμων που απαντώνται στη φύση ή που παράγονται με κατάλληλες μεθόδους από άλλα πρωτογενή καύσιμα.

Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στην πράξη περιέχουν ένα ποσοστό από τις παρακάτω χημικά καθαρές ουσίες:

-άνθρακας	[c]
-υδρογόνο	[h]
-θείο	[s]
-Αζωτο	[n]
-Οξυγόνο	[o]
-Ακαυστες ουσίες	[α]
-Νερό -υγρασία	[w]

Η κατά μάζα σύσταση κάθε τεχνικού καυσίμου περιγράφεται από την περιεκτικότητά κατά μάζα της κάθε ουσίας –στοιχειομετρία του καυσίμου-. Για παράδειγμα το βαρύ πετρέλαιο θερμάνσεως –μαζούτ- έχει κατά μέσο όρο σύσταση :

-άνθρακας	[c],	0,849
-υδρογόνο	[h],	0,106
-θείο	[s],	0,035
-Αζωτο+οξυγόνο	[n+o]	0,010

-Σύνολο		1,000

Κάθε καύσιμο έχει μια πυκνότητα η οποία μετριέται σε kg/m^3 ή σε kg/Nm^3 - χιλιόγραμμα /κανονικό m^3 -για τα αέρια καύσιμα. Κανονικό m^3 είναι η ποσότητα αερίου που περικλείεται σε όγκο 1 m^3 υπό κανονικές συνθήκες, (πίεση 1 bar και θερμοκρασία 0°C).

Τα καύσιμα χωρίζονται σε

- στερεά καύσιμα,
- υγρά καύσιμα,
- αέρια καύσιμα.

Ο διαχωρισμός αυτός είναι μεγάλης σπουδαιότητας για την τεχνική της καύσης. Ανάλογα με τον τύπο του καυσίμου χρησιμοποιείται διαφορετικός εξοπλισμός καύσης και υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι αποθήκευσης και μεταφοράς τους.

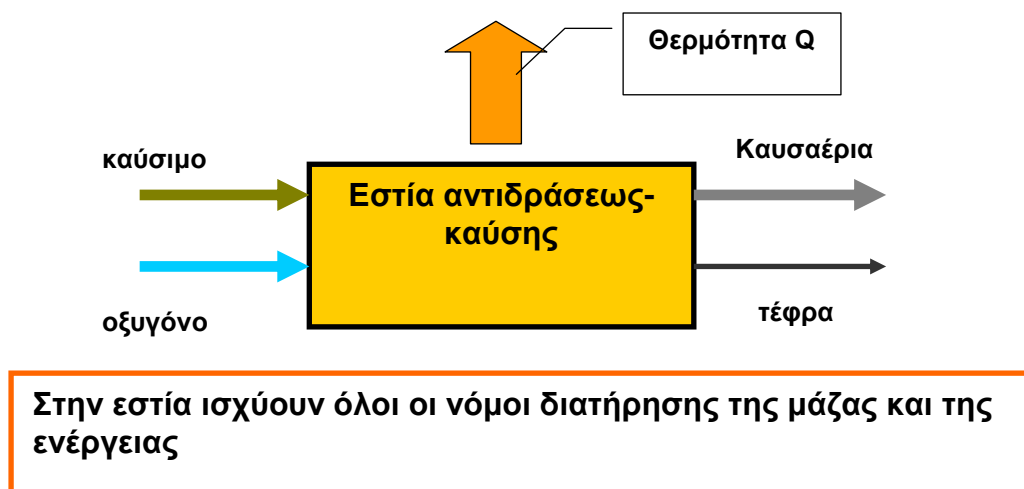
Τα καύσιμα μπορεί να είναι :

1. Είτε χημικές ενώσεις π.χ. CH_4 , C_3H_8 .
2. Είτε μίγματα χημικών ενώσεων π.χ. 80% CH_4 , 20% C_3H_8
3. Είτε μίγματα ουσιών –κυρίως για τα στερεά και υγρά καύσιμα- οπότε τα προσδιορίζουμε με τη στοιχειομετρία τους κ.μ. όπως έχει αυτή αναλυθεί στα παραπάνω π.χ. $c=0,8$, $h=0,15$, $s= 0,05$.

Η καύση

Σε βασικό επίπεδο η θερμοδυναμική μελέτη της καύσης δεν είναι παρά ένα ισοζύγιο ενέργειας και μάζας γύρω από τον χώρο της καύσης που λέγεται εστία καύσης.

Στη γενική περίπτωση μια καύση μπορεί να παρασταθεί σχηματικά όπως στο παρακάτω σχήμα 4.1:



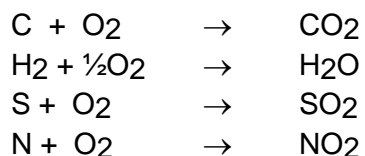
Σχήμα 4.1 Σχηματική αναπαράσταση των ροών εισόδου και εξόδου σε μιά εστία καύσης.

Στην εστία προωθείται καύσιμο. Συγχρόνως θα πρέπει να παρέχουμε και το απαραίτητο για την καύση οξυγόνο ώστε να ολοκληρωθούν οι αντιδράσεις της καύσης. Συνήθως το οξυγόνο παρέχεται μέσω του ατμοσφαιρικού αέρα αν και τα τελευταία χρόνια για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας γίνονται προσπάθειες για εφαρμογές καύσης με οξειδωτικό καθαρό οξυγόνο. Συνήθως από την εστία της καύσης απομακρύνεται με τους μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας που έχουμε αναλύσει στο προηγούμενο κεφάλαιο ένα ποσό θερμότητας Q . Συγχρόνως από την εστία απομακρύνονται τα υπολείμματα της καύσης δηλ. τα καυσαέρια και η τέφρα.

Ισοζύγια μάζας στην εστία καύσης

Τα ισοζύγια μάζας σε μια εστία καύσης προκύπτουν από τις χημικές εξισώσεις της καύσης 4.1 έως 4.3, –στοιχειομετρικές εξισώσεις–.

Αυτές είναι κατά βάση οι:



Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω η οξείδωση του αζώτου συμβαίνει σε μικρό βαθμό και στα παρακάτω θα θεωρηθεί ότι το άζωτο δεν αντιδρά με το οξυγόνο αλλά παραμένει αδρανές στα προϊόντα της καύσης –καυσαέρια–. Οι στοιχειομετρικές εξισώσεις –ή αλλιώς γραμμομοριακές εξισώσεις– περιγράφουν τις ποσότητες μάζας που απαιτούνται από κάθε συστατικό για να πραγματοποιηθεί μια τέλεια αντίδραση καύσης.

Τα ισοζύγια μάζας σε μια εστία καύσης έχουν σκοπό να προσδιορίσουν τις ποσότητες μάζας των κυρίων ουσιών που χρησιμοποιούνται στην καύση. Συνήθως οι υπολογισμοί γίνονται για την μονάδα μάζας του καυσίμου οπότε υπολογίζονται οι ειδικές ποσότητες αυτών των ουσιών. Αυτές είναι:

1. Η ειδική απαιτούμενη -γραμμομοριακή ή στοιχειομετρική -ποσότητα οξυγόνου για την καύση.

2. Μέσω της περιεκτικότητας του αέρα σε οξυγόνο –21% κ.ο.- η ειδική -γραμμομοριακή ή στοιχειομετρική -απαιτούμενη ποσότητα αέρα για την καύση μια και συνήθως το απαιτούμενο για την καύση οξυγόνο προέρχεται συνήθως από τον αέρα της ατμόσφαιρας.

3. Η ειδική πραγματική ποσότητα αέρα καύσης η οποία λαμβάνει υπόψη της και την περίσσεια του αέρα κάυσης.

4. Η ειδική παραγόμενη ποσότητα καυσαερίων.

Ειδική απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου και αέρα

Για κάθε καύσιμο υπολογίζουμε από τις σχέσεις 4.1 –4.3 την απαιτούμενη για την καύση ειδική γραμμομοριακή μάζα του οξυγόνου.

$$N_o = C/12 + S/32 + H/2 - O/32 \quad \text{kmol } O_2/\text{kg καυσίμου}$$

Όπου τα c, s, h, o είναι τα ποσοστά μάζας του κάθε συστατικού στο καύσιμο.

Ο αέρας περιέχει 21% κ.ο οξυγόνο. Επομένως η ειδική γραμμομοριακή ανάγκη σε αέρα είναι:

$$N_a = N_o \cdot (100/21) \quad \text{kmol αέρα /kg καυσίμου}$$

και για να μετατρέψουμε σε κιλά αέρα χρησιμοποιούμε τη μοριακή μάζα του αέρα.

$$M_a = 28,96 \cdot N_a \quad \text{kg αέρα/kg καυσίμου.}$$

Χρησιμοποιώντας τις γραμμομοριακές μάζες του οξυγόνου και του αέρα προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις για τον υπολογισμό της ειδικής απαιτούμενης στοιχειομετρικής μάζας οξυγόνου και αέρα καύσης

$$M_o = 2,666 c + 7,939 h + 0,998 s - o \quad \text{kg } O_2/\text{kg καυσίμου} \quad [4.4]$$

$$M_a = M_o \cdot 100/23,3 = M_o \cdot 4,2918 \quad \text{kg αέρα/kg καυσίμου} \quad [4.5]$$

Στην πράξη δεν μπορεί να επιτευχθεί καλή καύση με τη στοιχειομετρική ποσότητα του αέρα. Έτσι χρησιμοποιούμε περίσσεια αέρα δηλ αέρα περισσότερο από αυτόν που προβλέπεται από τις χημικές εξισώσεις της καύσης.

$$M_A = \lambda \cdot M_a \quad [4.6]$$

Το λ ονομάζεται **λόγος αέρα** και είναι :

$$\lambda = M_A / M_\alpha = N_A / N_\alpha \quad [4.7]$$

Όσο μεγαλύτερο είναι το λ τόσο μεγαλύτερη είναι η περίσσεια αέρα.

Ο χρησιμοποιούμενος λόγος αέρα εξαρτάται από το είδος του καυσίμου, από τον σχεδιασμό της εστίας καύσης αλλά και από άλλους παράγοντες.

Για αέρια καύσιμα είναι συνήθως $\lambda = 1,05- 1,15$

Για υγρά καύσιμα είναι συνήθως $\lambda = 1,1- 1,2$

Για στερεά καύσιμα είναι συνήθως $\lambda = 1,15- 1,3$

Ο λόγος αέρα μπορεί να διαφοροποιείται σε κάθε περίπτωση ανάλογα με ειδικές ανάγκες ή συνθήκες και είναι μέγεθος το οποίο συνήθως προσδιορίζεται πειραματικά.

Ειδική παραγόμενη ποσότητα καυσαερίων και η σύστασή τους

Όπως φάνηκε από τις εξισώσεις της καύσης, η ποσότητα και η σύσταση των καυσαερίων εξαρτάται άμεσα από:

1. Τη στοιχειομετρία του καυσίμου.
2. Το λόγο αέρα

Η σύσταση των καυσαερίων υπολογίζεται από τις στοιχειομετρικές εξισώσεις της καύσης λαμβάνοντας υπόψη και την περίσσεια του αέρα.

Εφαρμόζοντας τα ισοζύγια μάζας που προκύπτουν από τις εξισώσεις 4.1 – 4.3 και χρησιμοποιώντας και τις εξισώσεις 4.6 το τελικό αποτέλεσμα έχει ως εξής:

$$M_{CO_2} = 3,664 * C \quad \text{kg CO}_2/\text{kg καυσίμου} \quad [4.8]$$

$$M_{H_2O} = 8,937 * H + w \quad \text{kg H}_2\text{O}/\text{kg καυσίμου} \quad [4.9]$$

$$M_{SO_2} = 1,998 * S \quad \text{kg SO}_2/\text{kg καυσίμου} \quad [4.10]$$

$$M_{O_2} = 0,232 * (\lambda - 1) * M_\alpha \quad \text{kg O}_2/\text{kg καυσίμου} \quad [4.11]$$

$$M_{N_2} = 0,768 * \lambda * M_\alpha + n \quad \text{kg N}_2/\text{kg καυσίμου} \quad [4.12]$$

Η ειδική ποσότητα των καυσαερίων που παράγονται είναι:

$$M_{fg} = 1 - \alpha + \lambda * M_\alpha \quad \text{kg καυσαερίου/kg καυσίμου} \quad [4.13]$$

Όπου α οι άκαυστες ουσίες.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι εάν γνωρίζουμε την περιεκτικότητα των καυσαερίων σε οξυγόνο μπορούμε να υπολογίσουμε την περίσσεια αέρα η οποία χρησιμοποιήθηκε στην καύση. Στην αρχή αυτή βασίζονται τα περισσότερα όργανα ανάλυσης της καύσης: μετράνε την περιεκτικότητα των καυσαερίων σε οξυγόνο και υπολογίζουν κατόπιν την περίσσεια αέρα.

Παράδειγμα: Υπολογισμός των συστατικών της καύσης σε στερεό καύσιμο

Μπρικέςτες λιγνίτη με στοιχειακή ανάλυση $c=0,517$, $h=0,040$ $s=0,006$ $o=0,207$ $n=0,010$ $w=0,160$ $a=0,060$ καίγονται με λόγο αέρα $\lambda=1,3$. Να υπολογιστεί η ανάγκη σε αέρα, η ποσότητα και η σύνθεση των καυσαερίων.

Η ειδική γραμμομοριακή ανάγκη σε οξυγόνο είναι:

$$2,664c + 7,937h + 0,998s - o = 1,493 \text{ kg O}_2/\text{kg καυσίμου.}$$

Άρα η ειδική γραμμομοριακή ανάγκη σε αέρα είναι:

$$M_\alpha = 1,493 \cdot 4,2918 = 6,407 \text{ kg αέρα/kg καυσίμου}$$

Η ειδική πραγματική ποσότητα αέρα καύσης είναι :

$$M_A = \lambda \cdot M_\alpha = 8,366 \text{ kg αέρα/kg καυσίμου}$$

Επομένως η ειδική παραγωγή καυσαερίων είναι:

$$M_{fg} = 1 - \alpha + \lambda \cdot M_\alpha = 9,306 \text{ kg καυσαερίου/kg καυσίμου.}$$

Με βάση τις ειδικές ποσότητες αέρα καύσης και καυσαερίων μπορούμε να βρούμε την ποσότητα αέρα καύσης που θα απαιτούνταν για την καύση μιάς συγκεκριμένης παροχής λιγνίτη.

Ειδικά κεφάλαια που αφορούν τα ισοζύγια μάζας στην εστία καύσης.

Υπολογισμοί των συστατικών της καύσης σε μίγμα αερίων καυσίμων

Στις περιπτώσεις μίγματος αερίων, οπότε από το μίγμα αυτό προκύπτει ένα καύσιμο αέριο, μπορούμε από την αναλογία των αερίων συστατικών του μίγματος να υπολογίσουμε τη στοιχειομετρία του. Η μεθοδολογία αυτή έχει εφαρμογή σε όλα τα αέρια καύσιμα π.χ. Φυσικό αέριο ή υγραέριο.

Η αντιμετώπιση αυτών των υπολογισμών είναι καλύτερα να γίνεται σε μορφή πίνακα ώστε να υπάρχει εποπτεία των υπολογισμών και των αποτελεσμάτων. Για παράδειγμα μπορούμε να εφαρμόσουμε την προσέγγιση αυτή στο Φωταέριο.

Το φωταέριο είναι μίγμα μερικών καθαρών αερίων. Η σύστασή του σε μοριακά ποσοστά είναι: 10% CO, 45% H₂, 35% CH₄, 4% C₂H₄, 2% O₂, 2% N₂, 2% CO₂. Η σύσταση του φωταερίου σε μοριακά ποσοστά με πολύ μεγάλη ακρίβεια ταυτίζεται με την κατ'όγκον σύστασή του εάν τα αέρια συστατικά και το φωταέριο θεωρηθούν ως τέλεια –ιδανικά αέρια.

Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να καταστρώσουμε τον παρακάτω πίνακα με βάση τον οποίο υπολογίζεται η στοιχειομετρία του Φωταερίου. Στη συνέχεια και με βάση τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν στα παραπάνω μπορεί να υπολογιστεί η απαραίτητη

ποσότητα αέρα για την καύση καθώς και η ποσότητα των καυσαερίων και η σύστασή τους.

χημική ουσία	μοριακό ποσοστό	moles στοιχείου σε moles ουσίας					Μοριακή μάζα [kg/kmol]					περιεκτικότητα του κάθε στοιχείου σε kmol/kmol καυσίμου				
		c	h	o	n	s	c	h	o	n	s	w	a			
CO	0,1	1		0,5			0,1	0	0,05	0	0					
H2	0,45		1				0	0,45	0	0	0					
CH4	0,35	1	2				0,35	0,7	0	0	0					
C2H4	0,04	2	2				0,08	0,08	0	0	0					
O2	0,02			1			0	0	0,02	0	0					
N2	0,02				1		0	0	0	0,02	0					
CO2	0,02	1		1			0,02	0	0,02	0	0					
				ΣΥΝΟΛΟ	kmol/kmol καυσίμο		0,55	1,23	0,09	0,02	0					
					kg/kmol καυσίμου		6,606	2,48	2,88	0,56	0			12,52521	συνολικά kg/kmol καυσίμου	
					στοιχειακή ανάλυση		0,53	0,2	0,23	0,04	0			1		

Προσδιορισμός της θερμοκρασίας υγροποίησης –δρόσου-των καυσαερίων

Εφόσον στο καύσιμο περιέχεται υγρασία ή υδρογόνο, στα καυσαέρια περιέχεται πάντα νερό. Σε υψηλές θερμοκρασίες των καυσαερίων το νερό βρίσκεται σε κατάσταση υδρατμού, αν όμως τα καυσαέρια κρυώσουν τότε το νερό αυτό υγροποιείται.

Η υγροποίηση των υδρατμών οι οποίοι περιέχονται στα καυσαέρια δημιουργεί με τα οξείδια του θείου και του αζώτου τα οποία περιέχονται στα προϊόντα της καύσης θειώδες ή νιτρώδες οξύ με βάση την αντίδραση



Τα οξέα αυτά είναι διαβρωτικά με αποτέλεσμα να διαβρώνουν τα μεταλλικά τμήματα του λέβητα ή της καπνοδόχου και να συμβαίνει αστοχία των υλικών σε μικρό χρονικό διάστημα. Έτσι είναι σημαντικό να αποφεύγεται η υγροποίηση των υδρατμών ή αυτή να γίνεται σε συγκεκριμένη περιοχή στην οποία έχουν ληφθεί τα σχετικά αντιδιαβρωτικά μέτρα. Είναι λοιπόν σημαντικό να μπορούμε να προσδιορίσουμε τη θερμοκρασία στην οποία θα υγροποιηθούν οι περιεχόμενοι στα καυσαέρια υδρατμοί. Η υγροποίηση των υδρατμών στα καυσαέρια θα γίνει όταν η θερμοκρασία των καυσαερίων φθάσει τη θερμοκρασία κορεσμού των υδρατμών οι οποίοι περιέχονται στα καυσαέρια.

Η θερμοκρασία κορεσμού εξαρτάται από τη μερική πίεση των υδρατμών μέσα στα καυσαέρια. Εφόσον γνωρίζουμε την περιεκτικότητα των καυσαερίων σε νερό μπορούμε να βρούμε τη μερική πίεση των υδρατμών εφαρμόζοντας τη σχέση

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = P_{\text{καυσαερίων}} * \psi_{\text{H}_2\text{O}}$$

Όπου $\psi_{\text{H}_2\text{O}}$ το μοριακό ποσοστό των υδρατμών στα καυσαέρια.

Κατόπιν από τους πίνακες ατμών βρίσκουμε τη θερμοκρασία υγροποίησης του υδρατμού στη μερική αυτή πίεση.

Παράδειγμα: Υπολογισμός της σύστασης και της θερμοκρασίας δρόσου των καυσαερίων.

Για το προηγούμενο παράδειγμα του φωταερίου θα υπολογίσουμε τη σύσταση και τη θερμοκρασία δρόσου των καυσαερίων που θα προκύψουν από την καύση φωταερίου με $\lambda = 1$.

	kg/kgfuel	Combustion products, mi						TOTAL
		CO2/kgf	H2O/kgf	N2/kgf	O2/kgf	NO2/kgf	SO2/kgf	καυσαέρια/kgfuel
c =	0,53	1,94192						
h =	0,2		1,7874					
o =	0,23				0			
n =	0,04			9,159663		0		
s =	0,00E+00						0	
w =	0,00E+00		0,00E+00					
a =	0,00E+00							
TOT, kg/kgfuel	1	1,94192	1,7874	9,159663	0	0	0	12,88898
TOTAL kg-mol/kgfuel		0,044125	0,099245	0,327014	0	0	0	0,470383
TOTAL Nlt/kgfuel		988,3892	2223,085	7325,114	0	0	0	10536,59
Περιεκτικότητα των καυσαερίων		9,381	21,099	69,521	0,000		0	

Στην τελευταία σειρά του πίνακα έχει υπολογιστεί η % κ.ο. σύσταση των καυσαερίων.

Θεωρώντας ότι όλα τα προϊόντα της καύσης μπορούν με καλή προσέγγιση να θεωρηθούν τέλεια αέρια η μερική πίεση των υδρατμών είναι 0,21 bar όση δηλαδή και η κατόγκον περιεκτικότητα των υδρατμών στα απαέρια της καύσης -καυσαέρια-. Από τους πίνακες ατμών βρίσκουμε τη θερμοκρασία κορεσμού των υδρατμών σε πίεση 0,21 bar. Αυτή είναι περίπου 70 οC. Αυτή είναι η θερμοκρασία δρόσου των καυσαερίων.

Ισοζύγιο ενέργειας στην εστία της καύσης

Στα προηγούμενα κεφάλαια είδαμε την κατάσθρωση του ισοζυγίου μάζας στην εστία καύσης και πώς με τη βοήθειά του μπορούμε να υπολογίσουμε ορισμένα σημαντικά μεγέθη της καύσης όπως την απαιτούμενη ποσότητα του αέρα καύσης, την παραγόμενη ποσότητα των καυσαερίων και τη σύσταση των καυσαερίων. Στο κεφάλαιο αυτό θα δούμε πώς μπορούμε να υπολογίσουμε και άλλες σημαντικές παραμέτρους της καύσης με κυριώτερη τη θερμοκρασία της φλόγας και των καυσαερίων. Για το σκοπό αυτό δεν μας αρκεί το ισοζύγιο μάζας, πρέπει να εφαρμόσουμε και το ισοζύγιο ενέργειας.

Το ισοζύγιο ενέργειας μπορούμε να το εφαρμόσουμε γύρω από την εστία της καύσης. Σύμφωνα με τον τρόπο κατάσθρωσης των ισοζυγίων που έχουμε μάθει στο κεφάλαιο 2 και με βάση το σχήμα 4.1 έχουμε:

$$Q' + m'fg * C_{pfg} * \Delta T_{fg} = m'f * (C_{pf} * \Delta T_f + \Delta h_u) + m'a * C_{pa} * \Delta T_a \quad [4.14]$$

Στην εξίσωση 4.14 οι συμβολισμοί είναι:

- fg τα καυσαέρια
- f το καύσιμο
- a ο αέρας

Επίσης τα σύμβολα με τόνο συμβολίζουν το συγκεκριμένο μέγεθος στην μονάδα του χρόνου. Για παράδειγμα Q' σημαίνει θερμότητα Q στην μονάδα του χρόνου δηλαδή ροή θερμότητας. Αντίστοιχα οι μονάδες είναι kJ και $\text{kJ/s} = \text{Watt}$.

Όλες οι θερμοκρασίες ΔT είναι διαφορές θερμοκρασιών μεταξύ της θερμοκρασίας του ρεύματος και της θερμοκρασίας αναφοράς - $T_{\text{αν}}$ - για την οποία έχει προσδιοριστεί και η ειδική θερμοχωρητικότητα -τις περισσότερες φορές $0^{\circ}\text{C} - 273,16^{\circ}\text{K}$ -.

Η στάχτη, επειδή στις περισσότερες περιπτώσεις είναι από άποψη ενεργειακή αμελητέα, δεν εξετάζεται εδώ.

Συνήθως μετατρέπουμε σε ειδικά μεγέθη ως προς τη μάζα του καυσίμου οπότε έχουμε:

$$q = Q'/m'f$$

$$Mfg = m'fg/m'f$$

$$MA = \lambda * M\alpha = m'a/m'fg$$

Το μέγεθος Δh_u λέγεται θερμογόνος δύναμη - $\Theta\Delta$ -του καυσίμου. Αντιστοιχεί στην ενέργεια η οποία αποδεδμεύεται από την οξείδωση -καύση- μίας μονάδας μάζας καυσίμου. Η ενέργεια αυτή αντιστοιχεί στη θερμότητα που ανακτούμε αν τα καυσαέρια που προκύπτουν από την ολοκληρωτική καύση μίας μονάδας καυσίμου ψυχθούν μέχρι τη θερμοκρασία αναφοράς -συνήθως 0°C -.

Η $\Theta\Delta$ ενός καυσίμου είναι μέγεθος χαρακτηριστικό για το καύσιμο και συνήθως προκύπτει από μετρήσεις.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει τα καυσαέρια περιέχουν και υδρατμούς. Οι υδρατμοί με τη σειρά τους περιέχουν σημαντικό ποσό θερμότητας ατμοποίησης και προφανώς σε ατμοσφαιρική πίεση βρίσκονται σε άερια φάση στα καυσαέρια. Αν λοιπόν τα καυσαέρια ψυχθούν μέχρι τη θερμοκρασία αναφοράς των 0°C τότε οι υδρατμοί αυτοί θα συμπυκνωθούν και η θερμότητα που θα ανακτούσαμε από τα καυσαέρια θα ήταν μεγαλύτερη από την περίπτωση όπου δεν θα λαμβάναμε υπόψη μας τη θερμότητα συμπύκνωσης των υδρατμών αυτών. Για τον λόγο αυτό διακρίνουμε δύο είδη θερμογόνου δύναμεις: Την ανώτερη θερμογόνο δύναμη και την κατώτερη θερμογόνο δύναμη.

Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη- $A\Theta\Delta$ - HCV ή HHV

Αυτή περιέχει και την θερμότητα συμπύκνωσης των περιεχομένων υδρατμών των καυσαερίων της καύσης. Θα ήταν η πραγματική θερμότητα που θα ανακτούσαμε από τα καυσαέρια εάν τα ψύχαμε μέχρι τη θερμοκρασία αναφοράς των 0°C υπό κανονικές συνθήκες.

Κατώτερη Θερμογόνος δύναμη - $K\Theta\Delta$ - LCV ή LHV.

Είναι αυτή που δεν περιέχει τη θερμότητα συμπύκνωσης των περιεχομένων στα καυσαέρια υδρατμών. Στο παρελθόν χρησιμοποιούνταν σχεδόν αποκλειστικά διότι σχεδόν ποτέ δεν επιτρεπόταν η συμπύκνωση των υδρατμών των καυσαερίων -βλέπε παρ. για τη θερμοκρασία δρόσου των καυσαερίων.-

Σήμερα όμως που για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας αλλά και εξαιτίας της ευρείας χρήσης καθαρών καυσίμων όπως το φυσικό αέριο είναι δυνατή σε ορισμένες περιπτώσεις η ψύξη των καυσαερίων σε χαμηλές θερμοκρασίες για ανάκτηση όσο γίνεται μεγαλύτερου τμήματος της θερμότητάς τους, χρησιμοποιείται όλο και ποιο συχνά η ανώτερη θερμογόνος δύναμη. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να διευκρινίζεται ποιά θερμογόνος δύναμη χρησιμοποιείται άλλως μπορούμε να καταλήξουμε σε σοβαρά σφάλματα.

Τιμές των θερμογόνων δυνάμεων διαφόρων συνηθισμένων καυσίμων βρίσκονται σε πίνακες. Επίσης υπάρχουν ορισμένες σχέσεις οι οποίες υπολογίζουν τη θερμογόνο δύναμη ενός καυσίμου εφόσον είναι γνωστή η στοιχειομετρία του.

Μιά τέτοια σχέση που δίδει σε kcal /kg την κατώτερη Θερμογόνο δύναμη ενός καυσίμου είναι η

$$H_u = 8100 \cdot c + 29000 \cdot \left(h - \frac{o}{8}\right) + 2500 \cdot s - 600 \cdot w \quad [4.15a]$$

Μεταξύ της ΑΘΔ και της ΚΘΔ ισχύει η σχέση

$$\Delta h_o = \Delta h_u + r \cdot M_{H_2O} \quad [4.15]$$

Στον παρακάτω πίνακα δίδονται οι μέσες ΚΘΔ των κυριωτέρων καυσίμων. Για περισσότερα στοιχεία μπορεί ο ενδιαφερόμενος να ανατρέξει στη βιβλιογραφία, π.χ.[7].

Φυσικό αέριο	46800 kJ/kg
Υγραέριο	44200 kJ/kg
Πετρέλαιο ντήζελ	42700 kJ/kg
Μαζούτ	40800 kJ/kg
Κάρβουνο-κώκ-	29000 kJ/kg
Λιγνίτης	19000 kJ/kg
Ξύλο	15300 kJ/kg

Αδιαβατική θερμοκρασία καύσης.

Η αδιαβατική θερμοκρασία καύσης υποδηλώνει τη μέγιστη θερμοκρασία που θα μπορούσε να αναπτυχθεί κατά την καύση σε μία εστία η οποία είναι απολύτως μονωμένη από το περιβάλλον. Προφανώς τέτοια εστία δεν μπορεί να υπάρξει και έτσι η αδιαβατική θερμοκρασία καύσης δεν επιτυγχάνεται στην πραγματικότητα. Υπάρχουν και άλλοι λόγοι για τους οποίους η αδιαβατική θερμοκρασία της καύσης δεν επιτυγχάνεται -διάσπαση των μορίων του καυσίμου στις υψηλές θερμοκρασίες της φλόγας κ.λ.π.-. Στην ουσία η αδιαβατική θερμοκρασία της καύσης αποτελεί ένα θεωρητικό άνω όριο για τη θερμοκρασία της φλόγας με μεγάλη χρησιμότητα στην τεχνική της καύσης.

Ο υπολογισμός της αδιαβατικής θερμοκρασίας καύσης προκύπτει από τη σχέση του ισοζυγίου ενέργειας της εστίας καύσης ως θερμοκρασία των καυσαερίων εάν θεωρήσουμε ότι δεν υπάρχει απαγωγή θερμότητας προς το περιβάλλον δηλ όταν στη σχέση

$$Q' + m'_{fg} * C_{pfg} * (T_{fg} - T_{αν}) = m'_f * (C_{pf} * (T_f - T_{αν}) + \Delta h_u) + m'_a * C_{pa} * (T_a - T_{αν})$$

τεθεί $Q' = 0$. [4.16]

Εάν την εξίσωση αυτή τη λύσουμε ως προς τη θερμοκρασία των καυσαερίων τότε προκύπτει η αδιαβατική θερμοκρασία καύσης.

Πολλές φορές μπορούμε να κάνουμε ορισμένες απλοποιητικές παραδοχές: Ο αέρας καύσης και το καύσιμο προσάγονται στην εστία σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και επομένως οι ενθαλπίες τους μπορούν να αγνοηθούν. Στην περίπτωση αυτή η σχέση 4.16 γράφεται:

$$m'_{fg} * C_{pfg} * (T_{fg} - T_{αν}) = m'_f * \Delta h_u$$

Διαιρώντας και τα δύο μέλη της εξίσωσης με m'_f έχουμε

$$M_{fg} * C_{pfg} * (T_{fg} - T_{αν}) = \Delta h_u$$

Λύνοντας ως προς T_{fg} υπολογίζουμε την αδιαβατική θερμοκρασία καύσης

$$T_{fg} = \Delta h_u / (M_{fg} * C_{pfg}) + T_{αν} \quad [4.17]$$

Η σχέση αυτή και εφόσον ισχύουν οι απλοποιητικές παραδοχές που προαναφέρθηκαν δίνει την αδιαβατική θερμοκρασία καύσης.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι στον υπολογισμό της αδιαβατικής θερμοκρασίας καύσης χρησιμοποιείται η Α.Θ.Δ. εφόσον η ειδική θερμοχωρητικότητα των καυσαερίων έχει υπολογιστεί με ειδική θερμοχωρητικότητα των υδρατμών η οποία περιέχει την θερμότητα ατμοποίησης. Στην αντίθετη περίπτωση όταν δηλαδή χρησιμοποιείται $C_{p_{H_2O}}$ η οποία δεν περιέχει τη θερμότητα ατμοποίησης τότε θα πρέπει να χρησιμοποιείται η Κ.Θ.Δ.

Βαθμός απόδοσης της εστίας της καύσης

Βαθμός απόδοσης της εστίας της καύσης είναι ο λόγος της θερμότητας η οποία μεταδόθηκε από την εστία της καύσης προς το περιβάλλον της εστίας προς την θερμότητα η οποία προσήχθη στην εστία από το καύσιμο, και τον αέρα της καύσης.

Η μετάδοση θερμότητας από την εστία προς το περιβάλλον μπορεί να αφορά είτε ωφέλιμη θερμότητα η οποία χρησιμοποιήθηκε για κάποια διεργασία π.χ. ατμοποίηση, είτε να αφορά απώλειες προς το περιβάλλον.

Με βάση τον παραπάνω ορισμό εάν θα μπορούσε να υπάρχει μία εστία από την οποία τα καυσαέρια θα απομακρύνονταν έχοντας αποδώσει όλη τους τη θερμότητα τότε θα είχαμε βαθμό απόδοσης στην εστία ίσο με 1. Αυτό βέβαια δεν είναι δυνατόν διότι τότε θα απαιτούνταν άπειρη επιφάνεια για τη μετάδοση θερμότητας των καυσαερίων. Έτσι στην πράξη ο βαθμός απόδοσης μίας εστίας καύσης είναι πάντα μικρότερος από την μονάδα.

Ο βαθμός απόδοσης της εστίας της καύσης προκύπτει από τη σχέση

$$\eta_{\text{καύσης}} = Q' / (m'f*(C_{pf}*T_f + \Delta h_u) + m'a*C_{pa}*T_a) \quad [4.18]$$

Εκφράζει το τμήμα της θερμότητας των καυσαερίων που χρησιμοποιήθηκε ως ωφέλιμη θερμότητα. Το υπόλοιπο τμήμα της θερμότητας των καυσαερίων απορρίπτεται στο περιβάλλον με τα καυσαέρια και είναι απώλεια θερμότητας.

Η θερμότητα Q' που μεταφέρθηκε έξω από τον χώρο της εστίας μπορεί να είναι είτε ωφέλιμη π.χ. θερμότητα για την ατμοποίηση νερού είτε να αφορά απώλειες π.χ. απώλειες θερμότητας των τοιχωμάτων του λέβητα. Στην πράξη των ατμολεβήτων οι απώλειες από τα τοιχώματα του λέβητα είναι συνήθως μικρές σε σχέση με την θερμότητα που μεταφέρεται προς την ατμοποίηση και έτσι μετρώντας τη θερμοκρασία καυσαερίων και τη σύστασή τους μπορούμε να υπολογίσουμε το βαθμό απόδοσης της καύσης.

Παράδειγμα.

Να υπολογιστεί η αδιαβατική θερμοκρασία καύσης για καύσιμο φυσικό αέριο CH_4 για λόγο αέρα λ από 1 έως 1,5 με διαστήματα 0,1. Η κατώτερη θερμογόνος δύναμη του φυσικού αερίου είναι 13,5 kWh/kg. Να θεωρηθεί ότι η ενθαλπία του καυσίμου είναι περίπου μηδέν.

Κατόπιν να υπολογιστεί ο βαθμός απόδοσης μιάς εστίας από την οποία τα καυσαέρια της παραπάνω καύσης απορρίπτονται σε θερμοκρασία 400 °C προς το περιβάλλον. Να θεωρηθεί ότι η ειδική θερμοχωρητικότητα του καυσαερίου είναι σταθερή και ίση με 1,005 kJ/kg·K. Η παροχή αέρα και καυσίμου στην εστία γίνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος -0°C-. Να γίνει το σχετικό διάγραμμα.

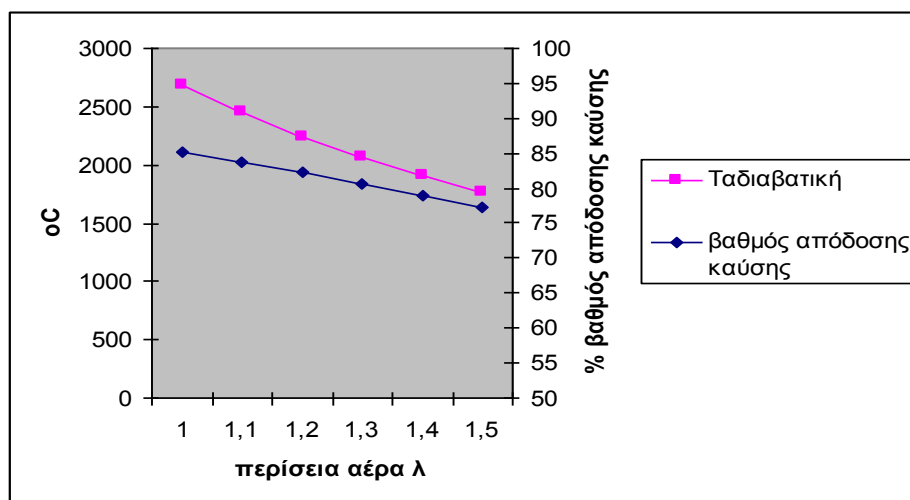
Για να μπορέσουμε να βρούμε την αδιαβατική θερμοκρασία της καύσης θα πρέπει πρώτα να βρούμε τις ειδικές παροχές αέρα και την ειδική παραγωγή καυσαερίων από την εστία της καύσης. Αυτό γίνεται με βάση τη στοιχειομετρία του καυσίμου την οποία έχουμε μάθει να υπολογίζουμε -βλέπε παράδειγμα στη σελίδα 31. Για το μεθάνιο ο υπολογισμός της στοιχειομετρίας δίδει περίπου $c = 0,75$, $h = 0,25$.

Για τη στοιχειομετρία αυτή και με βάση τις σχέσεις 4.4 έως 4.13 υπολογίζουμε την ειδική απαιτούμενη ποσότητα του αέρα καύσης και την ειδική παραγόμενη ποσότητα καυσαερίων για περίσσεια αέρα από 1 έως 1,5. Κατόπιν εφαρμόζοντας τη σχέση 4.16 υπολογίζουμε την αδιαβατική θερμοκρασία καύσης. Επίσης με εφαρμογή της σχέσης 4.18 υπολογίσουμε το βαθμό απόδοσης της εστίας καύσης για την περίπτωση που τα καυσαέρια απομακρύνονται από την εστία στους 400°C.

Οι παραπάνω υπολογισμοί γίνονται ευκολότερα σε κάποιο υπολογιστικό φύλλο όπως φαίνεται παρακάτω.

ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΥΣΗΣ								
περίσσεια αέρα λ			1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
Θερμογόνος δύναμη καυσίμου	kWh/kg		13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5
παροχή αέρα καύσης	kg/kg καυσίμου		17,12	18,84	20,55	22,26	23,9	25,69
ειδική θερμοχωρ. Αέρα	kJ/kgοK		1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005
ειδική θερμοχωρ. Καυσαερίων	kJ/kgοK		1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005
θερμοκρασία αέρα καύσης	οK		20	20	20	20	20	20
παροχή καυσαερίων	kg/kg καυσίμου		18,12	19,87	21,71	23,6	25,6	27,68
αδιαβατική θερμοκρασία καύσης	οC		2687,7	2452,7	2246,4	2067,9	1907,7	1765,6
ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΥΣΗΣ								
ενθαλπία καυσαερίων σε Ταδιαβατικό	kJ/kg καυσίμου		48944,1	48978,7	49013,1	49047,4	49080,4	49116,4
θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων	οC		400	400	400	400	400	400
ενθαλπία καυσαερίων σε θερμοκρασία εξό	kJ/kg καυσίμου		7284,24	7987,74	8727,42	9487,2	10291,2	11127,36
βαθμός απόδοσης καύσης	%		85,1	83,7	82,2	80,7	79,0	77,3
βαθμός απόδοσης καύσης			851,2	836,9	821,9	806,6	790,3	773,4

Συνοπτικά τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 4.2 επίπτωση της περίσσειας αέρα στην αδιαβατική θερμοκρασία της καύσης και στην απόδοση της εστίας με βάση τις παραδοχές του παραδείγματος.

Ειδική θερμοχωρητικότητα των καυσαερίων.

Είναι φανερό από τα προηγούμενα ότι η ειδική θερμοχωρητικότητα των καυσαερίων επηρεάζει σημαντικά την αδιαβατική θερμοκρασία καύσης όπως και τις άλλες παραμέτρους της καύσης π.χ. την απόδοση της εστίας. Η επίπτωση της ειδικής θερμοχωρητικότητας των καυσαερίων προκύπτει από τη σχέση 4.16 και 4.17. Το καυσαέριο είναι μίγμα διαφόρων αερίων. Έτσι η θερμοχωρητικότητα του καυσαερίου θα πρέπει να υπολογιστεί από τη θερμοχωρητικότητα των συστατικών του μίγματος λαμβάνοντας υπόψη τα μοριακά τους ποσοστά στο μίγμα. Ο υπολογισμός αυτός θα πρέπει να γίνεται μέσα από μία επαναληπτική διαδικασία η οποία προσεγγίζει σταδιακά την θερμοκρασία των καυσαερίων και επομένως τη θερμοχωρητικότητά τους. Ένας τέτοιος υπολογισμός είναι επίπονος και συνήθως γίνεται με τη βοήθεια ηλ. υπολογιστή σε ένα π.χ. υπολογιστικό φύλλο. Το αποτέλεσμα ενός τέτοιου υπολογιστικού φύλλου φαίνεται παρακάτω.

ADIABATIC COMBUSTION TEMPERATURE CALCULATION											
			cp fuel	cpair	cpCO2	cpH2O	cpN2	cpO2	cpNO2	cpSO2	
cp _i at T _e	KJ/kg oK			1,05614	1,06236	1,861569	1,05861	0,97385	0,97576	0,757027	1,147656
cp _i at T _{ad}	KJ/kg oK		0	1,29964	1,39445	2,8122	1,282235	1,19141	1,32072	0,961468	1,468013
m _i *cp _i at T _{ad}	KJ/kgf oK		0	24,4429	3,83196	6,283158	18,49659	0,52209	0	0	29,1338
cp _i at T _{eξ}				1,11171	1,13815	2,07853	1,109647	0,97124	1,05449	0,803686	1,219616
m _i *cp _i at T _{eξ}	KJ/kgf oK			20,9084	3,12765	4,643956	16,00697	0,42561	0	0	24,20419
Δh _u fuel	NAT. GAS										
	kJ/Kgf										
	48600										
Comb. air temp[oC]=			20	Environmental temp. , T _e , [oC]:				20			
Fuel temp. [oC]=			20								
Adiab. Comb.temp.[oC]				Mass flow of excess gases in [kg/h] =				0			
Estimated =			1685	Temperature of excess gases in[oC] =				10			
Adiab. Comb.temp.[oC]				Mean specific heat of gases in [kJ/kgok]				1,088			
Calculated =			1684,94509	mean density of the gases kg/m ³				1,2			

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Ο ατμολέβητας ή ατμοπαραγωγός

Γενικά

Ο ατμολέβητας είναι η συσκευή η οποία παράγει ατμό είτε για θερμικές χρήσεις είτε για την παραγωγή έργου μέσω θερμικών κύκλων. Οι ατμολέβητες μπορούν να διακριθούν σε πολλές κατηγορίες. Από αυτές θα επικεντρωθούμε στις πλέον ενδιαφέρουσες για την Ελληνική πραγματικότητα.

Μια βασική κατηγοριοποίηση προέρχεται από τον τρόπο χρήσης των καυσαερίων. Έτσι οι ατμολέβητες διακρίνονται σε:

- υδραυλωτούς: το νερό βρίσκεται μέσα στους αυλούς -τούμπα, σωλήνες-
- αεριαυλωτούς: το καυσαέριο βρίσκεται μέσα στους αυλούς -τούμπα, σωλήνες-

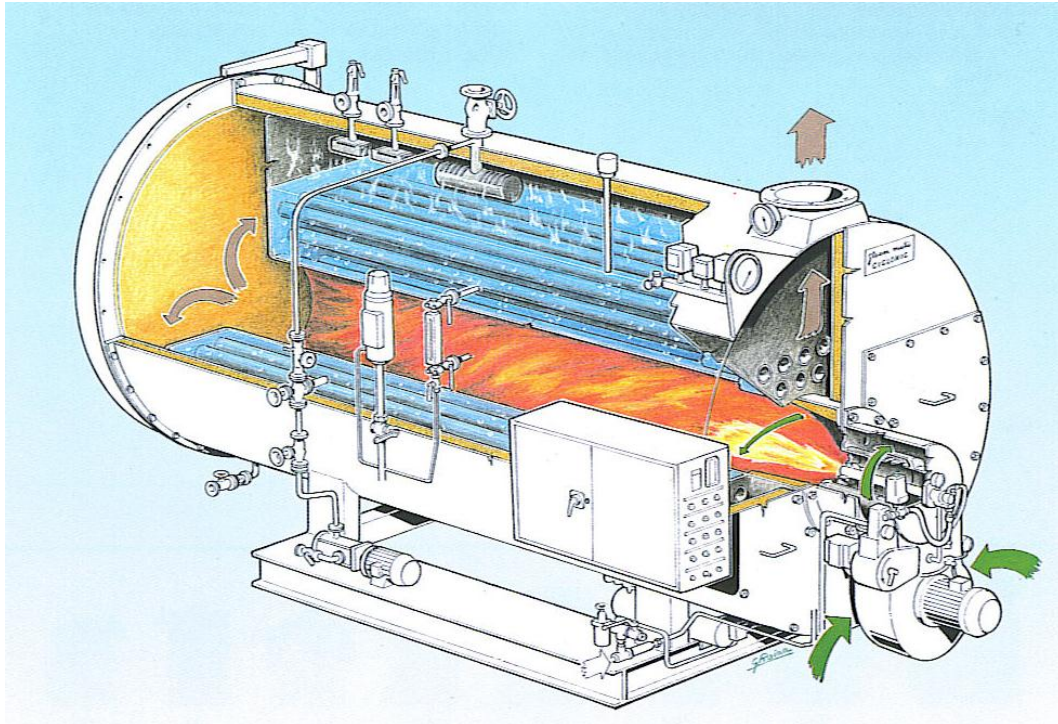
Συνήθως οι λέβητες παραγωγής ατμού για βιομηχανικές χρήσεις είναι αεριαυλωτοί ενώ αυτοί για παραγωγή ατμού που προορίζεται για στροβίλους και παραγωγή έργου είναι υδραυλωτοί.

Ο ατμολέβητας χαρακτηρίζεται συνήθως από την πίεση και την παροχή του ατμού τον οποίο παράγει. Έτσι έχουμε για παράδειγμα λέβητα 10 τόνων/ώρα ατμό σε πίεση 10 barg. Οι αεριαυλωτοί ατμολέβητες είναι συνήθως μικρότεροι από τους υδραυλωτούς και κατασκευάζονται σε δυναμικότητες συνήθως μέχρι 30tn/h κορεσμένου ατμού και πιέσεις συνήθως μέχρι 30 bar. Για θερμικές εφαρμογές στη βιομηχανία η πίεση είναι συνήθως μέχρι 16 bar. Οι αεριαυλωτοί ατμολέβητες συνήθως παράγουν κορεσμένο ατμό ενώ οι υδραυλωτοί προορίζονται κυρίως για παραγωγή υπέρθερμου ατμού. Στους υδραυλωτούς ατμολέβητες το νερό και ο ατμός κυκλοφορούν μέσα στους αυλούς –σωλήνες- ενώ το καυσαέριο έξω από τους αυλούς.

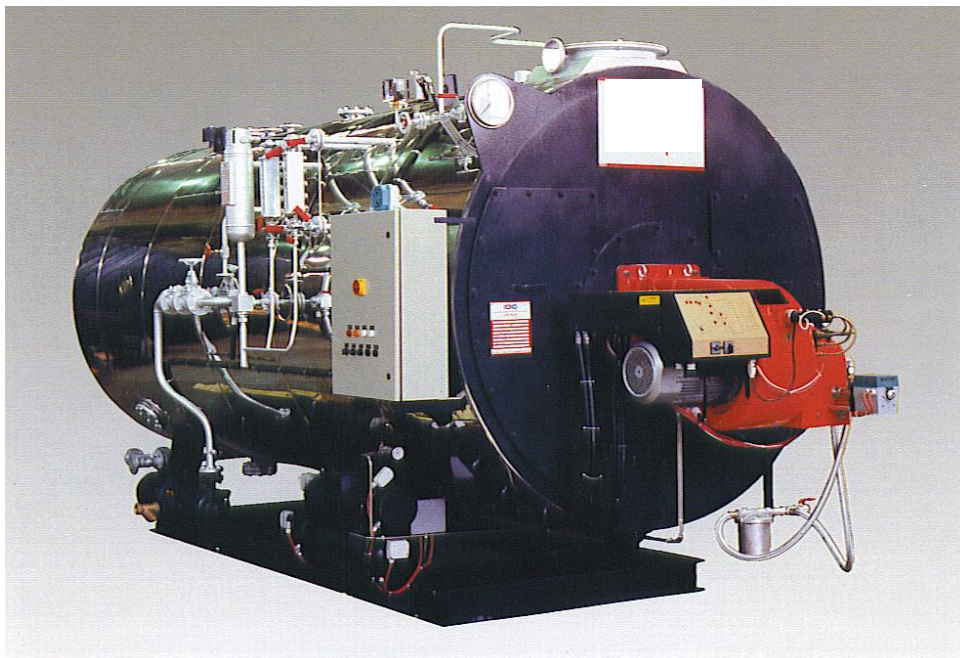
Οι υδραυλωτοί ατμολέβητες χρησιμοποιούνται κυρίως όταν ο ατμός θα χρησιμοποιηθεί για ηλεκτροπαραγωγή και επομένως θα πρέπει να έχει υψηλότερη πίεση και υπερθέρμανση –υπέρθερμος ατμός-.

Η δυναμικότητα των αεριαυλωτών ατμολεβήτων είναι μέχρι συνήθως 2000 tn/h –σε μεγάλους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς. Για τη βιομηχανία οι εφαρμογές μέχρι 200 tn/h είναι πιο συνήθειες. Η πίεση λειτουργίας των υδραυλωτών ατμολεβήτων είναι

συνήθως μέχρι 180 bar ενώ η θερμοκρασία του ατμού φθάνει συνήθως μέχρι τους 530 οC. Σπάνιες είναι οι υπερκρίσιμες κατασκευές που παράγουν ατμό με χαρακτηριστικά πάνω από την κρίσιμη κατάσταση - περίπου 225 bar-



Σχήμα 5.1 Σχηματική παράσταση βιομηχανικού αεριαυλωτού ατμολέβητα.



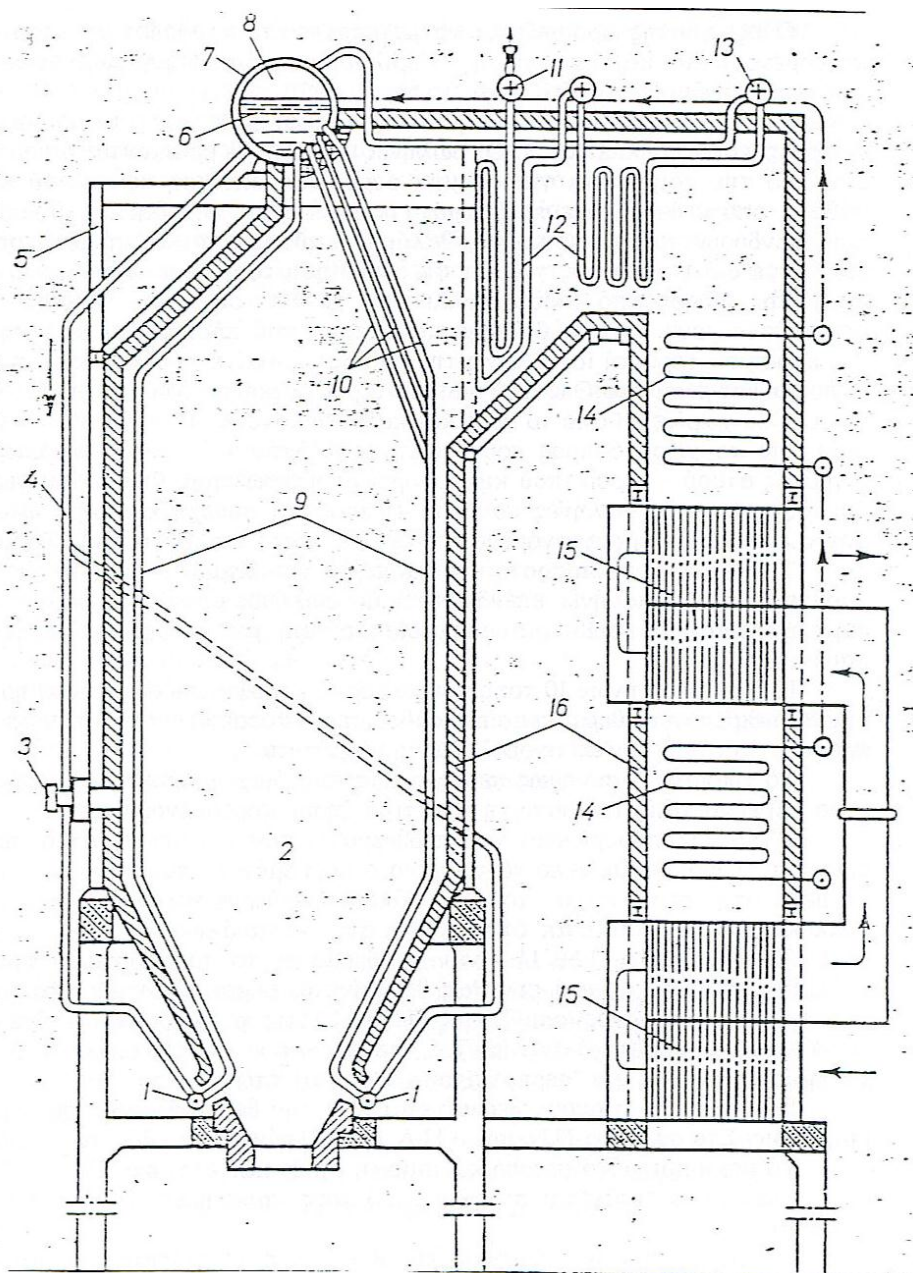
Σχήμα 5.2 βιομηχανικός αεριαυλωτός ατμολέβητας.



Σχήμα 5.3 βιομηχανικός αεριαυλωτός ατμολέβητας στη φάση της κατασκευής - μοντάρισμα θαλάμου καύσης με το εξωτερικό κυλινδρικό σώμα-



Σχήμα 5.4 βιομηχανικός υδραυλωτός ατμολέβητας στη φάση της κατασκευής - συγκόλληση των αυλών οι οποίοι διαμορφώνουν τους θαλάμους καύσεως -στη συγκεκριμένη περίπτωση 2-. Διακρίνονται το άνω και κάτω τύμπανο του ατμολέβητα.



Σχ. 3 - 1 Λειτουργικό διάγραμμα ατμοπαραγωγού

Σχήμα 5.5. Σχηματική αναπαράσταση υδραυλικού ατμολέβητα-οι διαστάσεις δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα-. 1.Κάτω τύμπανο, 2.Θάλαμος καύσης, 3. καυστήρας, 4. Σωλήνες τροφοδοσίας κορεσμένου νερού σε κάτω τύμπανο, 5.περίβλημα με μόνωση, 6. κορεσμένο νερό σε άνω τύμπανο, 7.άνω τύμπανο, 8. κορεσμένος ατμός σε άνω τύμπανο, 9&10. αυλοί ατμοποίησης, 11. Συλλέκτης λήψης υπέρθερμου ατμού, 12. υπερθερμαντήρας, 13. συλλέκτης προσαγωγής υπέρθερμου ατμού, 14. Προθερμαντήρας νερού, 15. προθερμαντήρας αέρα καύσης, 16. κέλυφος

Θερμοδυναμικοί υπολογισμοί στους ατμοπαραγωγούς.

Με την έννοια θερμοδυναμικοί υπολογισμοί εννοούμε τον υπολογισμό των βασικών παραμέτρων της καύσης και της απόδοσης του ατμοπαραγωγού καθώς και τον υπολογισμό των επιφανειών μετάδοσης θερμότητας που θα πρέπει αυτός να διαθέτει για να επιτύχει το σκοπό του δηλ. την παραγωγή της επιθυμητής ποσότητας ατμού στα επιθυμητά χαρακτηριστικά πίεσης και θερμοκρασίας. Οι θερμοδυναμικοί υπολογισμοί γίνονται πάντα σε συνδυασμό με τους υπολογισμούς αντοχής που έχουν ως στόχο τον προσδιορισμό των στοιχείων αντοχής του λέβητα π.χ. υλικό και πάχος ελασμάτων, τύπος συγκολλήσεων κ.λ.π

Όπως έχουμε δει οι ατμολέβητες αποτελούνται από δύο κύρια στοιχεία στα οποία λαμβάνει χώρα η μετάδοση θερμότητας: Τον θάλαμο καύσεως και τους αυλούς.

Για κάθε τμήμα του ατμολέβητα οι υπολογισμοί γίνονται ξεχωριστά και οι τιμές που υπολογίζονται για το τμήμα του θαλάμου καύσης είναι τιμές εισόδου στο τμήμα των αεριαυλών.

Για τον θάλαμο καύσης τα δεδομένα και τα αποτελέσματα των υπολογισμών αφορούν τις παρακάτω παραμέτρους.

ΔΕΔΟΜΕΝΑ:

- 1.Καύσιμο
- 2.Περίσσεια αέρα λ
- 3.Ποσότητα καυσίμου
- 4.Χαρακτηριστικά τοιχωμάτων –πάχος, υλικό, συντελεστής αγωγιμότητας-
- 5.Χαρακτηριστικά ατμού –πίεση/θερμοκρασία-

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ:

- 1.Ποσότητα και σύσταση καυσαερίων
- 2.Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων από τον θάλαμο καύσεως
- 3.Επιφάνεια του θαλάμου καύσεως
- 4.Παραγωγή ατμού [kg/h]

Για το τμήμα των αυλών τα δεδομένα και τα αποτελέσματα των υπολογισμών αφορούν τις παρακάτω παραμέτρους.

ΔΕΔΟΜΕΝΑ:

- 1.Παροχή και σύσταση καυσαερίων
- 2.Θερμοκρασία εισόδου καυσαερίων
- 3.Διατομή αριθμός και χαρακτηριστικά αυλών -πάχος, υλικό, συντελεστής αγωγιμότητας-
- 4.Χαρακτηριστικά ατμού –πίεση/θερμοκρασία-

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ:

- 1.Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων από τους αεριαυλούς και επομένως από τον ατμολέβητα.
- 2.Επιφάνεια των αεριαυλών
- 3.Παραγωγή ατμού [kg/h]

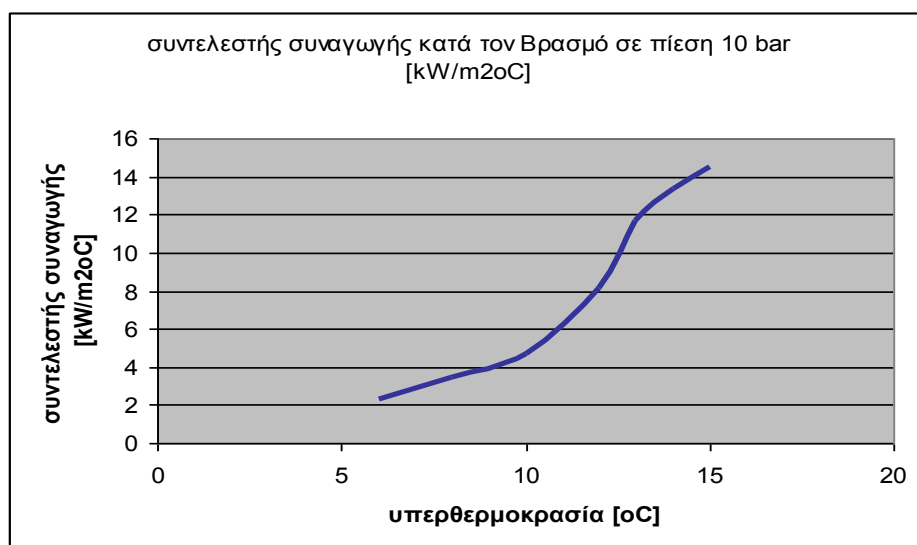
Για τους υδραυλωτούς ατμολέβητες χρησιμοποιούνται αντίστοιχα δεδομένα υπολογισμών.

Σε κάθε τμήμα ενός ατμολέβητα θα πρέπει να γίνει ο υπολογισμός των συντελεστών μετάδοσης θερμότητας. Με τη βοήθεια των συντελεστών μετάδοσης θερμότητας γίνεται ο προσδιορισμός της απαιτούμενης επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας. Όπως γνωρίζουμε για να υπολογιστεί ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας απαιτούνται οι επιμέρους συντελεστές συναγωγής, αγωγής, ακτινοβολίας κ.λ.π. για τους συντελεστές αυτούς στην πράξη της κατασκευής των ατμοπαραγωγών υπάρχουν διάφορες μεθοδολογίες στη βιβλιογραφία. Στα παρακάτω θα δοθούν οι τρόποι υπολογισμού που περιέχονται στο εγχειρίδιο του NUBER [18].

Βρασμός

Η διεργασία του βρασμού είναι βασική στα πλαίσια του σχεδιασμού των λεβήτων. Κατά τη διάρκεια του βρασμού επί του θερμαινόμενου τοιχώματος δημιουργούνται οι πρώτες φυσαλλίδες ατμού. Αυτές δημιουργούν τοπικά σημαντική αναταραχή του περιβάλλοντος ρευστού καθώς αυξάνουν το μέγεθός τους και αποκολλώνται μέσα στην μάζα του ρευστού επιτρέποντας άλλο υγρό να καλύψει τον χώρο που αφήνουν. Έτσι δημιουργείται σημαντική αναταραχή στην περιοχή του θερμαινόμενου τοιχώματος με αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση του συντελεστή συναγωγής και επομένως του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας. Έχουν γίνει πλήθος πειραματικών και θεωρητικών μελετών για την ποιοτική περιγραφή του φαινομένου της μετάδοσης θερμότητας κατά τον βρασμό. Ο ενδιαφερόμενος μπορεί να ανατρέξει στην βιβλιογραφία, [4,11,12,20]. Εδώ δίνουμε ορισμένα βασικά ποσοτικά μεγέθη προσδιορισμού του συνολικού συντελεστή μετάδοσης θερμότητας κατά το βρασμό μέσα σε λέβητες ατμού. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα. Το διάγραμμα δίνει το συντελεστή συναγωγής σε kW/m²oC ανάλογα με την υπερθερμοκρασία του τοιχώματος του λέβητα. Για παράδειγμα σε λέβητα ο οποίος παράγει κορεσμένο ατμό 10 bar η θερμοκρασία κορεσμού είναι περίπου 190 oC. Εάν το τοίχωμα προς την μεριά του κορεσμένου νερού έχει θερμοκρασία 200°C τότε η υπερθερμοκρασία του τοιχώματος είναι 10°C.

Από τα δεδομένα του διαγράμματος και τα διάφορα δεδομένα μετάδοσης θερμότητας της βιβλιογραφίας π.χ. [12], βλέπουμε ότι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας κατά τον βρασμό είναι αρκετά μεγαλύτερος από αυτόν κατά τη μετάδοση θερμότητας χωρίς αλλαγή φάσης π.χ. σε εναλλάκτη νερού –νερού ο οποίος δεν ξεπερνάει τα 100-1000 W/m²oC.



Σχήμα 5.6 Συντελεστής συναγωγής κατά τον βρασμό σε ατμοπαραγωγούς.

Υπέρθερμος ατμός εντός σωλήνος.

Ο συντελεστής συναγωγής για ατμό ο οποίος ρέει εντός σωλήνος μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση.

$$\alpha_b = 1,163 * [w_0^{0,79} / (d^{0,16} * l^{0,05})] * [4,28 + 2,66 * (T/1000)] \quad [W/m^2 \cdot K] \quad [5.1]$$

Όπου

d = διάμετρος σωλήνα σε [m]

l = μήκος σωλήνα σε [m]

T = μέση θερμοκρασία ατμού σε °C

$w_0 = w * 264 * \rho / (273 + T)$

Όπου w = ταχύτητα ατμού σε m/s

ρ = απόλυτη πίεση ατμού σε bar

Νερό εντός σωλήνος.

Ο συντελεστής συναγωγής για νερό το οποίο ρέει εντός σωλήνος μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση.

$$\alpha_b = 1,163 * 2000 * w^{0,85} * (l + 0,014 * T) \quad [W/m^2 \cdot K] \quad [5.2]$$

Όπου

l = μήκος σωλήνα σε [m]

T = μέση θερμοκρασία νερού σε °C

w = ταχύτητα νερού σε m/s

Καυσαέρια εντός σωλήνων.

Ο συντελεστής συναγωγής για καυσαέρια τα οποία ρέουν εντός σωλήνος μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση.

$$\alpha_b = 1,163 * 23,7 * w^{0,79} * d^{-0,16} * l^{-0,05} * b \quad [W/m^2 \cdot K] \quad [5.3]$$

Όπου:

d = διάμετρος σωλήνα σε [m]

l = μήκος σωλήνα σε [m]

w = ταχύτητα καυσαερίων σε m/s

$b = (\lambda / 1,163)^{0,21} * [(c_p / 4,18) * \rho]^{0,79}$

Όπου λ = θερμική αγωγιμότητα σε W/m²·K

c_p = ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθ. Πίεση σε kJ/kg^oK,

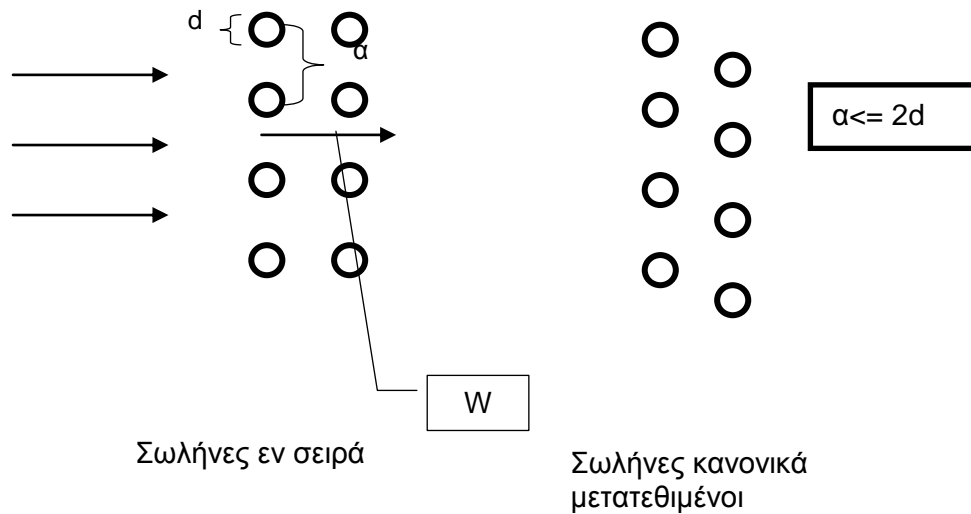
ρ = πυκνότητα σε kg/m³

Οι ιδιότητες προσδιορίζονται στη μέση θερμοκρασία τοιχώματος -μέσου

Καυσαέρια εκτός σωλήνων

Στις περιπτώσεις κυρίως των υδραυλικών ατμοπαραγωγών συναντούμε τις περιπτώσεις ροής καυσαερίων εκτός των σωλήνων μέσα στους οποίους ρέει ο προς θέρμανση ατμός ή νερό και μάλιστα η ροή των καυσαερίων γίνεται κάθετα προς τους σωλήνες. Τέτοιες διατάξεις συναντούμε π.χ. στους υπερθερμαντήρες και στους προθερμαντήρες του νερού ή και του αέρα καύσης. Υπάρχουν δύο κύριες διατάξεις των σωλήνων: η κανονικώς μετατιθεμένη και η εν σειρά διάταξη όπως φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.

σε εγκάρσια ροή- 1-



$$\alpha_b = 1,163 * (w_o^{0,56} / d^{0,44}) * [3,6 + 2,7 * (T/1000)] \quad [W/m^2 \text{ } ^\circ K] \quad [5.4]$$

Για μία σειρά σωλήνων όπου

d = εξ. διάμετρος σωλήνα σε [m]

$w_o = w * 273 / (273 + T)$ όπου

w = ταχύτητα καυσαερίων σε m/s

T η μέση θερμοκρασία εισόδου/ εξόδου των καυσαερίων σε $^\circ C$

Για περισσότερες από 1 σειρά σωλήνων ο συντελεστής συναγωγής υπολογίζεται από τη σχέση

$$\alpha_b = 1,163 * \xi * (w_o^{0,654} / d^{0,346}) * [\mu + \nu * (T/1000)] \quad [W/m^2 \text{ } ^\circ K] \quad [5.5]$$

Όπου οι συντελεστές μ και ν δίδονται από τον παρακάτω πίνακα. Ο συντελεστής ξ είναι 1 για διάταξη σωλήνων εν σειρά και παίρνει τις τιμές του πίνακα για κανονικά μετατεθειμένους σωλήνες.

	μ	ν	ξ
2 σειρές	4,01	2,34	1,14
3 σειρές	4,14	2,42	1,28
4 σειρές	4,24	2,48	1,34
5 σειρές	4,3	2,51	1,4

Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας.

Από τους συντελεστές συναγωγής υπολογίζουμε το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για κάθε στοιχείο και τμήμα του λέβητα. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας υπολογίζεται από τη σχέση

$$k = \frac{1}{1/\alpha_{in} + d/\lambda + 1/\alpha_{out}}$$

Συνήθεις τιμές του λ είναι

για χαλυβδόφυλλα 40-60 W/m⁰K

για επικαθήσεις αλάτων 0,1 –0,2 W/m⁰K

για κάπνα και τέφρα 0,06 –0,1 W/m⁰K

ΕΦΑΡΜΟΓΗ 1 : υπολογισμός θαλάμου καύσης

Σε ατμολέβητα κορεσμένου ατμού 10 bar χρησιμοποιείται καύσιμο Φυσικό αέριο με λόγο αέρα 1,15. Η παροχή του φυσικού αερίου είναι 200 kg/h.

Να βρεθεί η θερμοκρασία στην οποία απομακρύνεται το καυσαέριο με επιφάνεια θαλάμου καύσης 7m². Θεωρήστε ότι η υπερθερμοκρασία του τοιχώματος από την μεριά της φλόγας είναι 250 °C. Θεωρήστε ότι το C_p των καυσαερίων είναι 1,2 kJ/kg⁰K και είναι σταθερό.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ 2 : υπολογισμός υπερθερμαντήρα ατμού

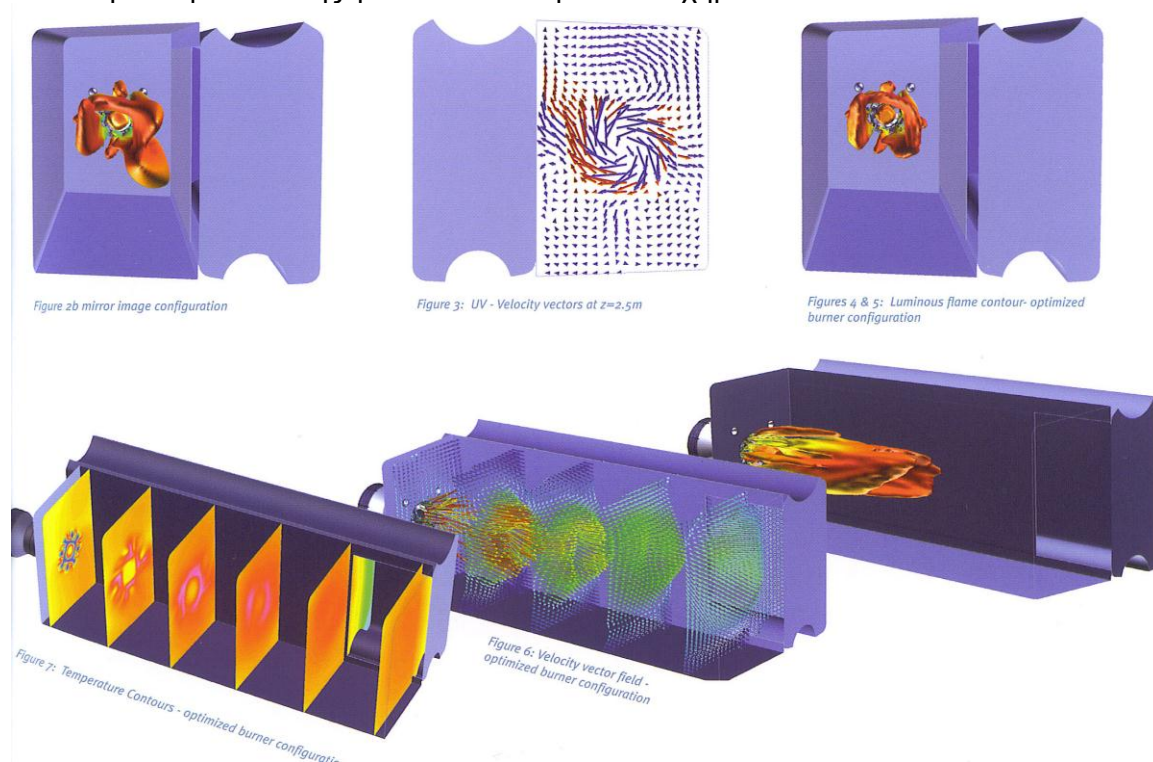
Σε ατμολέβητα κορεσμένου ατμού 10 bar χρησιμοποιείται υπερθερμαντήρας για να θερμάνει τον ατμό σε υπερθερμοκρασία 50 °C. Ο υπερθερμαντήρας έχει διάταξη κανονικώς μετατεθιμένη και αποτελείται από σωλήνες διαμέτρου 30 mm. Οι αποστάσεις των σωλήνων είναι 2 διάμετροι. Η ταχύτητα του ατμού μέσα στον υπερθερμαντήρα είναι 50 m/s ενώ των καυσαερίων έξω από τους σωλήνες είναι 15 m/s. Το μήκος των σωλήνων είναι 2 μέτρα. Να βρεθούν ο εσωτερικός και ο εξωτερικός συντελεστής συναγωγής.

Υπολογιστικές μέθοδοι ανάλυσης.

Όπως είναι φανερό από τα παραπάνω ο θερμοδυναμικός υπολογισμός ενός ατμοπαραγωγού θα πρέπει να γίνει κατά τμήματα έτσι ώστε να μπορούμε να εφαρμόσουμε με ικανοποιητική προσέγγιση κάποιες από τις προηγούμενες σχέσεις προσδιορισμού των συντελεστών συναγωγής. Από τους συντελεστές συναγωγής προσδιορίζουμε τον τοπικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και κατόπιν την απαιτούμενη για τη μετάδοση θερμότητας επιφάνεια. Γίνεται εμφανές ότι εάν θα μπορούσαμε να ολοκληρώσουμε τους παραπάνω υπολογισμούς για όλο και ποιά μικρά τμήματα του λέβητα θα προσεγγίζαμε με μεγαλύτερη ακρίβεια τον

θερμοδυναμικό υπολογισμό του ατμολέβητα. Αυτό επιτυγχάνεται με τις υπολογιστικές μεθόδους ανάλυσης. Αυτές επιλύουν τις εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας, ορμής και μάζας σε μικρά τμήματα του λέβητα έχοντας βέβαια ορίσει τις κατάλληλες οριακές συνθήκες. Με τον ορισμό των οριακών συνθηκών προκύπτουν συστήματα εξισώσεων τα οποία επιλύονται με κάποια από τις μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης. Το τελικό αποτέλεσμα είναι τα πλήρη θερμοκρασιακά πεδία μέσα στο χώρο επίλυσης δηλ. μέσα στο λέβητα. Οι μεθοδολογίες αυτές έχουν αναπτυχθεί έντονα τα τελευταία 30 χρόνια και ονομάζονται μέθοδοι υπολογιστικής ρευστομηχανικής -Computational Fluid Dynamics, CFD-. Ο ενδιαφερόμενος μπορεί να ενημερωθεί από τη σχετική βιβλιογραφία, [15,16,17]. Ιδιαίτερα η αναφορά 15 συνιστάται ως μια καλή εισαγωγή στο αντικείμενο. Ο ενδιαφερόμενος μπορεί να κατεβάσει από το διαδίκτυο σχετικά προγράμματα CFD και να τα χρησιμοποιήσει, [19].

Οι μέθοδοι CFD αξιοποιούνται σήμερα για να επιλύσουν προβλήματα τριών διαστάσεων. Στην πρακτική των λέβητων οι υπολογιστικές μέθοδοι σε 3 διαστάσεις δεν έχουν αξιοποιηθεί στο βαθμό που αυτό έγινε σε άλλες περιοχές π.χ. στην αυτοκινητοβιομηχανία και αυτό διότι ήδη σε μεγάλο βαθμό η απαιτούμενη ακρίβεια επίλυσης των προβλημάτων είχε επιτευχθεί μέσω των υφισταμένων σχέσεων οι οποίες βασίζονται στους αδιάστατους αριθμούς. Σε πολλές όμως εξειδικευμένες περιπτώσεις η χρήση υπολογιστικών μεθόδων βρήκε και στον τομέα των ατμοπαραγωγών σημαντικές εφαρμογές. Ένα παράδειγμα από υπολογιστική επίλυση θαλάμου καύσης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7 Υπολογιστική επίλυση θαλάμου καύσης και καυστήρα. Από [19].

Προσδιορισμός και υπολογισμός των κατασκευαστικών στοιχείων του ατμολέβητα.

Εκτός από τον θερμοδυναμικό υπολογισμό ενός ατμοπαραγωγού σημαντικό ρόλο - και ίσως τον σημαντικότερο- παίζει ο υπολογισμός αντοχής του ατμοπαραγωγού. Αυτό διότι ο θερμοδυναμικός υπολογισμός σχετίζεται κυρίως με την απόδοση του

λέβητα ενώ ο υπολογισμός αντοχής έχει άμεση σχέση με την ασφάλεια λειτουργίας του η οποία έχει άμεση σχέση με την ασφάλεια του προσωπικού.

Για τον παραπάνω λόγο το σημαντικό θέμα των υπολογισμών αντοχής των ατμολεβήτων έχει αντιμετωπιστεί με τη χρήση Ευρωπαϊκών κανονισμών προσδιορισμού των υλικών και του τρόπου κατασκευής των ατμολεβήτων.

Οι τρέχοντες κανονισμοί για την κατασκευή των ατμολεβήτων βρίσκονται μέσα στην σειρά EN 12953 των Ευρωπαϊκών προτύπων -European Standard, Norme Européenne, Europäische Norm-

Η σειρά αυτή αποτελείται από 14 μέρη καθένα από τα οποία ασχολείται με ένα συγκεκριμένο τμήμα του ατμοπαραγωγού. Το πρώτο τμήμα της σειράς το EN 12953 - Part 1 είναι το γενικό, το δεύτερο τμήμα ασχολείται με τα υλικά με τα οποία θα πρέπει να κατασκευάζονται οι ατμοπαραγωγοί κ.ο.κ σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα. Το τελευταίο τμήμα ασχολείται με τις διαδικασίες ελέγχου των ατμολεβήτων από τους ανεξάρτητους ελεγκτές.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα διάφορα τμήματα του προτύπου και το αντικείμενό τους.

- Part 1: General.
- Part 2: Materials for pressure parts of boilers and accessories.
- Part 3: Design and calculation for pressure parts.
- Part 4: Workmanship and construction of pressure parts of the boiler.
- Part 5: Inspection during construction, documentation and marking of pressure parts of the boiler.
- Part 6: Requirements for equipment for the boiler.
- Part 7: Requirements for firing systems for liquid and gaseous fuels for the boiler.
- Part 8: Requirements for safeguards against excessive pressure.
- Part 9: Requirements for limiting devices, and of the boiler and accessories.
- Part 10: Requirements for boiler feedwater and boiler water quality.
- Part 11: Acceptance tests.
- Part 12: Requirements for firing systems for solid fuels for the boiler.
- Part 13: Operational Instructions.

CR 12953-14: Guidelines for the involvement of an inspection body independent of the manufacturer.

Πίνακας 5.1 Περιεχόμενα του προτύπου EN 12953 για τους αεριολεβητούς ατμολεβήτες.

Για τον σχεδιασμό και την κατασκευή των ατμολεβήτων θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλα τα τμήματα του προτύπου.

Το πρότυπο και ιδιαίτερα το τμήμα 4 αναφέρει με κατάλληλα σχήματα όλες τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για την κατασκευή των τμημάτων του λέβητα. Σε κάθε περίπτωση ο ενδιαφερόμενος θα πρέπει να το συμβουλευτείται.

Πέρα από τους κανονισμούς κάθε κατασκευή ατμολεβήτα θα πρέπει να γίνεται από έμπειρους και πιστοποιημένους μηχανικούς και τεχνίτες άλλως εγκυμονεί σοβαρούς κινδύνους.

Ποιότητα υλικών, συγκολλήσεις.

Για τους λόγους που προαναφέρθηκαν η κατασκευή η εγκατάσταση και η θέση σε λειτουργία ενός ατμοπαραγωγού γίνεται μέσα από ελεγμένες και πιστοποιημένες διαδικασίες ποιότητας ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια της λειτουργίας του. Κάθε εργοστάσιο κατασκευής εφαρμόζει σύστημα ποιότητας το οποίο βασίζεται σε ελέγχους οι οποίοι γίνονται με βάση απαιτήσεις που προκύπτουν είτε από εθνικά είτε από διεθνή πρότυπα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί το πρότυπο που βρίσκεται σήμερα σε ισχύ στις περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας είναι το EN 12953. Οι διαδικασίες ελέγχου ποιότητας του ατμοπαραγωγού αναλύονται:

- στο τμήμα 2 του προτύπου όσον αφορά τα υλικά που θα πρέπει να χρησιμοποιούνται στις κατασκευές και στις συγκολλήσεις των ατμολεβήτων.
- στο τμήμα 5 για τους ελέγχους που θα πρέπει να γίνονται κατά τη διάρκεια της κατασκευής καθώς και τις διαδικασίες καταγραφής και σήμανσης που θα πρέπει να ακολουθούνται.
- στο τμήμα 11 για τους ελέγχους που θα πρέπει να γίνονται για την παραλαβή των ατμολεβήτων.

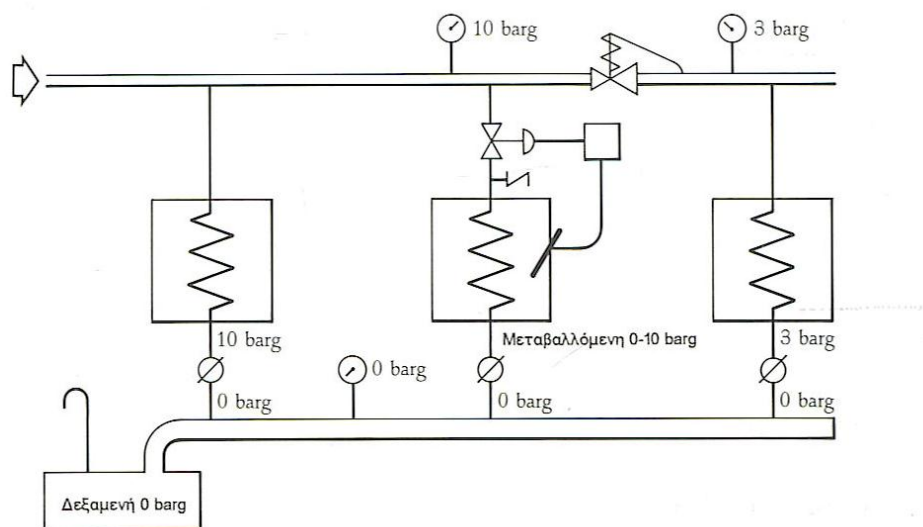
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΟΥ ΑΤΜΟΥ

Γενικά

Μέχρι τώρα έχουμε δει πως γίνονται οι θερμοδυναμικοί υπολογισμοί και ο προσδιορισμός των στοιχείων κατασκευής του ατμοπαραγωγού. Στις επόμενες παραγράφους θα επικεντρωθούμε στον υπολογισμό των στοιχείων που αποτελούν το δίκτυο του ατμού. Το δίκτυο του ατμού μπορεί να είναι είτε ένα εκτεταμένο δίκτυο σωληνώσεων το οποίο μεταφέρει τον ατμό από τον ατμοπαραγωγό στις θέσεις κατανάλωσης είτε ένα δίκτυο που στόχο έχει να συνδέσει τον ατμοπαραγωγό με άλλα μηχανήματα και συσκευές π.χ. με τον ατμοστρόβιλο, σε μια εγκατάσταση παραγωγής έργου.

Ένα δίκτυο στη γενική του μορφή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 6.1 Η γενική μορφή ενός δικτύου ατμού.

Ο ατμός προέρχεται από τον ατμολέβητα στο λεβητοστάσιο του εργοστασίου και είναι συνήθως κορεσμένος. Από μια κεντρική σωλήνα και διακλαδώσεις διοχετεύεται στις καταναλώσεις οι οποίες μπορεί να απαιτούν ατμό σε διαφορετικές πιέσεις. Για τον λόγο αυτό εκεί όπου είναι απαραίτητο τοποθετούνται ειδικές συσκευές μείωσης ή/και ρύθμισης πίεσης. Μετά τη χρήση του ατμού στις διάφορες συσκευές αυτός εξέρχεται από τις συσκευές συνήθως ως μίγμα κορεσμένου ατμού και νερού μια και συνήθως η συσκευή δεν καταναλώνει ακριβώς το ποσό θερμότητας που λαμβάνει από το δίκτυο.

Κατά την έξοδο του μίγματος ατμού νερού από τη συσκευή όπου χρησιμοποιήθηκε ο ατμός, μας ενδιαφέρει για λόγους εξοικονόμησης ατμού δηλ. ενέργειας και νερού να

επιτρέψουμε την επιστροφή στο δοχείο συμπυκνωμάτων μόνον συμπυκνώματος και όχι ατμού. Έτσι λοιπόν χρησιμοποιούμε ειδικές συσκευές, τις ατμοπαγίδες, οι οποίες επιτρέπουν τη ροή μόνον του συμπυκνώματος παγιδεύοντας τον ατμό.

Από τη συσκευή το συμπύκνωμα εξέρχεται και οδηγείται μέσω του δικτύου επιστροφής συμπυκνωμάτων στο δοχείο συλλογής συμπυκνωμάτων από όπου με τη βοήθεια της αντλίας τροφοδοσίας επανατροφοδοτείται στον ατμολέβητα για να ατμοποιηθεί και να ακολουθήσει την ίδια πορεία.

Τον προσδιορισμό όλων των βασικών στοιχείων του δικτύου θα δούμε στις παρακάτω παραγράφους.

Σωληνώσεις ατμού.

Για την κατασκευή των δικτύων του ατμού χρησιμοποιούνται χαλύβδινοι σωλήνες τυποποιημένοι ως προς την εξωτερική τους διάμετρο και το πάχος τους –βλέπε πίνακα στο παράρτημα.

Η μέση ταχύτητα του ατμού μέσα στις σωληνώσεις λαμβάνεται από 25-35 m/s. Μερικές φορές επιλέγονται χαμηλότερες ταχύτητες κάτω από 15m/s. Για γρήγορο υπολογισμό της παροχής του ατμού ανάλογα με την ταχύτητά του χρησιμοποιείται η σχέση:

$$M' = 0,002827 * d^2 * u/v \quad [6.1]$$

Όπου

M' η παροχή μάζας σε kg/h,
d η διάμετρος του σωλήνα σε mm,
u η ταχύτητα του ατμού σε m/s,
v ο ειδικός όγκος του ατμού σε m³/kg

Απώλειες πίεσης σε σωληνώσεις

Ένα ακόμα σημαντικό στοιχείο στον υπολογισμό ενός δικτύου ατμού είναι οι απώλειες πίεσης. Η συνολική πτώση πίεσης σε ένα σύνθετο δίκτυο κορεσμένου ατμού σε βιομηχανική εφαρμογή είναι στην τάξη των 0,5 bar. Για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης στο δίκτυο του ατμού υπολογίζουμε τις απώλειες πίεσης στα ευθύγραμμα τμήματα, τις απώλειες πίεσης στα εξαρτήματα των σωληνώσεων και κατόπιν τα αθροίζουμε στον δυσμενέστερο κλάδο.

Ευθύγραμμα τμήματα σωληνώσεων:

Κατά προσέγγιση η πτώση πίεσης στα ευθύγραμμα τμήματα των σωληνώσεων προκύπτει από τη σχέση:

$$\Delta p = \lambda * l/d * 0,5 * \rho * v^2 \quad [6.2]$$

Όπου $\lambda = 0,0206$ κατά προσέγγιση, l σε μέτρα, d σε μέτρα, ρ σε kg/m³ και Δp σε Pa.

Εξαρτήματα σωληνώσεων:

Στα εξαρτήματα των σωληνώσεων η πτώση πίεσης δίδεται από τη σχέση

$$\Delta p = \zeta * 0,5 * \rho * v^2$$

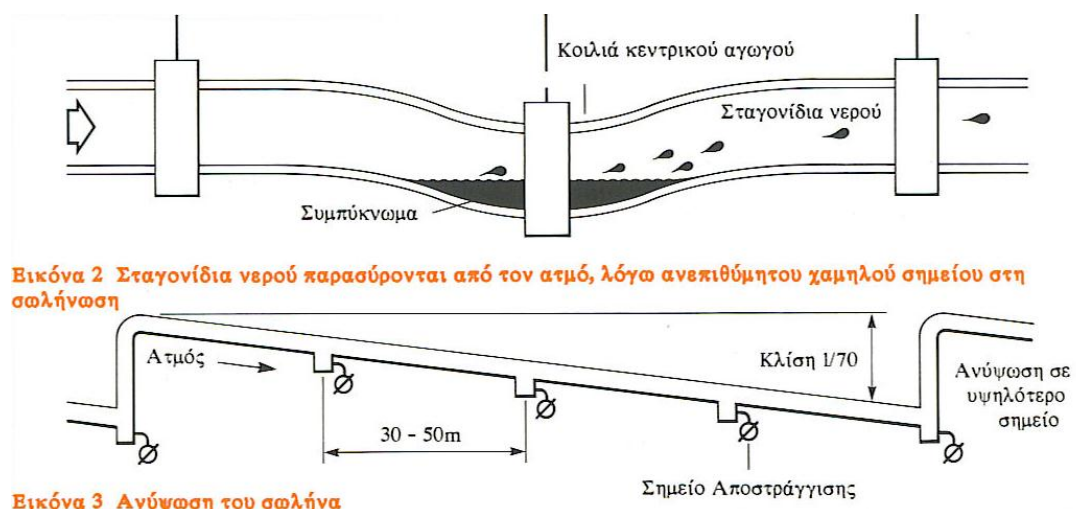
[6.3]

Όπου το ζ δίδεται για κάθε εξάρτημα.

Κλίσεις σωληνώσεων – συλλογή συμπυκνωμάτων

Η κλίσεις των σωληνώσεων στα δίκτυα του ατμού είναι σημαντική παράμετρος σχεδιασμού. Η λογική του προσδιορισμού των κλίσεων είναι να μην υπάρχει μη ελεγχόμενη συσσώρευση συμπυκνώματος σε σημεία όπου έχουμε υψηλή ταχύτητα ατμού.

Στο παρακάτω σχήμα 6.2 -εικόνα 2- φαίνεται μια λανθασμένη δημιουργία "κοιλιάς" σε δίκτυο ατμού ενώ στο σχήμα 6.2-εικόνα 3- φαίνεται ο τρόπος διαμόρφωσης της κλίσης ενός μεγάλου δικτύου ατμού στο οποίο πρέπει να μη μεταβάλουμε πολύ το ύψος της σωλήνωσης.

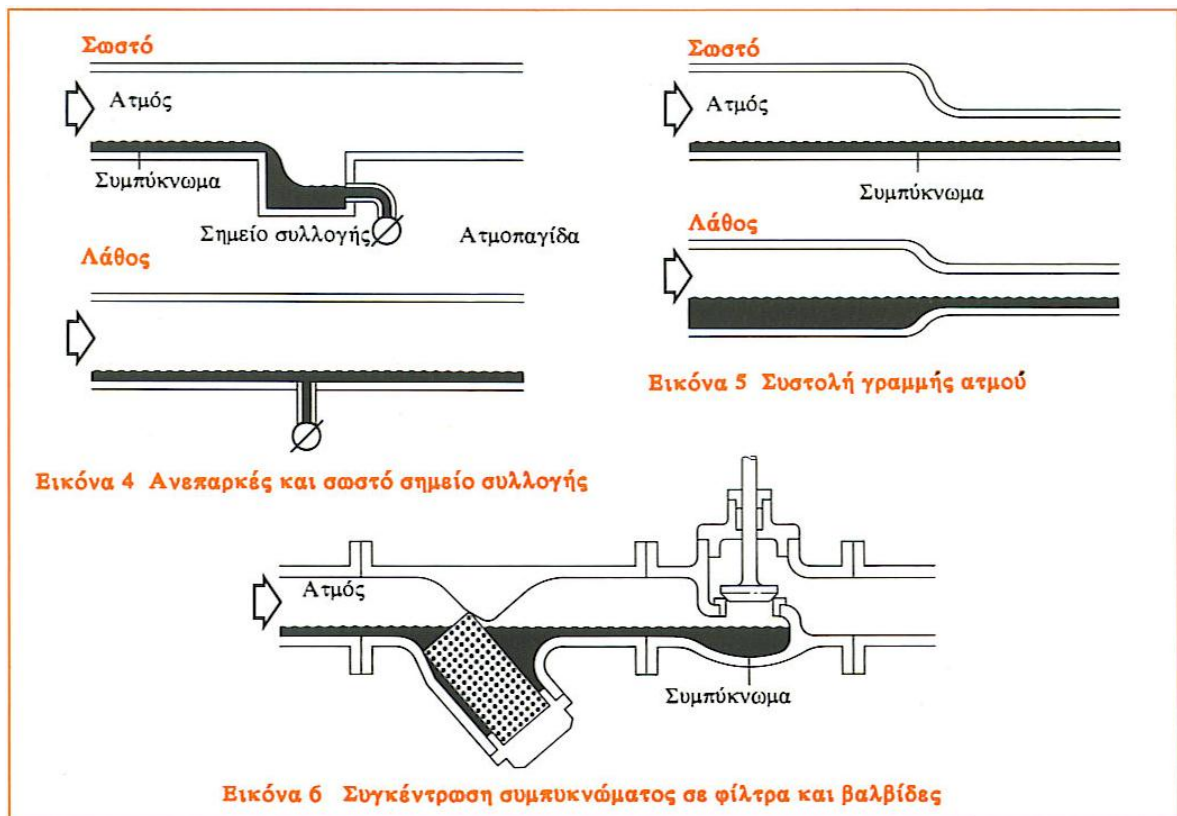


Εικόνα 2 Σταγονίδια νερού παρασύρονται από τον ατμό, λόγω ανεπιθύμητου χαμηλού σημείου στη σωλήνωση

Εικόνα 3 Ανύψωση του σωλήνα

Σχήμα 6.2 Λανθασμένη διαμόρφωση "κοιλιάς" σε δίκτυο ατμού -εικόνα 2- και τρόπος ανύψωσης σωλήνα σε δίκτυο ατμού -εικόνα 3-. Από [23].

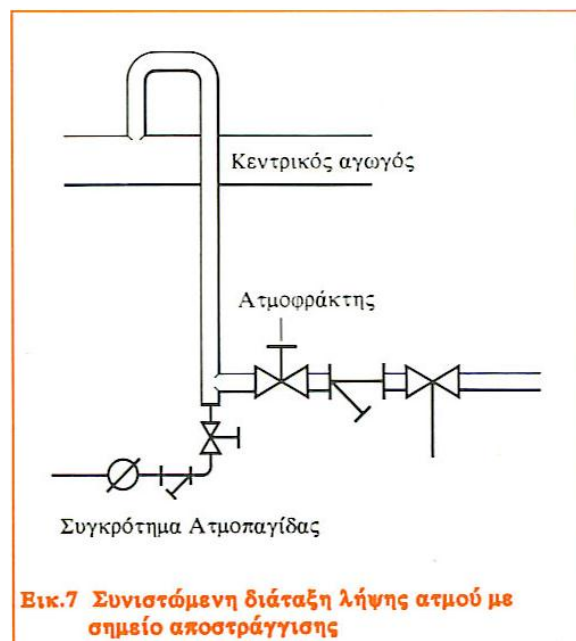
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται και άλλες κατασκευαστικές λεπτομέρειες δικτύων ατμού που σχετίζονται με τις ορθές κλίσεις.



Σχήμα 6.3. Διαμορφώσεις συστολών-διαστολών και σημείων συλλογής συμπυκνωμάτων σε δίκτυα ατμού. Από [23].

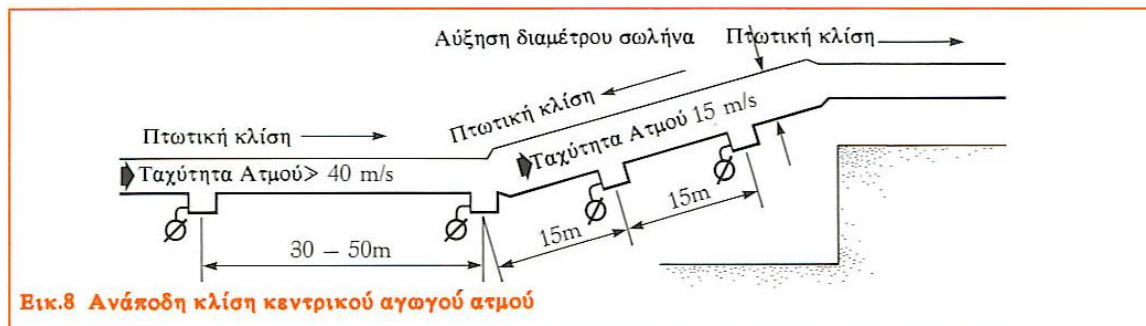
Διακλαδώσεις από τον κεντρικό αγωγό

Οι διακλαδώσεις στα δίκτυα ατμού γίνονται όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 6.4.



Σχήμα 6.4. Διακλάδωση λήψης ατμού, [23].

Ανάποδη κλίση σε κεντρικό αγωγό



Εάν σε κάποιο δίκτυο χρειασθεί να οδεύσουμε με ανάποδη κλίση συνίσταται η διάταξη του σχήματος 6.5

Στηρίγματα σωληνώσεων ατμού και συμπυκνωμάτων

Στον παρακάτω πίνακα δίδονται τα στοιχεία των στηριγμάτων των σωληνώσεων σύμφωνα με την TOTEE, [22].

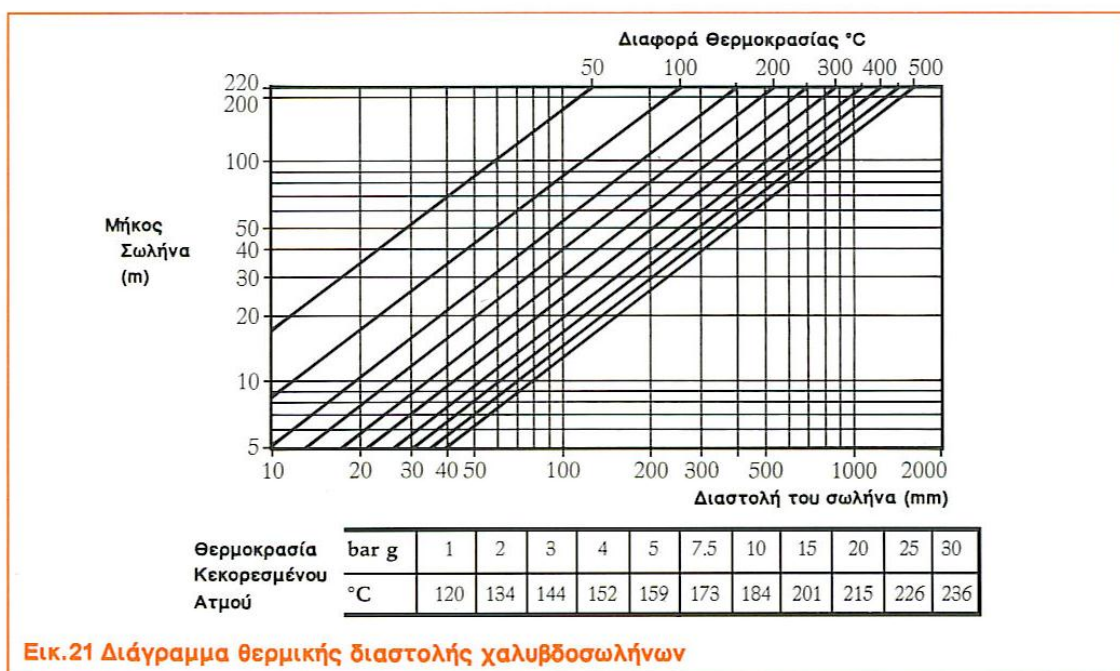
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.9. Ελάχιστες αποστάσεις στηριγμάτων

Ονομαστική διάμετρος DN για κανονικό πάχος τοιχώματος	Σωλήνες ατμού και αερίων		Σωλήνες συμπυκνωμάτων		Αποστάσεις από τον τοίχο	
	με μόνωση m	χωρίς μόνωση m	με μόνωση m	χωρίς μόνωση m	με μόνωση mm	χωρίς μόνωση mm
40	2,5	3,5	2,3	3,1	90	90
50	3,2	4,3	2,8	4,0	150	110
60	3,4	4,7	3,2	4,6	160	120
80	4,4	5,8	3,6	5,4	180	130
100	4,7	6,5	4,2	6,2	200	150
125	5,4	7,3	5,0	6,8	220	160
150	6,1	8,1	5,9	7,2	230	180
175	7,0	9,0	6,4	7,7	250	200
200	7,7	9,7	7,0	8,2	260	210
250	8,5	10,8	7,6	9,0	290	240
300	9,4	11,8	8,4	9,8	325	270
350	10,3	12,8	9,4	10,8	357	300
400	11,3	13,6	10,2	11,6	400	350

Θερμική διαστολή σωλήνων

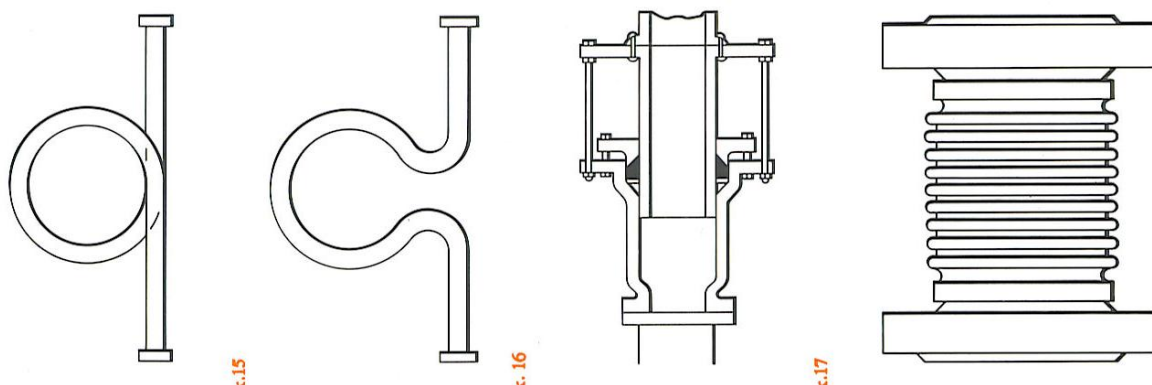
Η θερμική διαστολή λαμβάνει χώρα σε κάθε σύστημα το οποίο λειτουργεί σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από αυτές του περιβάλλοντος. Τα δίκτυα ατμού δεν αποτελούν εξαίρεση και ο υπολογισμός των διαστολών των δικτύων καθώς και η μέριμνα για απορρόφηση των συστολοδιαστολών τους είναι από τους βασικούς στόχους του σχεδιαστή μηχανικού.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι διαστολές που θα επέλθουν σε χαλυβδοσωλήνες ανάλογα με τη διαφορά θερμοκρασίας σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος η οποία για ασφάλεια λαμβάνεται 0oC.

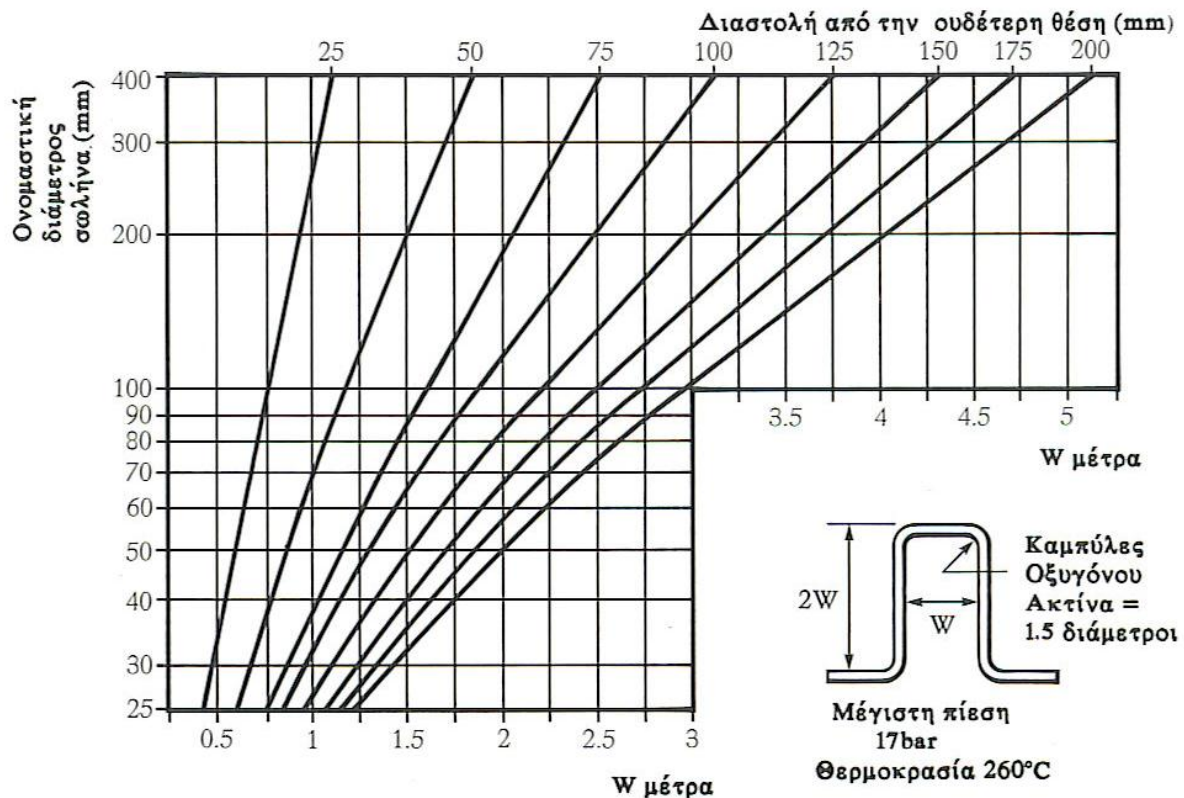


Η παραλαβή των συστολοδιαστολών στα δίκτυα του ατμού γίνεται είτε με τη χρήση κατάλληλων εξαρτημάτων -διαστολικά- είτε με ειδική διαμόρφωση των σωλήνων ώστε να μπορέσει να μεταβληθεί το μήκος τους χωρίς να υπάρξουν υπερβολικές φορτίσεις των σωληνώσεων και επομένως αστοχία.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται ορισμένες από τις συχνότερα χρησιμοποιούμενες στην πράξη διαστολικές διατάξεις.



Η συνηθέστερη διάταξη είναι αυτή της χρήσης διαστολικού τύπου φυσούνας ή Ω. Τα διαστολικά τύπου φυσούνας συνοδεύονται από τα στοιχεία του κατασκευαστή ενώ αυτά τύπου Ω κατασκευάζονται με βάση τα στοιχεία του επομένου διαγράμματος.



Εικ.23 Διαστολικοί βρόνχοι γαλυβδοσωλήνων

Θερμικές απώλειες σωληνώσεων.

Οι θερμικές απώλειες των σωληνώσεων του ατμού υπολογίζονται από την παρακάτω σχέση 6.4

$$Q = A * k * (t_a - t_2) \quad [W] \quad [6.4]$$

Όπου $k = 9,42 + 0,052 * (t_a - t_2)$ για εσωτερικούς χώρους και οι θερμοκρασίες στην παρένθεση αφορούν τη θερμοκρασία της σωλήνωσης και του αέρα ενώ A είναι η εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα σε m².

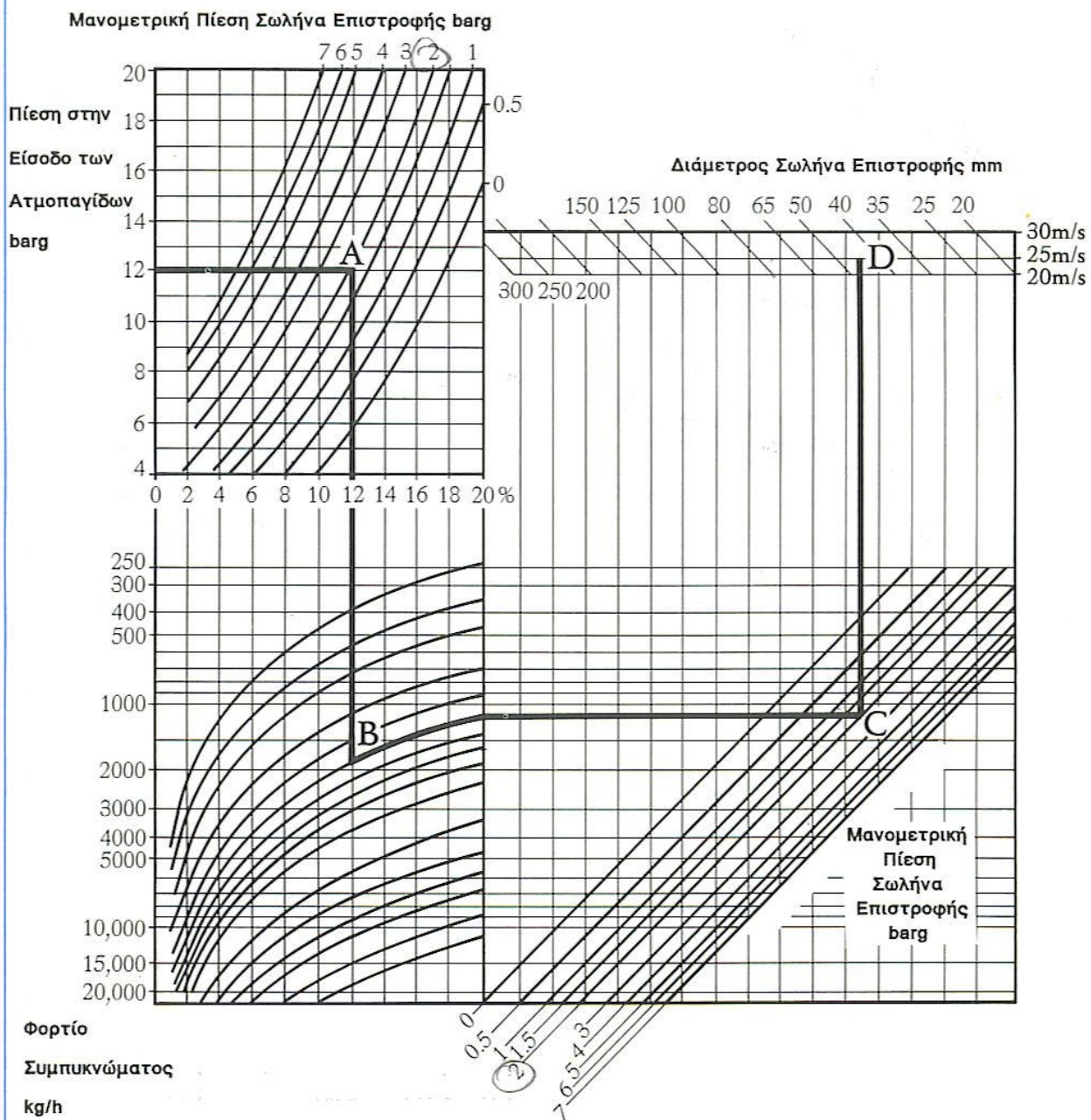
Το συνιστώμενο πάχος μόνωσης στα δίκτυα ατμού προσδιορίζεται με τη βοήθεια του παρακάτω πίνακα, [22].

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.8. Πάχη μονώσεων

Εξωτερική διάμετρος σωλήνα mm	Θερμοκρασία σωλήνα °C				
	100	150	200	250	300
13,5	30	30	40	50	60
21,3	30	30	40	60	70
26,9	30	30	50	60	70
33,7	30	40	50	60	80
38,0	30	40	50	60	90
48,3	30	40	50	70	90
60,3	30	40	60	70	90
76,1	30	40	60	80	100
88,9	30	40	60	80	100
114,3	30	40	60	80	100
139,7	30	50	70	90	110
168,3	30	50	70	90	120
219,1	30	50	70	90	120
273,0	30	50	70	100	120
323,9	30	50	80	100	130

Υπολογισμός του δικτύου επιστροφής συμπυκνωμάτων

Τα συμπυκνώματα επιστρέφουν συνήθως στο δοχείο συλλογής συμπυκνωμάτων το οποίο βρίσκεται συνήθως στο λεβητοστάσιο του εργοστασίου με φυσική ροή. Η διατομή λοιπόν των σωληνώσεων του δικτύου επιστροφής δεν μπορεί να γίνει με βάση τους νόμους που γνωρίζουμε για τον υπολογισμό της διατομής σωληνώσεων νερού. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην πράξη όμως γρήγορος υπολογισμός γίνεται με τη βοήθεια των παρακάτω νομογραφημάτων, [23].



1. Από την πίεση εισόδου στην ατμοπαγίδα κινούμαστε δεξιά μέχρι την πίεση στον σωλήνα επιστροφής --- **A**
2. Κατεβαίνουμε κάθετα μέχρι το φορτίο συμπυκνώματος --- **B**
3. Ακολουθούμε την καμπύλη του φορτίου μέχρι το τέλος της και μετά κινούμαστε δεξιά μέχρι την πίεση στον σωλήνα επιστροφής --- **C**
4. Κινούμαστε επάνω μέχρι την επιλεγείσα ταχύτητα του δευτερογενούς ατμού --- **D**
5. Διαβάζουμε την διάμετρο του σωλήνα επιστροφής

Εικ.4 Διάγραμμα επιλογής διαμέτρου σωλήνα για πίεση εισόδου στις ατμοπαγίδες μεγαλύτερη από 4 barg

Σχήμα 6.8. Νομογράφημα προσδιορισμού διαμέτρου σωλήνων επιστροφής συμπυκνωμάτων, [23].

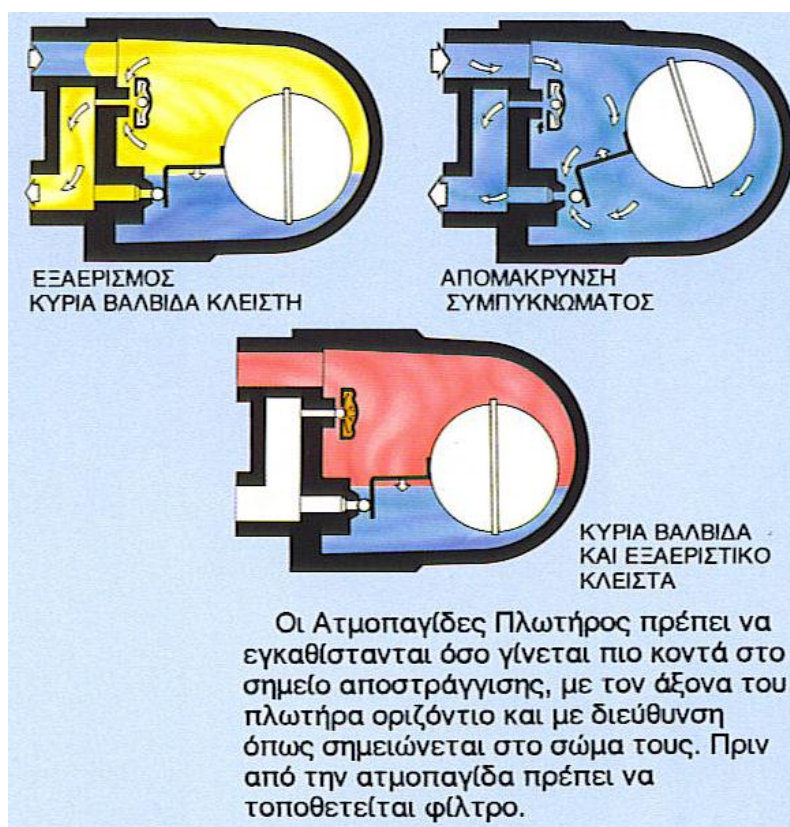
Οι ατμοπαγίδες.

Οι ατμοπαγίδες είναι ένα από τα σημαντικά στοιχεία ενός δικτύου ατμού. Χρησιμεύουν στο να απομακρύνουν το συμπύκνωμα χωρίς να επιτρέπουν την έξοδο του ατμού.

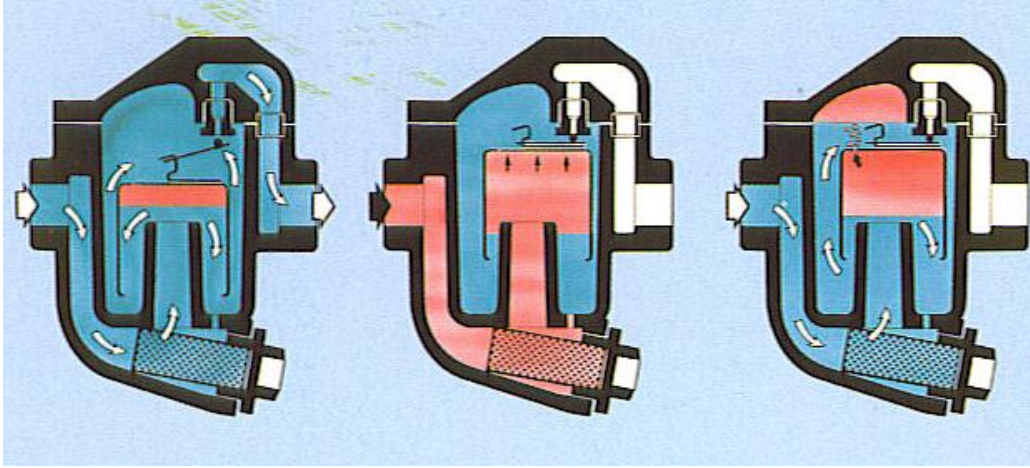
Υπάρχουν πολλών ειδών:

- Μηχανικές
- Θερμοδυναμικές
- Θερμοστατικές

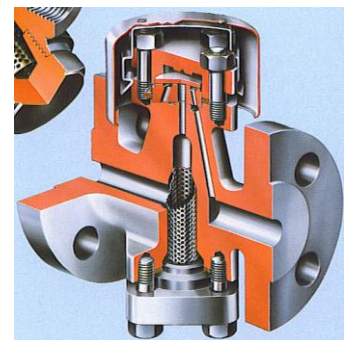
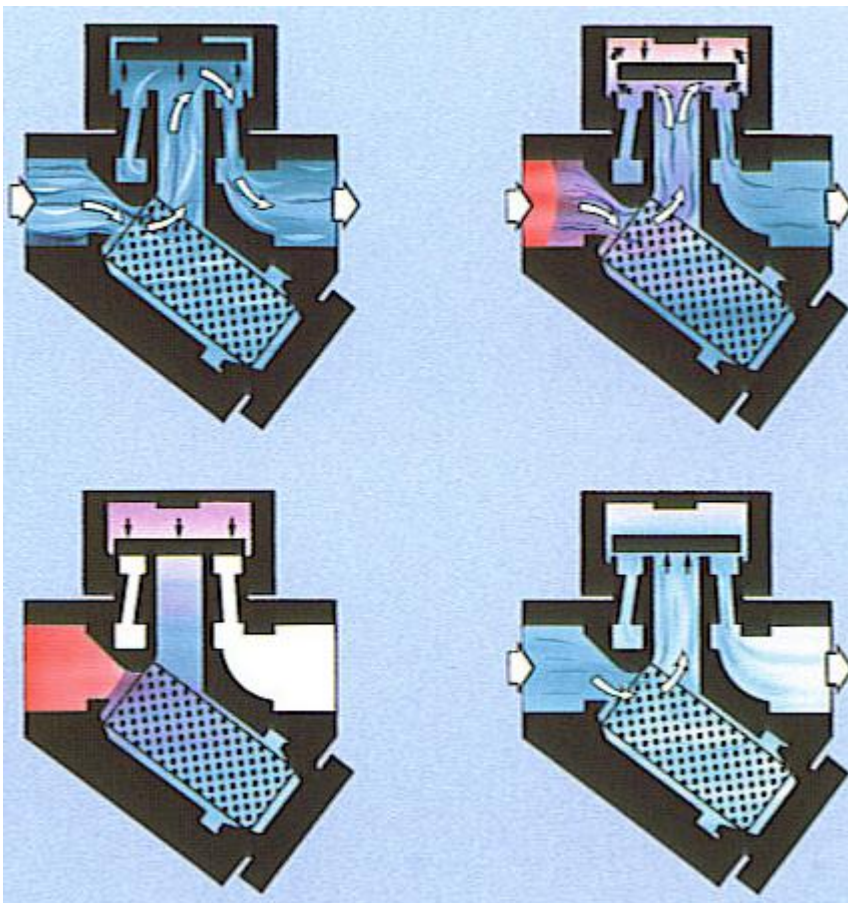
Οι τύποι των ατμοπαγίδων μεταβάλλονται ακόμα και σήμερα καθώς οι κατασκευάστριες εταιρείες ερευνούν νέους τρόπους για να επιτύχουν το αποτέλεσμα της παγίδευσης του ατμού το οποίο έχει μεγάλη σημασία στην ενεργειακή αποδοτικότητα μιας εγκατάστασης ατμού. Ο ενδιαφερόμενος μπορεί να ανατρέξει σε συγγράμματα της βιβλιογραφίας για να ενημερωθεί, [23]. Στη συνέχεια δίδεται σε σχήματα η λειτουργία ορισμένων βασικών τύπων ατμοπαγίδων. Τα σχήματα είναι από τη βιβλιογραφία, [23].



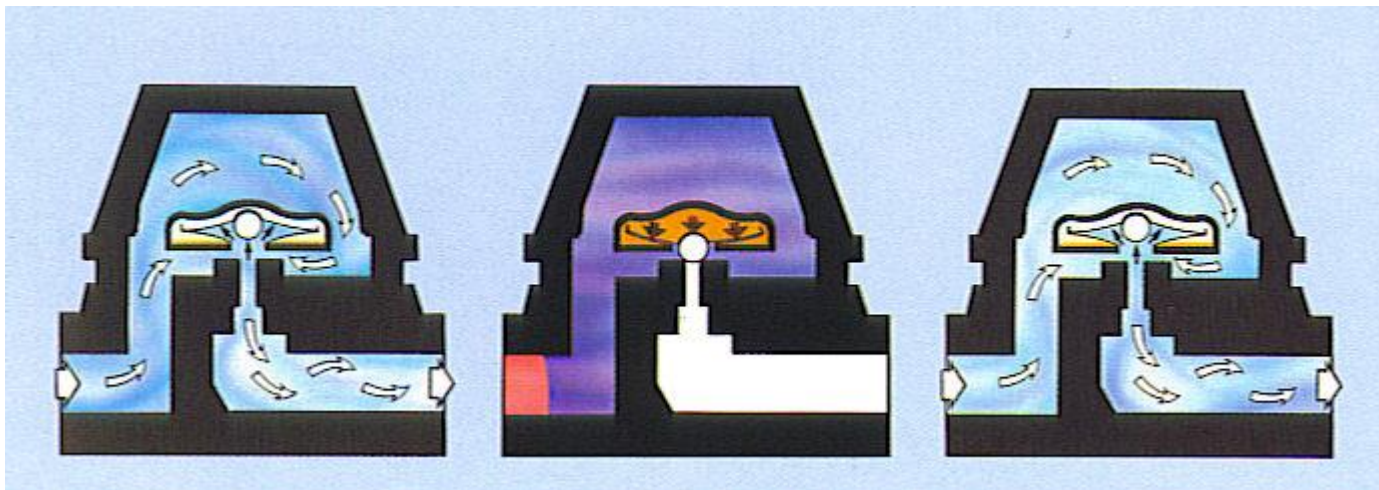
Σχήμα 6.9 Μηχανική ατμοπαγίδα πλωτήρας



Σχήμα 6.9 Μηχανική ατμοπαγίδα ανεστραμμένου κάδου



Σχήμα 6.10 Θερμοδυναμική ατμοπαγίδα.



Σχήμα 6.11 Θερμοστατική ατμοπαγίδα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Ο ατμοστρόβιλος

Γενικά

Ο ατμοστρόβιλος είναι ιστορικά η πλέον χρησιμοποιηθείσα συσκευή για την παραγωγή έργου από ένα θερμικό μέσο -στη συγκεκριμένη περίπτωση ατμός-. Σήμερα το 80 % της παγκόσμιας ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια παράγεται σε σταθμούς οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με ατμοστρόβιλους. Προβλέπεται ότι και στα επερχόμενα έτη οι ατμοστρόβιλοι θα είναι από τις κύριες θερμικές μηχανές παραγωγής έργου.

Ο πρώτος ατμοστρόβιλος κατασκευάστηκε το 1883 από τον De Laval. Από τότε οι ατμοστρόβιλοι συνεχώς εξελίσσονται και αφότου αντικατέστησαν τις ατμομηχανές στις πρώτες δεκαετίες του 20ου αιώνα, κατασκευάζονται όλο και μεγαλύτερες σε ισχύ μονάδες, τάση που επικράτησε μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1980 για να ανακοπεί με την έλευση της αποκεντρωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

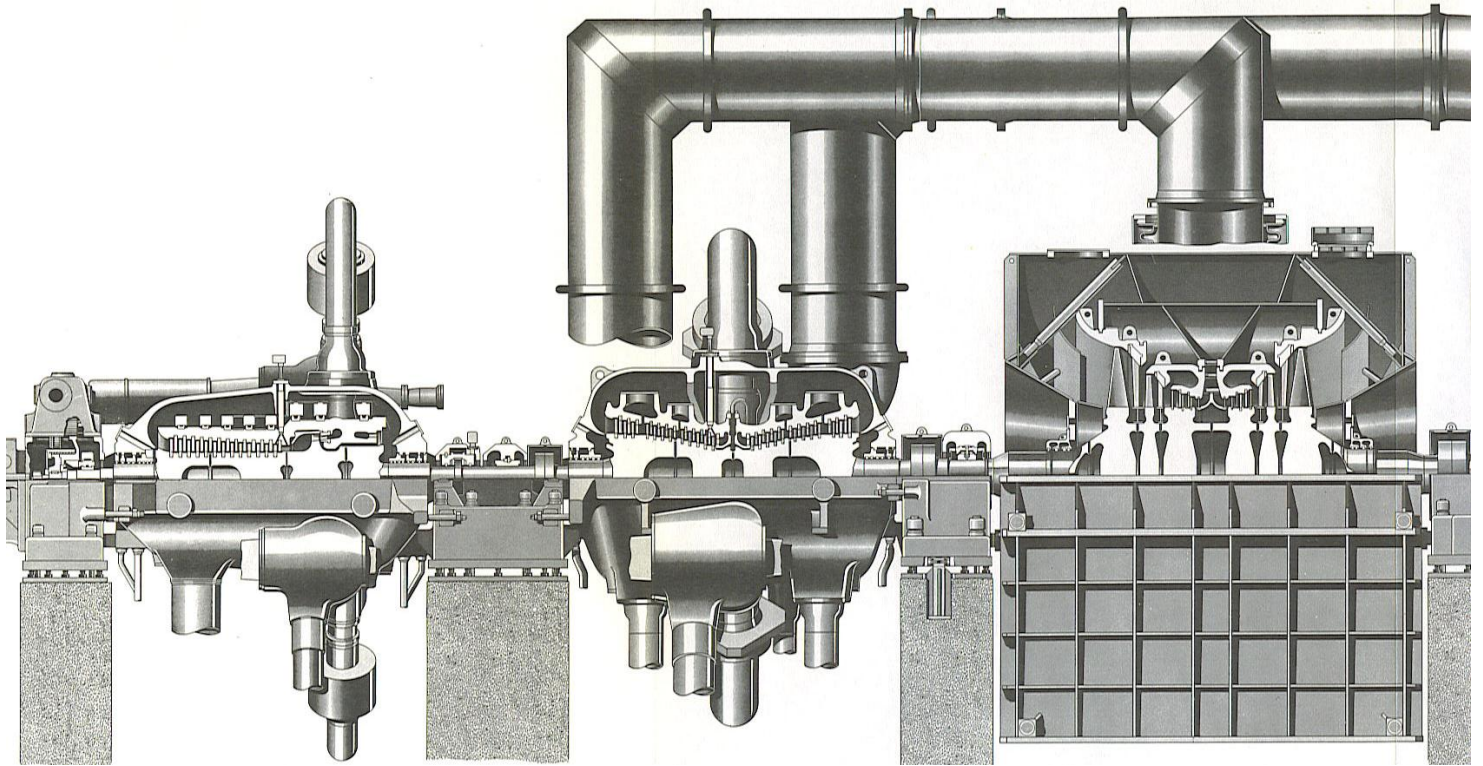
Ο ατμοστρόβιλος τροφοδοτείται με ατμό υπό πίεση ο οποίος παράγεται από ατμολέβητα ή από οποιαδήποτε άλλη συσκευή π.χ. από εναλλάκτη θερμότητας. Ο ατμός αυτός διοχετεύεται στον ατμοστρόβιλο όπου μειώνεται η πίεσή του και συνήθως και η θερμοκρασία του παράγοντας συγχρόνως την περιστροφική κίνηση των πτερυγίων του ατμοστρόβιλου η οποία αντιστοιχεί σε έργο -έργο ατράκτου-.

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή των ατμοστρόβιλων πέρασε από πολλά στάδια και υπέστη διαδοχικές βελτιώσεις για να φθάσει σήμερα να θεωρείται μιά ώριμη συσκευή η οποία έχει φθάσει κοντά στα όρια της όσον αφορά το βαθμό απόδοσής της σε έργο.

Γενικές διατάξεις

Μια γενική διάταξη ατμοστρόβιλου που χρησιμοποιείται σε ένα Θερμοηλεκτρικό σταθμό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ο ατμός υψηλής πίεσης -στην τάξη των π.χ. 120 bar- εισέρχεται στο πρώτο τμήμα του ατμοστρόβιλου όπου εκτονώνεται σε χαμηλότερη πίεση - σε περίπου 40 bar- . Κατόπιν συνεχίζει στο τμήμα μέσης πίεσης όπου εκτονώνεται σε πίεση περίπου 2-4 bar. Τέλος καταλήγει στο τμήμα χαμηλής πίεσης όπου εκτονώνεται σε πίεση χαμηλότερη της ατμοσφαιρικής εφόσον ο ατμοστρόβιλος είναι υποπίεσης. Θα πρέπει να παρατηρήσει κανείς τη μεταβολή των διαστάσεων των τριών αυτών τμημάτων του ατμοστρόβιλου και την αύξηση της

διαμέτρου των πτερυγίων του ατμοστροβίλου η οποία απαιτείται από την αύξηση του ειδικού όγκου του ατμού καθώς μειώνεται η πίεσή του. Μάλιστα στην εικόνα φαίνεται μόνον το ένα τμήμα του συγκροτήματος χαμηλής πίεσης του ατμοστροβίλου. Κανονικά υπάρχει ένα όμοιο σε σειρά στο ίδιο κεντρικό άξονα ο οποίος φέρει τα πτερύγια.



Σχήμα 7.1. Γενική διάταξη ατμοστροβίλου ονομ. ισχύος 600 MW. Από [20].

Στα παρακάτω σχήματα 7.2-7.5 φαίνεται σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια το τμήμα υψηλής μέσης και χαμηλής πίεσης του ατμοστροβίλου. Στο τμήμα χαμηλής πίεσης διακρίνεται στο κάτω μέρος ο εναλλάκτης του συμπυκνωτή ο οποίος φαίνεται και σε τρισδιάστατη απεικόνιση στην εικόνα 7.6. Είναι φανερό ότι οι διαστάσεις των συσκευών αυτών είναι μεγάλες και σύγκριση με την ανθρώπινη κλίμακα υπάρχει στην εικόνα 7.4. Οι εικόνες αυτές αφορούν ατμοστροβίλο ονομαστικής ισχύος 600 MW.

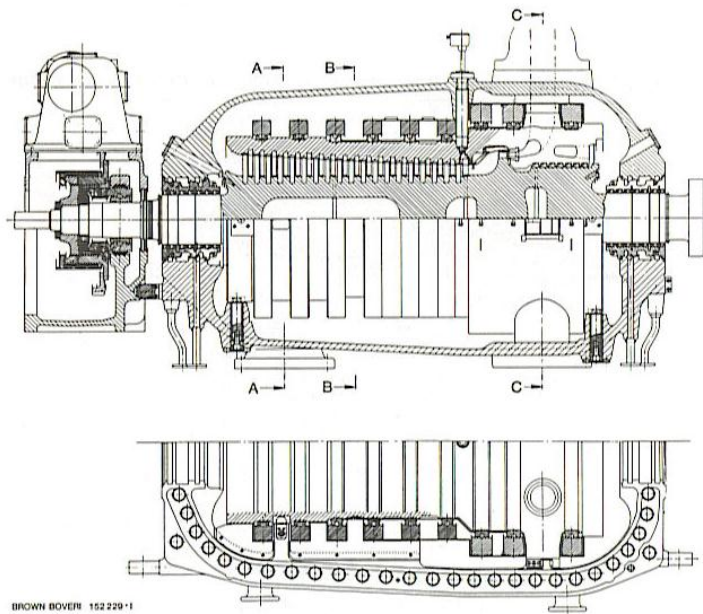


Bild 8.13 Hochdruckteil einer mehrgehäusigen Turbine (nach Fa. BBC)

Σχήμα 7.2 Τμήμα υψηλής πίεσης. Πλάγια όψη και κάτοψη. Από []

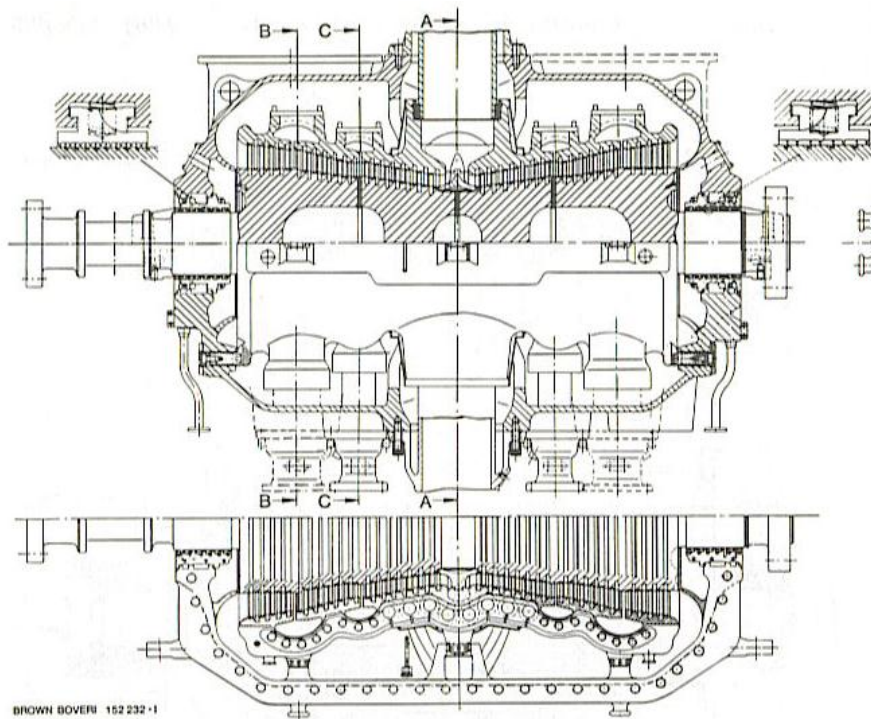
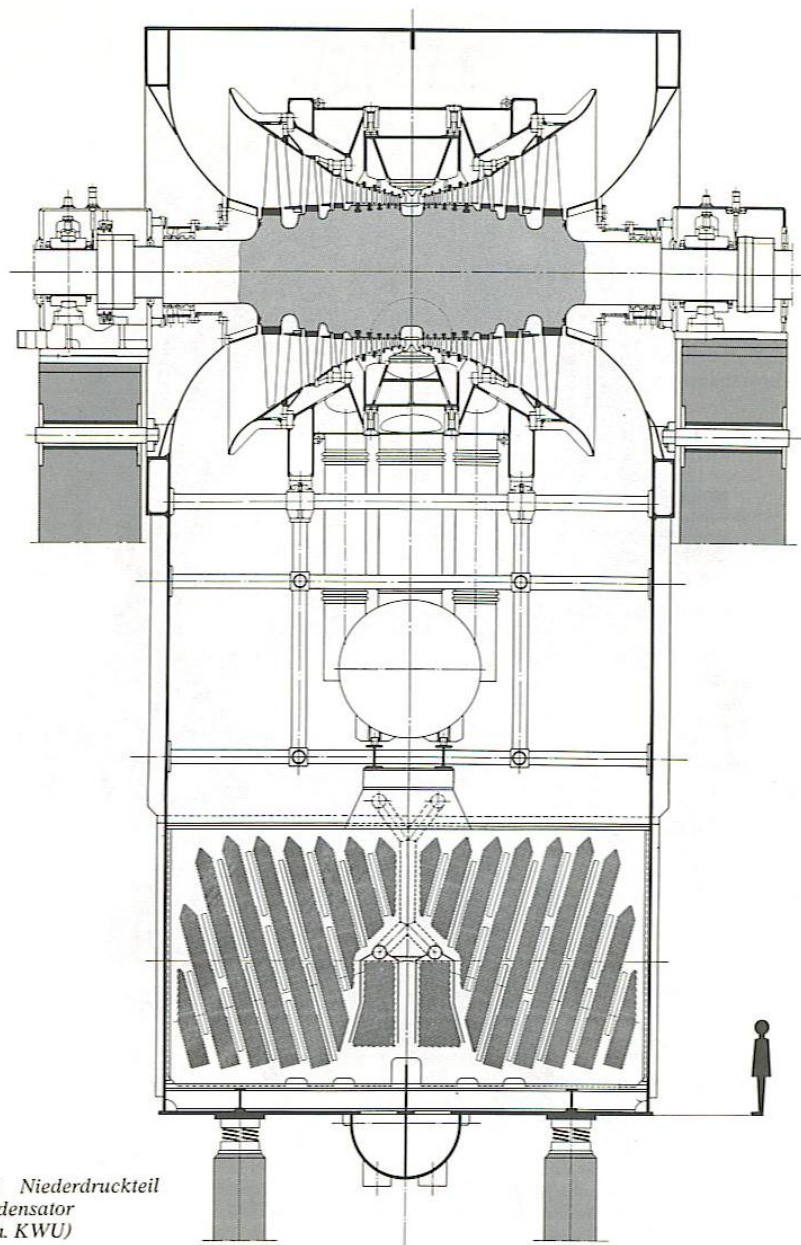


Bild 8.14 Mitteldruckteil einer mehrgehäusigen Turbine (nach Fa. BBC)

Σχήμα 7.3 Τμήμα μέσης πίεσης. Πλάγια όψη και κάτοψη. Από []



8.15 Niederdruckteil
Condensator
i Fa. KWU)

Σχήμα 7.4 Τμήμα χαμηλής πίεσης με τον συμπυκνωτή. Πλάγια όψη. Από [20]

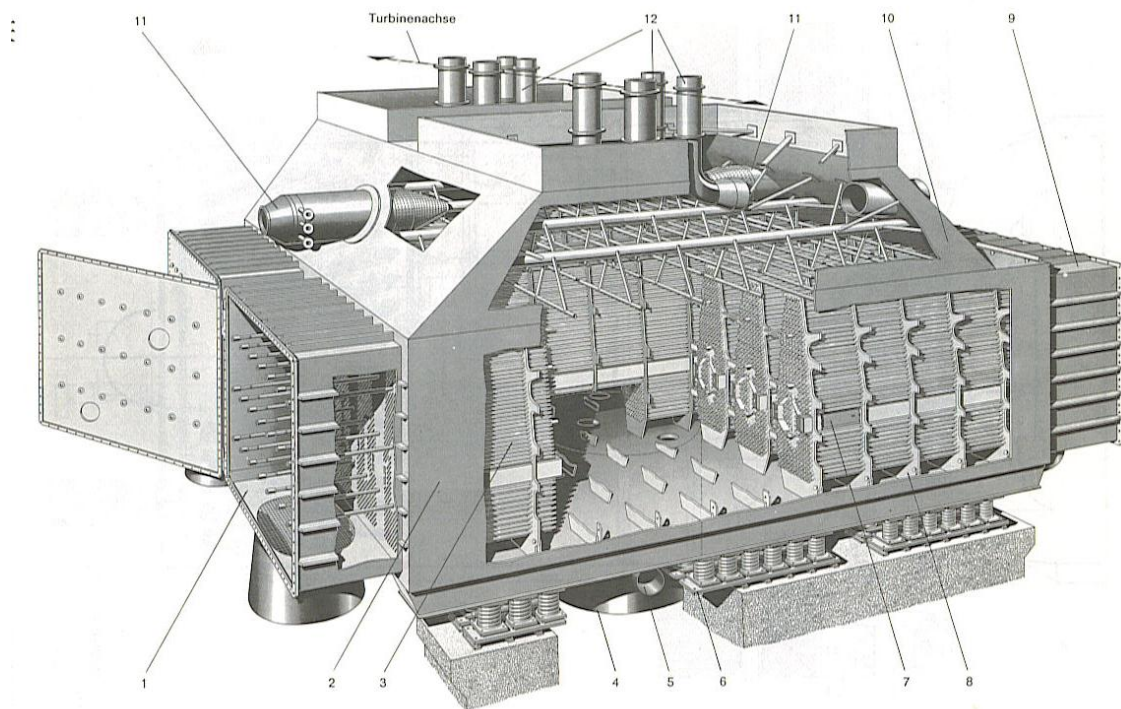


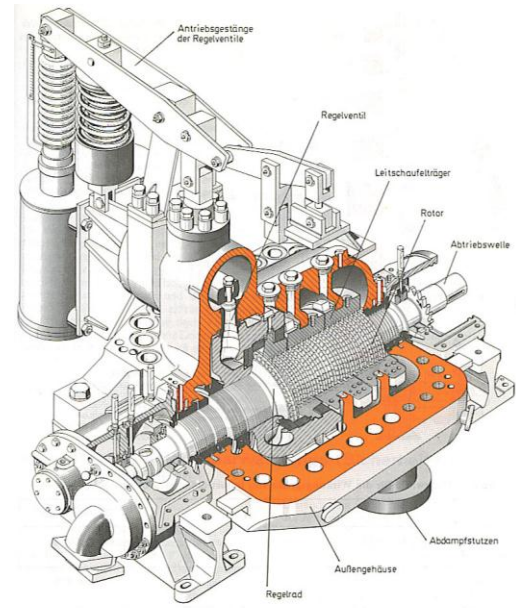
Bild 8.16 Kondensator
(nach Fa. BBC)

- | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 1. Wasserkammer-Eintritt | 4. Kondensat-Sammelgefäß | 7. Luftkühler | 10. Abdampfgehäuse |
| 2. Dampfraum | 5. Kondensatabsaugung | 8. Stützplatte | 11. Umleitdampf-Einführung |
| 3. Rohrbündel | 6. Feder-Auflager | 9. Wasserkammer-Austritt | 12. Anzapfleitungen |

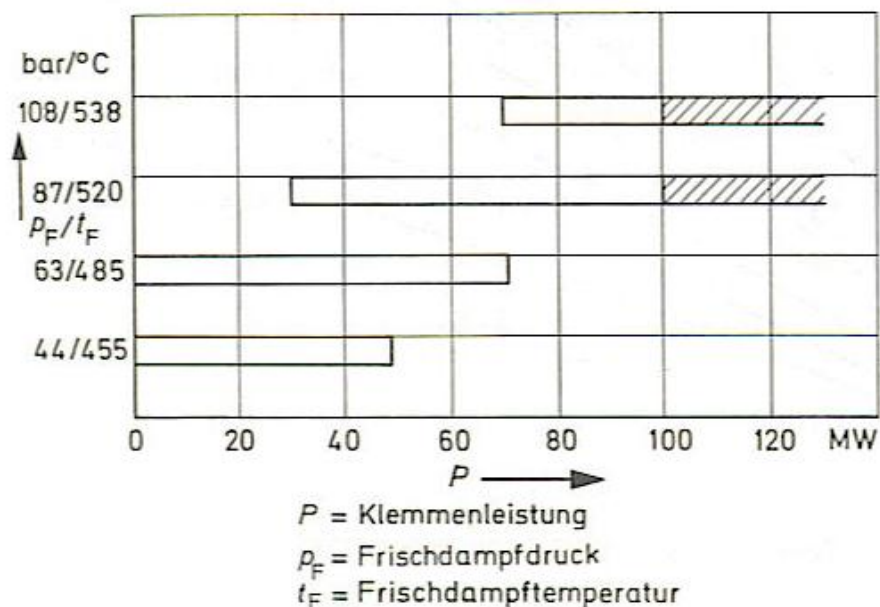
Σχήμα 7.5. Ο συμπυκνωτής. Από [20]

Σε αρκετές περιπτώσεις ο ατμοστρόβιλος δεν εκτονώνει στον ατμό σε υποπίεση αλλά σε υπερπίεση έτσι ώστε μετά την έξοδο του ατμού από τον στρόβιλο αυτός να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε θερμικές διεργασίες οι οποίες απαιτούν μεγαλύτερες θερμοκρασίες -άρα και μεγαλύτερες πιέσεις ατμού-. Ο τύπος αυτός του ατμοστροβίλου λέγεται υπερπίεσης -backpressure- και χρησιμοποιείται κυρίως στην βιομηχανία σε εγκαταστάσεις όπου μαζί με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ο ατμός χρησιμοποιείται για την κάλυψη θερμικών αναγκών -Συμπααραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας -. Ένας τέτοιος τύπος στροβίλου φαίνεται σε τρισδιάστατη απεικόνιση στο σχήμα 7.6.

Σχήμα 7.6.
Τρισδιάστατη τομή-
απεικόνιση βιομηχανικού
ατμοστροβίλου
υπερπίεσης. Από [20]



Κατά τη διάρκεια των δεκαετιών ανάπτυξης των ατμοστροβίλων έχουν επικρατήσει κάποιες "τυποποιημένες" περιοχές λειτουργίας των στροβίλων όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου ατμού. Αυτά φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 7.7

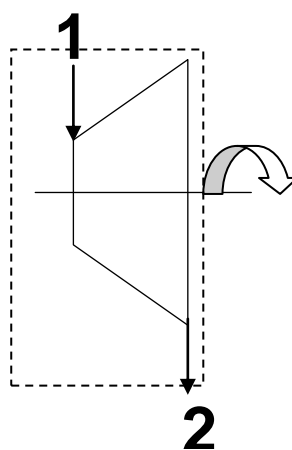


Σχήμα 7.7. Συνήθη χαρακτηριστικά ατμού ανάλογα με το μέγεθος των ατμοστροβίλων. Από [20]

Ισοζύγιο ενέργειας στα όρια του ατμοστροβίλου.

Ας υποθέσουμε ότι σε έναν ατμοστρόβιλο ο οποίος βρίσκεται σε λειτουργία κάνουμε τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας στα όριά του.

Σχήμα 7.8. Ο όγκος ελέγχου για τις μετρήσεις στην είσοδο και στην έξοδο του ατμοστροβίλου



Στην σωλήνωση εισόδου του ατμοστροβίλου στη θέση 1 τοποθετούμε ένα μανόμετρο και ένα θερμόμετρο και μετράμε την πίεση και τη θερμοκρασία του εισερχόμενου ατμού. Το ίδιο κάνουμε και στην έξοδο του ατμοστροβίλου στη θέση 2. Γνωρίζοντας την πίεση και τη θερμοκρασία του ατμού στην είσοδο και την έξοδο του ατμοστροβίλου μπορούμε να βρούμε την κατάσταση αλλά και την ενθαλπία του ατμού στις αντίστοιχες θέσεις. Αν ο ατμοστροβίλος μας είναι καλά μονωμένος εκτός από την είσοδο και την έξοδο του ατμού οι μόνη ροή ενέργειας που διαπερνάει τον όγκο ελέγχου είναι το έργο που παράγεται στην περιστρεφόμενη άτρακτο του ατμοστροβίλου.

Γράφοντας το ισοζύγιο ενέργειας λοιπόν στα όρια του όγκου ελέγχου ο οποίος περιλαμβάνει τον ατμοστροβίλο -βλέπε σχήμα 7.8- έχουμε:

$$\Delta h_t = h_{t1} - h_{t2} \quad [7.1]$$

όπου

$$h_{t1} = h_1 + c_1^2 / 2 \quad [7.2]$$

$$h_{t2} = h_2 + c_2^2 / 2 \quad [7.3]$$

Η διαφορά ειδικής ενθαλπίας που προκύπτει από τη σχέση 7.1 λέγεται **ειδικό παραγόμενο έργο** και συμβολίζεται συνήθως με Y . Στις παραπάνω σχέσεις 7.2 και 7.3 με c συμβολίζεται η ταχύτητα του ατμού μέσα στη σωλήνωση στις θέσεις 1 και 2 αντίστοιχα. Από τις σχέσεις αυτές φαίνεται ότι έχουμε θεωρήσει ότι οι μόνες συνιστώσες ενέργειας που χρειάζεται να ληφθούν υπόψη είναι αυτές της ενθαλπίας και της ταχύτητας του ατμού ενώ η δυναμική ενέργεια και όλες οι άλλες μορφές ενέργειας μεταξύ των θέσεων 1 και 2 είναι αμελητέες.

Εάν υποθέσουμε ότι θα μπορούσαμε να κατασκευάσουμε έναν τέλειο ατμοστροβίλο ο οποίος θα λειτουργούσε χωρίς καθόλου τριβές και απώλειες οποιασδήποτε μορφής και είδους τότε για τις ίδιες συνθήκες ατμού στην είσοδο θα επικρατούσαν άλλες συνθήκες ατμού στην έξοδο σε σχέση με την προηγούμενη κατάσταση όπου έχουμε πραγματικό στροβίλο. Συνήθως περιμένουμε να έχουμε χαμηλότερη ενθαλπία εξόδου. Η διαφορά ενθαλπίας στην περίπτωση αυτή λέγεται

Ειδικό ισεντροπικό παραγόμενο έργο Y_{th}

και υπολογίζεται από τη σχέση

$$Y_{th} = \Delta h_t = h_{t1} - h_{t2s} \quad [7.4]$$

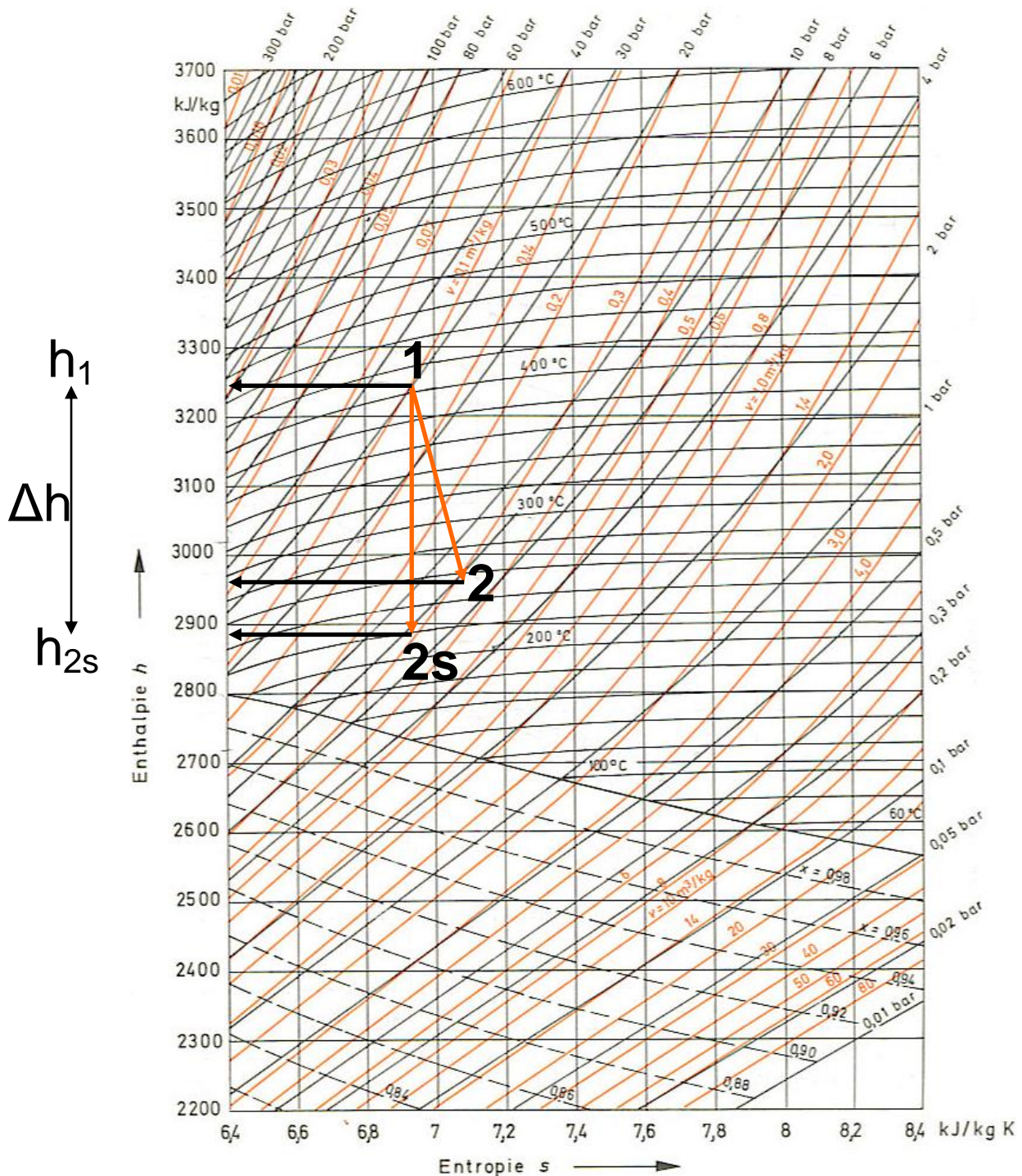
όπου

$$h_{t1} = h_1 + c_1^2 / 2 \quad [7.5]$$

$$h_{t2s} = h_{2s} + c_2^2 / 2 \quad [7.6]$$

Η περίπτωση αυτή της εκτόνωσης ατμού σε έναν τέλειο στροβίλο είναι η ισεντροπική εκτόνωση. Τέτοια διεργασία δεν υπάρχει στην πραγματικότητα είναι όμως χρήσιμη διότι μας ορίζει τα όριά μας δηλ. το καλύτερο που θα μπορούσαμε να πετύχουμε σε μια εκτόνωση από μια κατάσταση ατμού σε μια άλλη εφόσον τα πάντα λειτουργούσαν τέλεια.

Εάν παραστήσουμε τις δύο παραπάνω εκτονώσεις σε ένα διάγραμμα ενθαλπίας-εντροπίας τότε έχουμε το παρακάτω σχήμα. Το διάγραμμα αυτό λέγεται συνήθως διάγραμμα Mollier και χρησιμοποιείται κυρίως στην περιγραφή των μεταβολών σε ατμοστροβίλους.



Σχήμα 7.9. Η αναπαράσταση των μετρήσεων στην είσοδο και την έξοδο ενός πραγματικού και ενός τέλει ατμοστροβίλου σε διάγραμμα ενθαλπίας -εντροπίας. Η ισεντροπική μεταβολή είναι αυτή στην οποία η εκτόνωση καταλήγει στη θέση 2s.

Από τις σχέσεις 7.4 και 7.1 προκύπτει ο βαθμός απόδοσης του ατμοστροβίλου ο οποίος είναι

$$\eta = Y/Y_{th} \quad [7.7]$$

Μερικές φορές μπορεί να συναντήσει κανείς ορολογία όπως ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ή εσωτερικός βαθμός απόδοσης κ.λ.π. Θα πρέπει να μπορούμε να ξεχωρίσουμε την ουσία αυτών των ορισμών και την αντιστοίχισή τους στα φυσικά φαινόμενα τα οποία λαμβάνουν χώρα μέσα καθώς και έξω από τον ατμοστρόβιλο. Ο παραπάνω βαθμός απόδοσης αφορά τις θερμοδυναμικές απώλειες μόνον. Στη συνέχεια θα πρέπει να αφαιρεθούν όλες οι ρευστομηχανικές απώλειες που υπεισέρχονται εξαιτίας των τριβών του ατμού στα πτερύγια του στροβίλου, οι τριβές στον άξονα περιστροφής, οι απώλειες στην ηλεκτρογενήτρια ώστε να φθάσουμε στον συνολικό βαθμό απόδοσης της στροβιλογενήτριας.

Εφαρμογή:

Σε ένα ατμοστρόβιλο έχουν βρεθεί τα παρακάτω χαρακτηριστικά λειτουργίας:

Πίεση εισόδου = 40bar,

Πίεση εξόδου = 4 bar, Θερμοκρασία εισόδου= 400°C

Θερμοκρασία εξόδου = 180 oC

Εάν αγνοήσουμε τις ταχύτητες εισόδου/εξόδου, ποιο είναι το ειδικό ισεντροπικό έργο, το ειδικό πραγματικό έργο, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου;

Εάν θεωρήσουμε ότι οι υπόλοιποι βαθμοί απόδοσης είναι 0,95 ποιά η παροχή ατμού για να παραχθούν 10 MW ηλεκτρικής ισχύος;

Τί γίνεται μέσα στον ατμοστρόβιλο;

Αφού έχουμε αναλύσει τον ατμοστρόβιλο με βάση αυτά που παρατηρούμε στα όριά του ίσως θα ήταν ενδιαφέρον να δούμε για ποιο λόγο παρατηρούμε τις μεταβολές που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Θα πρέπει λοιπόν τώρα να εξετάσουμε τα φαινόμενα μέσα στον ατμοστρόβιλο και όχι απλώς τα ισοζύγια έξω από αυτόν.

Ας υποθέσουμε ότι κάνουμε το πείραμα το οποίο φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Έχουμε διαμορφώσει μέσα σε ένα μεταλλικό τμήμα μια δίοδο η οποία αλλάζει διεύθυνση. Στην είσοδο αυτής της οπής διοχετεύουμε μια φλέβα ρευστού η οποία προφανώς εξέρχεται από την άλλη άκρη της οπής. Σύμφωνα με όσα έχουμε μάθει στη Φυσική κάνουμε ανάλυση ορμής στους δύο άξονες x και y .

Η παροχή μάζας του ρευστού είναι για το απειροστό χρονικό διάστημα dt

$$m = \rho \cdot A \cdot V \cdot dt \quad [7.8]$$

Η ορμή μιάς στοιχειώδους μάζας ρευστού που εισέρχεται στην είσοδο I είναι

$$M_I = m \cdot V \Rightarrow M_I = \rho \cdot A \cdot V^2 \cdot dt \quad [7.9]$$

και στην έξοδο II

$$M_{IIx} = \rho \cdot A \cdot V^2 \cdot dt \cdot \cos\theta \quad [7.10]$$

Άρα η μεταβολή ορμής στην κατεύθυνση x είναι:

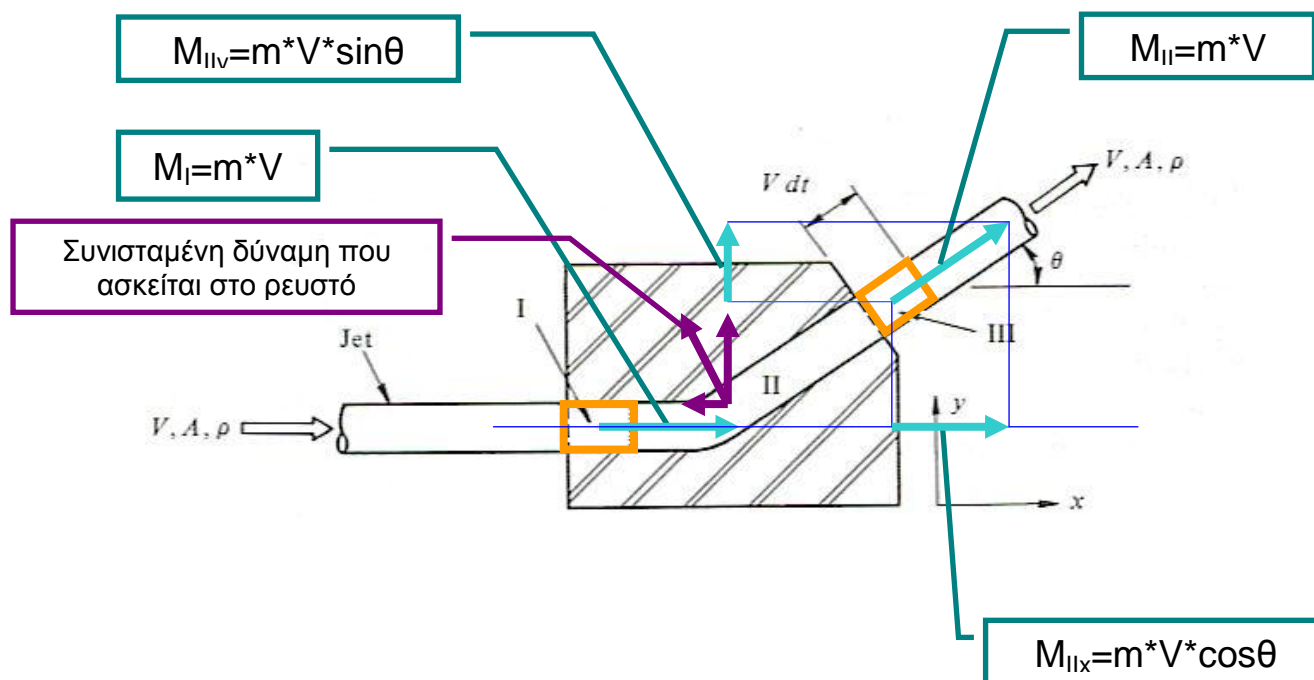
$$dM_x = \rho \cdot A \cdot V^2 \cdot dt \cdot (\cos\theta - 1) \quad [7.11]$$

και επειδή $F_x = dM_x/dt$

$$F_x = \rho \cdot A \cdot V^2 \cdot (\cos\theta - 1) \quad [7.12]$$

και

$$F_y = \rho \cdot A \cdot V^2 \cdot (\sin\theta) \quad [7.13]$$



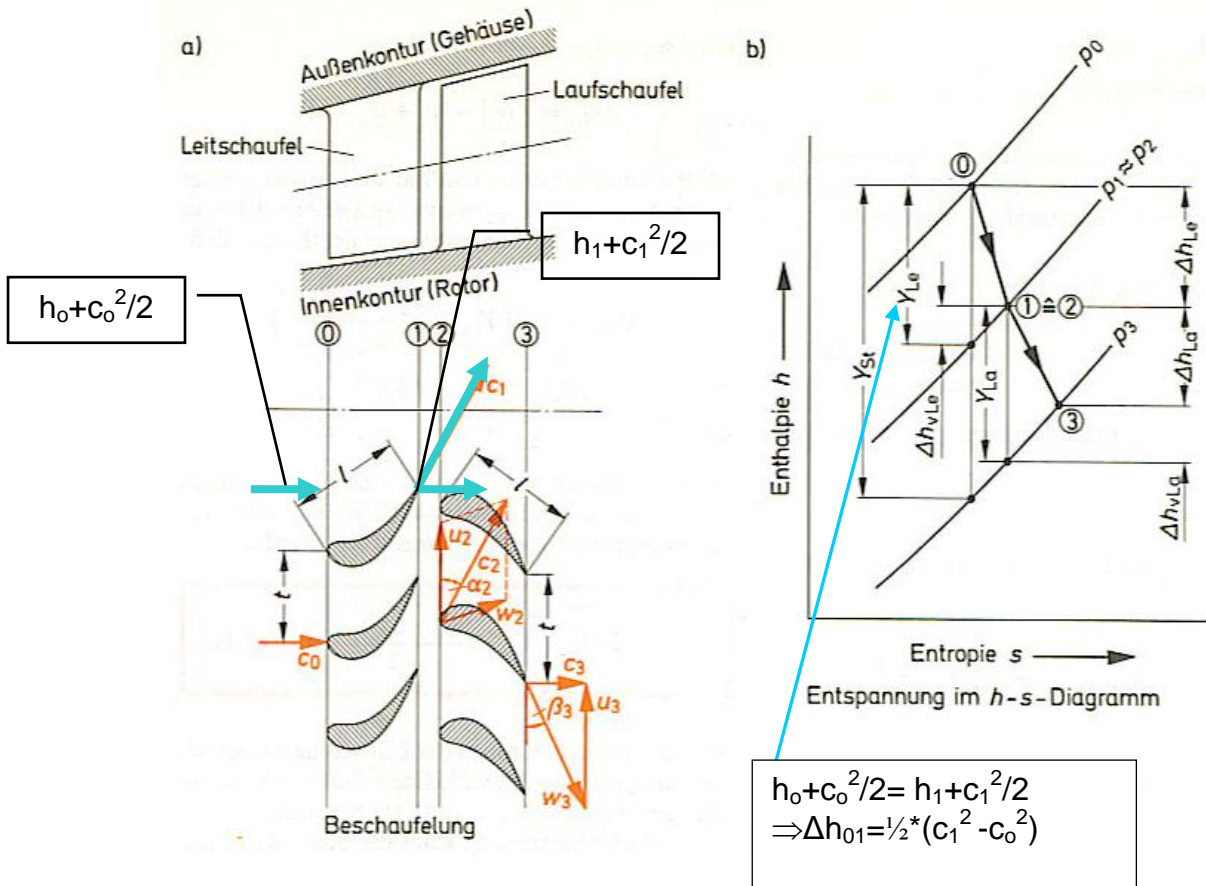
Σχήμα 7.10. Η δημιουργία δυνάμεων εξαιτίας της μεταβολής της ορμής σε ένα στοιχειώδες τμήμα πτερυγίων.

Βλέπουμε λοιπόν ότι στο τμήμα του μετάλλου μέσα από το οποίο διέρχεται το ρευστό και επειδή εξαιτίας της διαμόρφωσης του μετάλλου το ρευστό αναγκάζεται να αλλάξει διεύθυνση ασκούνται δύο δυνάμεις η F_x και η F_y . Εάν η F_x αντιμετωπιζόταν π.χ με ένα αξονικό ρουλμάν και η F_y επενεργούσε ελεύθερα θα είχαμε μια περιστροφή γύρω από τον άξονα των x : είναι ο λόγος για τον οποίο το πτερύγιο του αεροστροβίλου αλλά και κάθε άλλης πτερυγιοφόρου μηχανής παραγωγής έργου περιστρέφεται.

Ας φανταστούμε τώρα όχι ένα αλλά μια σειρά με αλλητάλληλα πτερύγια μέσα από τα οποία οδηγείται μια παροχή ατμού όπως στο σχήμα 7.11. Η πρώτη σειρά πτερυγίων είναι σταθερή ενώ η δεύτερη μπορεί να περιστρέφεται. Ο ατμός οδηγείται κατά μήκος του άξονα περιστροφής και εισέρχεται στην πρώτη σειρά πτερυγίων με ταχύτητα c_0 στη θέση 0.

Η συνολική του ειδική ενέργεια στη θέση αυτή θα είναι

$$H_0 = h_0 + c_0^2/2 \quad [7.14]$$



Σχήμα 7.11. Η μεταβολή των ταχυτήτων του ατμού σε μια σταθερή/κινητή πτερύγωση αξονικού ατμοστροβίλου. Παράλληλη αναπαράσταση των μεταβολών στο διάγραμμα h - s .

Εξαιτίας της διαμόρφωσης των σταθερών πτερυγίων η διεύθυνση ροής του ατμού αλλάζει και εξέρχεται από τη σειρά των σταθερών πτερυγίων στη θέση 1. Η συνιστώσα c_1 της ταχύτητας του ατμού τώρα έχει αυξηθεί ώστε να μπορέσει να διατηρηθεί η ίδια αξονική ροή και επομένως ταχύτητα c_0 . Στη θέση αυτή 1 η ειδική ενέργεια του ατμού είναι πλέον

$$h_1 + c_1^2/2 \quad [7.15]$$

Εάν δεν είχαμε καθόλου απώλειες η συνολική ειδική ενέργεια στη θέση 1 θα ήταν ίση με αυτήν στη θέση 0 διότι δεν έχουμε άλλη ροή ενέργειας -σταθερή πτερύγωση-. Στην περίπτωση αυτή η μεταβολή μεταξύ θέσης 0 και 1 θα ήταν ισεντροπική όπως φαίνεται στο αντίστοιχο διάγραμμα στο σχήμα 7.11. Βεβαίως η αύξηση της ταχύτητας σημαίνει ότι θα πρέπει να μειωθεί η ενθαλπία h_1 ώστε να ισχύει το ισοζύγιο

$$h_0 + c_0^2/2 = h_1 + c_1^2/2 + \text{απώλειες} \quad [7.16]$$

Μείωση της ενθαλπίας σημαίνει όμως και μείωση της πίεσης. Έτσι στη θέση 1 η πίεση είναι χαμηλότερη από την πίεση στη θέση 0. Στη θέση 1 ο ατμός οδηγείται στην είσοδο της κινητής πτερύγωσης 2. Μπορούμε να υποθέσουμε για απλότητα ότι η θέση 1 και 2 συμπίπτουν. Η ταχύτητα c_2 είναι τέτοια ώστε σε συνδυασμό με την ταχύτητα περιστροφής της κινητής πτερύγωσης u_2 να δημιουργήσουν μία σχετική

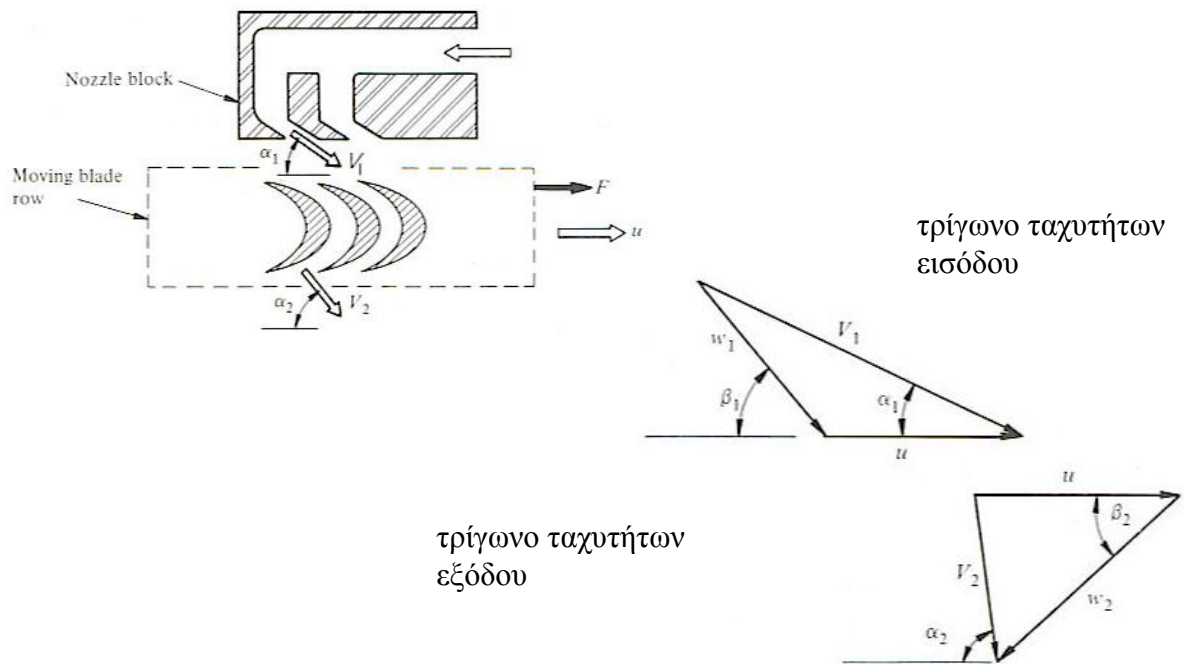
ώς προς την κινητή πτερύγωση ταχύτητα εισόδου στην κινητή πτερύγωση w_2 . Η κινητή πτερύγωση είναι διαμορφωμένη με τέτοιο τρόπο ώστε στην έξοδό της η συνιστώσα της ταχύτητας κατά τον άξονα του στροβίλου c_3 να έχει την ίδια τιμή με την c_0 . Έτσι ο ατμός έχει προετοιμαστεί για να εισέλθει στο επόμενο ζευγάρι σταθερής -κινητής πτερύγωσης. Μεταξύ της θέσης 2 και 3 έχουμε

$$h_2 + c_2^2/2 = h_3 + w_3^2/2 + \text{έργο περιστροφής} + \text{απώλειες} \quad [7.17]$$

Το έργο περιστροφής μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη λογική που έχει περιγραφεί στο σχήμα 7.10 και οφείλεται στην μεταβολή της ορμής κατά τη διέλευση μέσα από την κινητή πτερύγωση.

Για να γίνει καλύτερα κατανοητή η διεργασία αυτή μπορούμε να ρίξουμε μιά ματιά στο παρακάτω σχήμα.

Ο ατμός εισέρχεται μέσα στον κεντρικό διανομέα και από το τμήμα των ακροφυσίων -nozzle block- εκτοξεύεται στο τμήμα των πτερυγίων. Στην είσοδο των πτερυγίων επικρατούν οι ταχύτητες που απεικονίζονται στο τρίγωνο ταχυτήτων εισόδου ενώ στην έξοδο αυτές του τριγώνου ταχυτήτων εξόδου. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα ταχυτήτων βλέπουμε ότι στο συγκεκριμένο στρόβιλο το μέτρο της ταχύτητας w_1 και w_2 δεν αλλάζουν. Αυτό που αλλάζει είναι η διεύθυνση και επομένως και η ορμή. Αυτή η μεταβολή ορμής είναι που δημιουργεί την περιστροφή της πτερωτής και την παραγωγή έργου. Οι υπολογισμοί φαίνονται στις παρακάτω σχέσεις.



Σχήμα 7.12. Η μεταβολή των ταχυτήτων του ατμού σε μία σταθερή/κινητή πτερύγωση αξονικού αμοστροβίλου. Αναπαράσταση του στροβίλου δράσης

$$F = m^*(V_2 \cos \alpha_2 - V_1 \cos \alpha_1) \quad [7.18]$$

Λόγω της διαμόρφωσης των πτερυγίων τα μέτρα των ταχυτήτων w_2 & w_1 είναι ίδια και επομένως και οι πιέσεις $p_2 = p_1$ αν δεν υπήρχαν τριβές.

Εξαιτίας των τριβών όμως

$$w_2/w_1 = cb < 1 \quad [7.19]$$

Από τα τρίγωνα ταχυτήτων έχουμε:

$$V_2 \cos \alpha_2 = u - w_2 \cos \beta_2 \quad [7.20]$$

και

$$w_2 = cb * w_1 \quad w_1 = (V_1^2 + u^2 - 2V_1 u \cos \alpha_1)^{1/2} \quad [7.21]$$

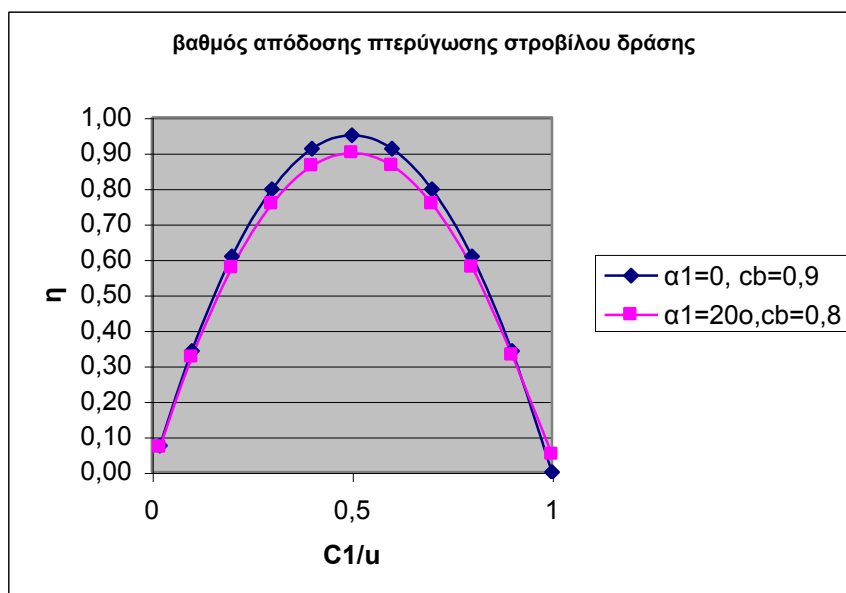
Αντικαθιστώντας και λαμβάνοντας υπόψη ότι η ισχύς που δίδεται από την πτερύγωση είναι $P = F_u$ ενώ η ισχύς της μάζας του ρευστού είναι $P_p = m * V_1^2 / 2$ έχουμε:

$$\eta_b = P/P_p = 2 * k * (cb \cos \beta_2 (1 + k^2 - 2k \cos \alpha_1)^{1/2} + \cos \alpha_1 - k) \quad [7.22]$$

Όπου $k = u/V_1$

Η σχέση αυτή δίνει το τμήμα της ισχύος του ατμού που μετατρέπεται σε ισχύ της πτερύγωσης σε συνάρτηση με τις γωνίες εισόδου και εξόδου στην κινητή πτερύγωση ενός στροβίλου δράσης δηλ. το βαθμό απόδοσης της πτερύγωσης.

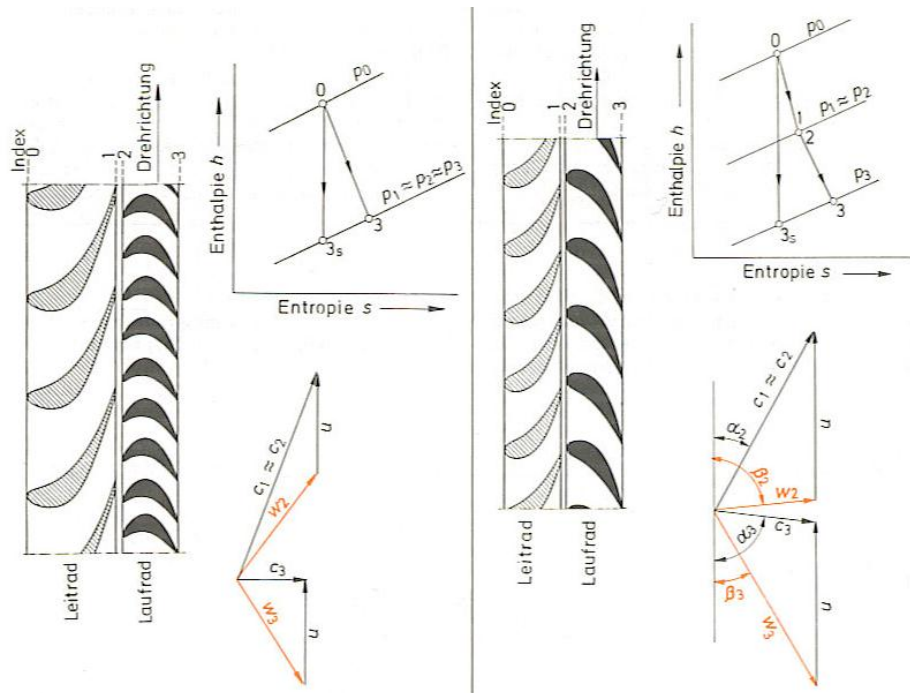
Αν κάνουμε το διάγραμμα ως προς τον λόγο C_1/u τότε θα πάρουμε το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 7.13. Η μεταβολή του βαθμού απόδοσης ενός στροβίλου δράσης σε σχέση με το λόγο C_1/u με παραμέτρους τη γωνία εισόδου α_1 και τον συντελεστή cb .

Στρόβιλοι δράσης και αντίδρασης

Με όσα είδαμε προηγουμένως μπορούμε να διαχωρίσουμε τους αξονικούς στροβίλους σε δύο γενικές κατηγορίες. Τους στροβίλους δράσης και τους στροβίλους αντίδρασης. Η διαφορά τους περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 7.14. Η μεταβολή του ταχυτήτων εισόδου/εξόδου ενός στροβίλου δράσης και ενός αντίδρασης με την αναπαράσταση της μεταβολής στο διάγραμμα h - s .

Δυνάμεις οι οποίες ασκούνται στην πτερύγωση

Από τα τρίγωνα ταχυτήτων που αναλύθηκαν προηγουμένως υπολογίζονται οι δυνάμεις -περιφερειακές και αξονικές- οι οποίες ασκούνται στην πτερύγωση του στροβίλου.

Η περιφερειακή δύναμη που ασκείται από την πτερύγωση είναι

$$F = m \cdot (C_3 \cos \alpha_3 \pm C_2 \cos \alpha_2) \quad [7.23]$$

όπου για $\alpha_3 > 90^\circ$ τότε χρησιμοποιούμε το πρόσημο +
ενώ για $\alpha_3 < 90^\circ$ χρησιμοποιούμε το πρόσημο -

Η ισχύς που πραγματοποιείται από την πτερύγωση είναι:

$$P = F \cdot u \quad [7.24]$$

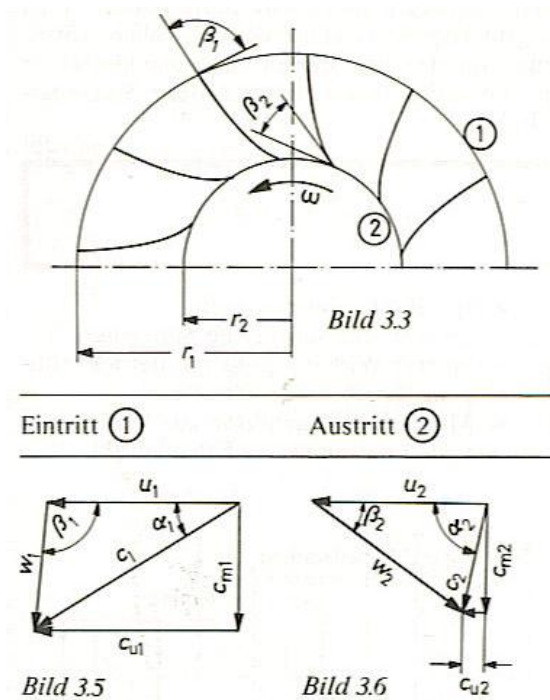
Η αξονική δύναμη που ασκείται από την πτερύγωση είναι

$$F = m \cdot (C_3 \sin \alpha_3 - C_2 \sin \alpha_2) + A \cdot (P_2 - P_3) \quad [7.25]$$

Όπου A είναι η μετωπική επιφάνεια της πτερύγωσης

Ακτινικοί στρόβιλοι

Η μελέτη των ακτινικών στρόβιλων γίνεται με την ίδια προσέγγιση όπως αυτή των αξονικών. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται σε σχηματική παράσταση η πτερωτή ενός ακτινικού στρόβιλου με τα αντίστοιχα τρίγωνα ταχυτήτων στην είσοδο και την έξοδο της πτερωτής.



Σχήμα 7.15. Η μεταβολή του ταχυτήτων εισόδου/εξόδου ενός ακτινικού στρόβιλου.

Η ροπή που ασκείται από την πτερύγωση είναι

$$M = m \cdot (c_{u1} r_1 - c_{u2} r_2) \quad [7.26]$$

Η ισχύς που αποδίδεται είναι:

$$P_{th\psi} = M^*\omega \quad [7.27]$$

Επίσης

$$P_{th\psi} = m * Y_{th\psi} \quad [7.28]$$

Προκύπτει επομένως ότι:

$$Y_{th\psi} = cu_1u_1 - cu_2u_2 = \Delta h \quad [7.29]$$

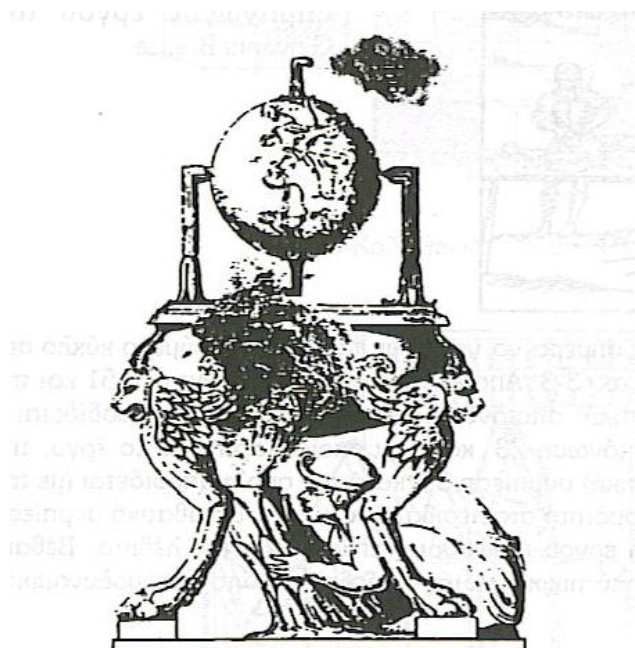
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Ο κύκλος παραγωγής έργου με τη χρήση του ατμού

Γενικά

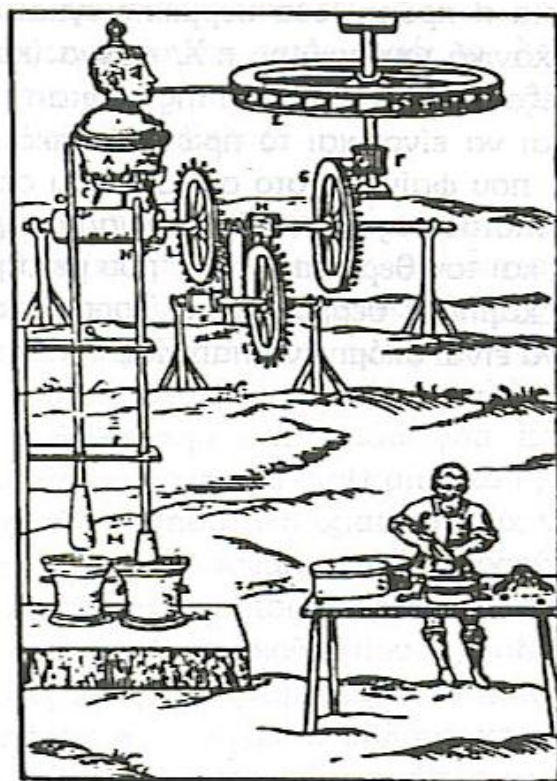
Ο κύκλος παραγωγής έργου με τη χρήση ατμού είναι ο κύκλος με τον οποίο παράγεται το μεγαλύτερο τμήμα της χρησιμοποιούμενης σήμερα ηλεκτρικής ενέργειας ανά τον κόσμο. Εξελίχθηκε μαζί με την ανάπτυξη της θερμοδυναμικής και της τεχνικής για να φθάσει σήμερα σε υψηλές σε σχέση με το παρελθόν επιδόσεις και βαθμούς απόδοσης. Ο πρώτος κύκλος παραγωγής έργου με χρήση ατμού είναι γνωστός ως ο κύκλος του Ήρωνα. Ο Ήρων ο Αλεξανδρεύς είχε κατασκευάσει την συσκευή η οποία φαίνεται στο σχήμα 8.1 γύρω στο 2ο αιώνα π.Χ.

Στη συσκευή αυτή το νερό το οποίο υπάρχει μέσα στο δοχείο βράζει με τη βοήθεια της φωτιάς. Παράγεται ατμός ο οποίος εκτονώνεται από τα δύο ακροφύσια περιστρέφοντας έτσι τη σφαίρα η οποία φέρει τα ακροφύσια.



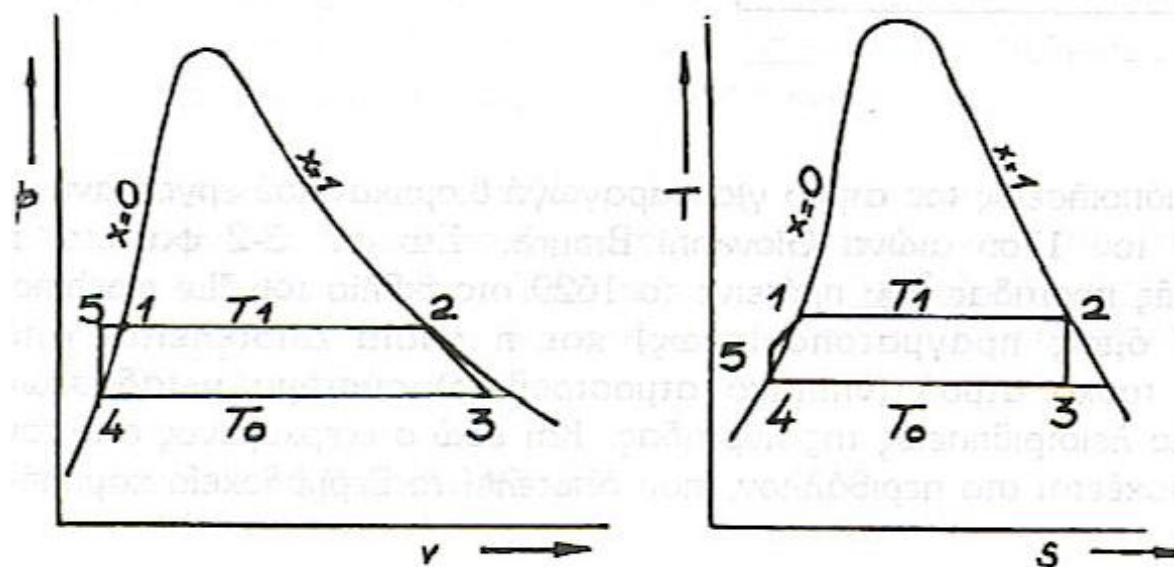
Εικόνα 8.1. Η συσκευή του Ήρωνα του Αλεξανδρέως.

Μια παραλλαγή αυτής της συσκευής είναι η μηχανή που είχε κατασκευάσει ο Ιταλός Giovanni Branca και η οποία φαίνεται στο σχήμα 8.2. Η μηχανή αυτή χρησίμευε για το τρίψιμο του μπαρουτιού σε σκόνη -μηχανικό γουδί-



Εικόνα 8.2. Η μηχανή του Giovanni Branca -17ος αιώνας μ.Χ.

Αξίζει να προσπαθήσουμε να μελετήσουμε τις μεταβολές που υφίσταται ο ατμός στη συσκευή του Ήρωνα. Για τη μελέτη αυτή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα διάγραμμα πίεσης-ειδικού όγκου ή ακόμα και ένα διάγραμμα Θερμοκρασίας - εντροπίας. Το αποτέλεσμα της αναπαράστασης αυτής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 8.3. Η αναπαράσταση των μεταβολών του ατμού στη συσκευή του Ήρωνα.

Η χρησιμότητα του διαγράμματος θερμοκρασίας -εντροπίας προκύπτει από το ότι ο πολλαπλασιασμός της μεταβολής της εντροπίας επί την θερμοκρασία μας δίνει τη μεταβολή της ενθαλπίας-βλέπε κεφάλαιο 1-.

Αυτό σημαίνει ότι η επιφάνεια κάτω από μία μεταβολή η οποία αναπαρίσταται σε διάγραμμα T-s παριστάνει ενθαλπία δηλ. ενέργεια. Έτσι μπορούμε να παρακολουθήσουμε οπτικά τις ενεργειακές μεταβολές οι οποίες λαμβάνουν χώρα.

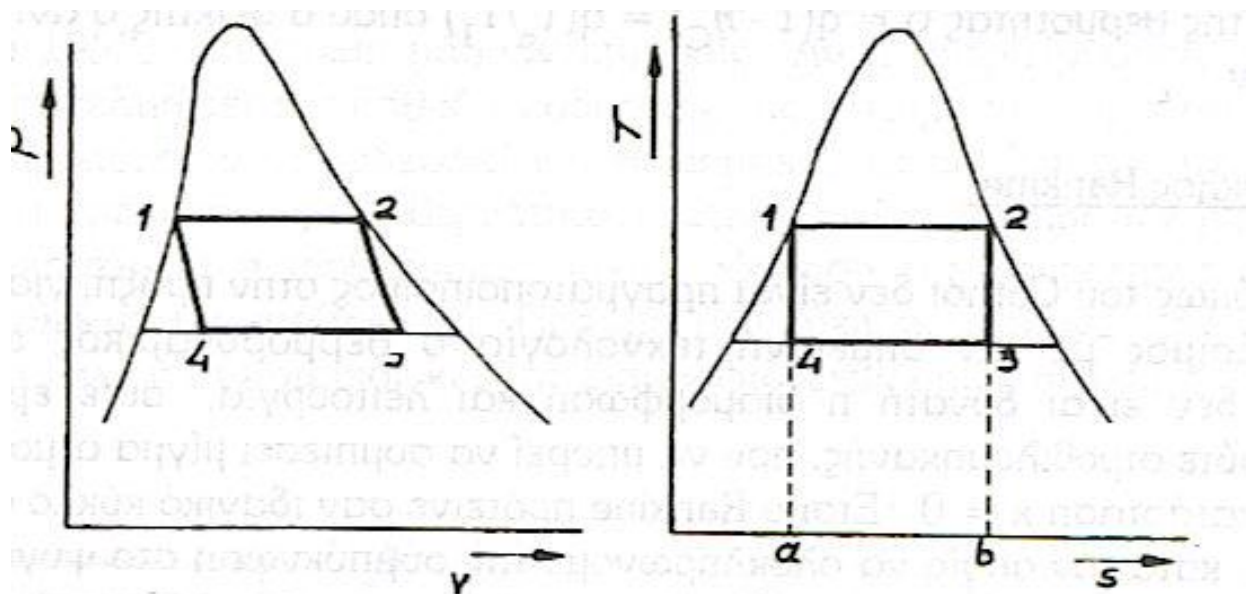
Μια ακόμα παρατήρηση που προκύπτει από την αναπαράσταση των μεταβολών στο σχήμα 8.3 είναι ότι πρόκειται για κυκλικές μεταβολές δηλ. από εκεί που άρχισε η μεταβολή εκεί και τελειώνει. Αυτό είναι κάτι πολύ βασικό γιατί σε μια κυκλική μεταβολή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το ίδιο μέσο εξοικονομώντας έτσι πόρους. Η αρχή αυτή έχει εφαρμογή στην τεχνική και έτσι σήμερα χρησιμοποιούμε κυρίως κυκλικές μεταβολές.

Οι παραπάνω διεργασίες ονομάζονται κυκλικές διεργασίες και χρησιμοποιούνται σήμερα σε μεγάλο βαθμό για την παραγωγή έργου το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτώντας στη συνέχεια τα δίκτυα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.

Σημαντική προσπάθεια έχει καταβληθεί και καταβάλλεται από τους μηχανικούς για την ανάπτυξη και βελτίωση των κυκλικών διεργασιών παραγωγής έργου. Στη συνέχεια θα δούμε πώς ξεκίνησε η μελέτη αυτή των θερμικών κύκλων παραγωγής έργου.

Ο κύκλος του Carnot -Καρνώ-

Ενώ είχε ήδη ξεκινήσει η κατασκευή των πρώτων ατμομηχανών από εμπειροτεχνικούς -James Watt, τέλος του 18ου αιώνα- οι επιστήμονες προσπαθούσαν να κατανοήσουν τις διεργασίες αυτές για παραγωγή έργου. Μεταξύ αυτών και ο Νικόλαος Carnot ο οποίος το 1824 σε νεαρή ηλικία, μόλις 28 ετών, συνέλαβε την ιδέα ενός κύκλου παραγωγής ενέργειας που αποτελείται από μια ισεντροπική συμπίεση, μία ισοβαρή θέρμανση, μια ισεντροπική εκτόνωση και μια ισοβαρή ψύξη. Ο κύκλος αυτός του εργαζόμενου μέσου -ατμός- μπορεί να παρασταθεί σε διάγραμμα T-s όπως φαίνεται στο σχήμα 8.4.



Σχήμα 8.4. Η αναπαράσταση του κύκλου Καρνώ σε διάγραμμα πίεσης- όγκου και θερμοκρασίας-εντροπίας.

Όπως σε κάθε κυκλική μεταβολή έτσι και στον κύκλο Καρνώ το εργαζόμενο μέσο π.χ. νερό/ατμός εκτελεί διαδοχικές μεταβολές με σκοπό στο τέλος να παραχθεί από τη συνολική διεργασία έργο δηλ. η ενέργεια υπό μορφή θερμότητας η οποία δίδεται ή αφαιρείται από το εργαζόμενο μέσο να μετατραπεί κατά ένα μέρος σε έργο. Ο κύκλος εργάζεται μεταξύ δύο πιέσεων: την υψηλή πίεση P1 αυτή που ορίζεται από τη γραμμή 1-2 και την χαμηλή πίεση P2 αυτή η οποία ορίζεται από τη γραμμή 4-3. Το εργαζόμενο μέσο σε κατάσταση κορεσμού αλλά και σε υγρή και σε αέρια φάση – σημείο 4- συμπιέζεται ισεντροπικά δηλαδή τέλεια χωρίς καμιά απώλεια ενέργειας από τη χαμηλή πίεση P1 στην υψηλή P2 και μετατρέπεται σε κορεσμένο υγρό – σημείο 1. Το κορεσμένο υγρό σε σταθερή θερμοκρασία και πίεση θερμαίνεται και γίνεται κορεσμένος ατμός –σημείο 2-. Κατόπιν ο ατμός εκτονώνεται ισεντροπικά δηλαδή τέλεια και χωρίς απώλειες, από την υψηλή πίεση στη χαμηλή πίεση στο σημείο 3 και λόγω της εκτόνωσης τμήμα του μετατρέπεται σε κορεσμένο υγρό. Κατόπιν με απαγωγή θερμότητας το εργαζόμενο μέσο από το σημείο 3 συμπυκνώνεται και καταλήγει ισοβαρώς στο αρχικό σημείο 4. Ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

Μπορούμε στο διάγραμμα T/s να υπολογίσουμε τη θερμότητα που χρειαζόμαστε για να θερμάνουμε το μέσο από το σημείο 1 στο 2 καθώς και τη θερμότητα που πρέπει να απάγουμε για να το συμπυκνώσουμε. Αυτές είναι σύμφωνα με τη σχέση ορισμού της εντροπίας :

Θερμότητα που πρέπει να προσδώσουμε για να εξατμίσουμε το εργαζόμενο μέσο από τη θέση 1 στη θέση 2

$$Q_{12} = (b-a) \cdot T1 \quad [8.1]$$

όπου T1 η απόλυτη θερμοκρασία η οποία αντιστοιχεί στην υψηλή πίεση του κύκλου.

Θερμότητα που πρέπει να απάγουμε για να συμπυκνώσουμε το εργαζόμενο μέσο από τη θέση 3 στη θέση 4

$$Q_{34} = (a-b) \cdot T2 \quad [8.2]$$

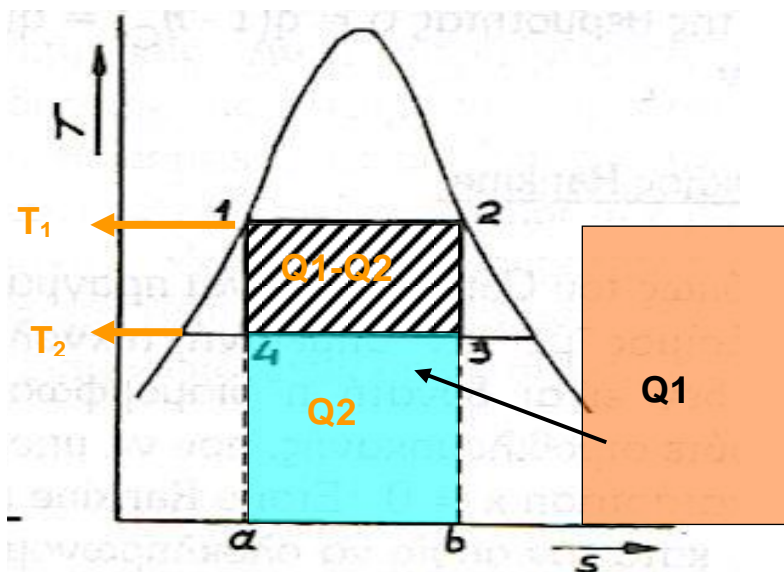
όπου T2 η απόλυτη θερμοκρασία η οποία αντιστοιχεί στην χαμηλή πίεση του κύκλου.

Η διαφορά

$$W_{1234} = Q_{12} - Q_{34} \quad [8.3]$$

Είναι το έργο το οποίο αποδίδει ο κύκλος. Παρατηρούμε ότι στο διάγραμμα T/s η ενέργεια παριστάνεται ως εμβαδό όπως φαίνεται στο σχήμα 8.5. Η διαφορά των εμβαδών είναι το αποδιδόμενο από τον κύκλο έργο διότι η θερμότητα που δίδεται είναι μικρότερη από αυτήν η οποία απάγεται.

Ο κύκλος του Carnot δεν πραγματοποιήθηκε ποτέ στην πράξη διότι δεν μπορέσαμε να φτιάξουμε ισεντροπικό συμπιεστή ο οποίος θα έχει μίγμα αερίου και υγρού στην είσοδό του, ούτε κάποιο μηχάνημα το οποίο θα μπορούσε να παράγει έργο με ισεντροπική εκτόνωση κορεσμένου ατμού. Παρόλα αυτά όμως ο κύκλος αυτός έχει μεγάλη σημασία για την κατανόηση των ορίων μας όσον αφορά τις δυνατότητές μας μετατροπής της θερμότητας σε έργο μέσα από κυκλικές διεργασίες.



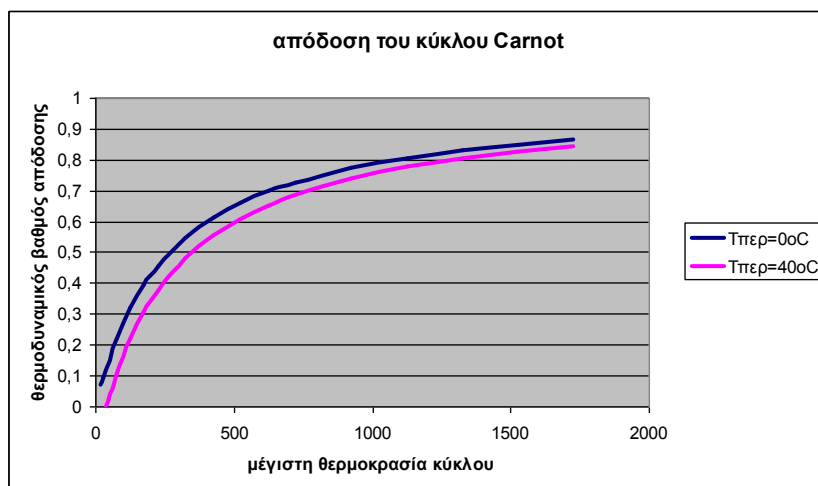
Σχήμα 8.5. Τα ποσά των ενεργειών στον κύκλο του Καρνώ.

Από τις σχέσεις 8.1, 8.2, και 8.3 προκύπτει ότι ο βαθμός απόδοσης του κύκλου Καρνώ είναι

$$(Q_1 - Q_2) / Q_1 = (T_1 - T_2) / T_1 = 1 - (T_2 / T_1) \quad [8.4]$$

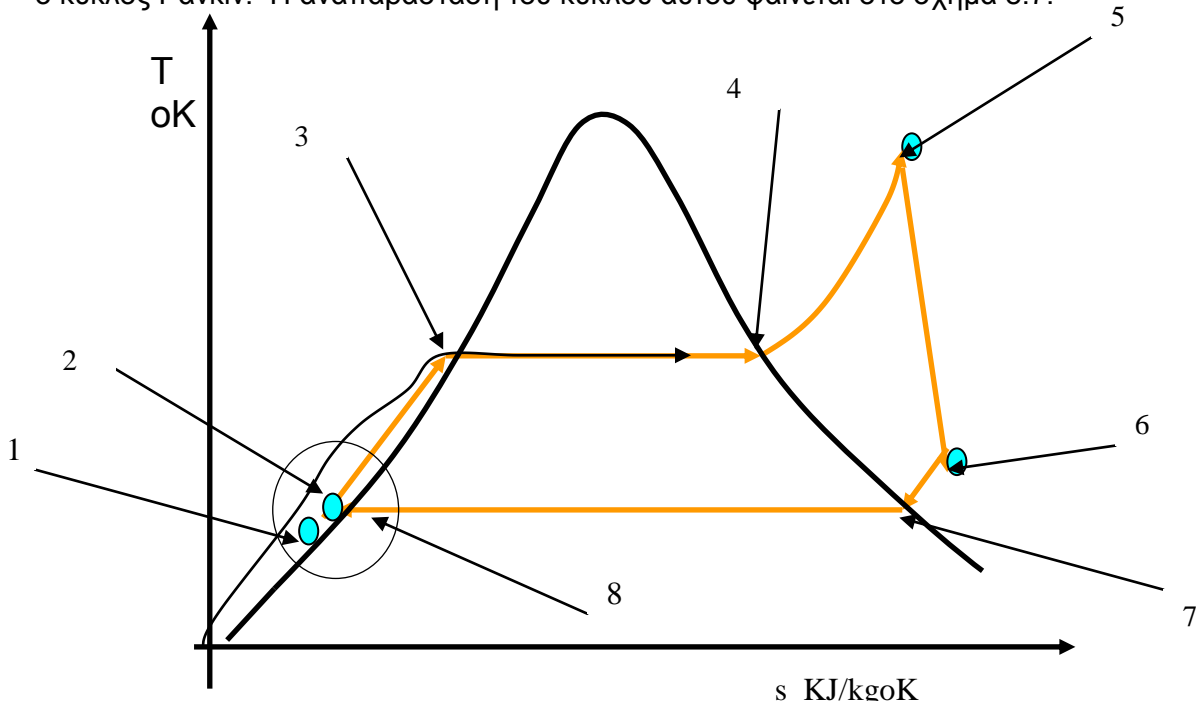
Η σχέση 8.4 έχει τεράστια σημασία για το σχεδιασμό διεργασιών παραγωγής έργου από θερμικούς κύκλους ή διεργασίες : δίνει τη μέγιστη απόδοση που θα μπορούσαμε να έχουμε σε έργο από έναν θερμικό κύκλο ο οποίος πραγματοποιείται μεταξύ δύο θερμοκρασιών T_1 και T_2 –απόλυτες θερμοκρασίες-. Η ελάχιστη θερμοκρασία που μπορούμε να ψύξουμε είναι αυτή του περιβάλλοντος. Άρα αυτό που μας μένει είναι η αύξηση της T_1 .

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ο βαθμός απόδοσης της διεργασίας Καρνώ σε σχέση με τη θερμοκρασία T_1 όταν η θερμοκρασία T_2 είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος $-0^\circ\text{C}/273^\circ\text{K}$ ή $40^\circ\text{C}/313^\circ\text{K}$ -.



Ο κύκλος του RANKINE -Ράνκιν-

Ενώ ο κύκλος Καρνό δεν πραγματοποιήθηκε ο κύκλος ο οποίος πραγματοποιήθηκε και χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες για την παραγωγή έργου με χρήση ατμού είναι ο κύκλος Ράνκιν. Η αναπαράσταση του κύκλου αυτού φαίνεται στο σχήμα 8.7.



Σχήμα 8.7. Ο κύκλος RANKINE σε διάγραμμα T/s

Υπόψυκτο νερό με τη βοήθεια μιας π.χ. αντλίας ανεβάζει την πίεσή του από την χαμηλή πίεση στην υψηλή πίεση -από το σημείο 1 στο σημείο 2. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η περιοχή μέσα στον κύκλο είναι τόσο μικρή ώστε οι μεταβολές δεν φαίνονται και στο σχήμα 8.7 η περιοχή αυτή παρουσιάζεται σε υπερβολική μεγένθυση.

Το νερό θερμαίνεται και ανεβάζει τη θερμοκρασία του μέχρις ότου γίνει κορεσμένο -σημείο 3-. Η θέρμανση συνεχίζεται και το κορεσμένο νερό ατμοποιείται σε σταθερή πίεση μέχρις ότου γίνει όλο κορεσμένος ατμός -σημείο 4-. Η θέρμανση συνεχίζεται και ο ατμός γίνεται υπέρθερμος ατμός σε ίδια πίεση -η υψηλή πίεση του κύκλου- και υψηλή θερμοκρασία -θερμοκρασία υπερθέρμανσης- σημείο 5-.

Ο υπέρθερμος ατμός εκτονώνεται σε έναν π.χ. ατμοστρόβιλο και έτσι στην έξοδο από τον στρόβιλο έχουμε την χαμηλότερη πίεση του κύκλου και χαμηλότερη θερμοκρασία- σημείο 6-. Αυτό συμβαίνει σε κάθε πραγματική εκτόνωση με αύξηση της εντροπίας. Ο υπέρθερμος ατμός ψύχεται γίνεται κορεσμένος ατμός -σημείο 7 και κατόπιν με συνεχιζόμενη απαγωγή θερμότητας συμπυκνώνεται και γίνεται κορεσμένο νερό ενώ με συνεχιζόμενη απαγωγή θερμότητας το νερό γίνεται υπόψυκτο νερό και έτσι το εργαζόμενο μέσο επιστρέφει στην αρχική κατάσταση -σημείο 1-.

Οι ισοβαρείς 8/7 και 3/4 ορίζουν την χαμηλή και υψηλή πίεση του κύκλου αντίστοιχα. Η θέρμανση του εργαζόμενου μέσου στην πορεία 2/3/4 πραγματοποιείται μέσα στον λέβητα ενώ η υπερθέρμανση 4/5 στον

υπερθερμαντήρα. Η εκτόνωση 5/6 πραγματοποιείται συνήθως μέσα σε ατμοστρόβιλο ενώ η ψύξη του εργαζόμενου μέσου σε κάποιον συμπυκνωτή. Ο συμπυκνωτής ψύχεται με τη βοήθεια συνήθως νερού το οποίο με τη σειρά του ψύχεται σε πύργο ψύξεως ή σε εναλλάκτη με τη βοήθεια αέρα περιβάλλοντος. Ο ατμοστρόβιλος περιστρέφει την ηλεκτρογεννήτρια η οποία παράγει την ηλεκτρική ενέργεια.

Ακολουθώντας την ίδια προσέγγιση με αυτήν του προηγούμενου κεφαλαίου υπολογίζουμε τα ποσά ενέργειας τα οποία προσδίδονται και αποδίδονται από το εργαζόμενο μέσο.

Έτσι έχουμε:

Ενέργεια που προσδίδεται από τον λέβητα: h_4-h_2

Ενέργεια που προσδίδεται από τον υπερθερμαντήρα: h_5-h_4

Ενέργεια που αποδίδεται από την εκτόνωση μέσα στον στρόβιλο: h_6-h_5

Ενέργεια που αποδίδεται από τον συμπυκνωτή: h_8-h_6

Ενέργεια που προσδίδεται από την αντλία : h_2-h_1

Εφόσον γνωρίζουμε τις συνθήκες λειτουργίας του κύκλου μπορούμε να υπολογίσουμε τις σχετικές ενθαλπίες και επομένως τα ποσά ενέργειας τα οποία μεταφέρονται.

Ο υπολογισμός των ενθαλπιών μπορεί να γίνει είτε από τους πίνακες ατμών είτε - με μικρότερη ακρίβεια- απευθείας από το διάγραμμα εντροπίας -θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας τις ισενθαλπικές γραμμές.

Στον παραπάνω κύκλο Rankine που περιγράψαμε θεωρήθηκε ότι ο κύκλος πραγματοποιείται μεταξύ δύο πιέσεων: της υψηλής πίεσης και της χαμηλής πίεσης. Στην πραγματικότητα και καθώς το εργαζόμενο μέσο ρέει από την μια συσκευή στην άλλη υπάρχουν απώλειες πίεσης -βλέπε κεφάλαιο 6- οι οποίες μεταβάλουν π.χ. την τελική πίεση εισόδου στον στρόβιλο. Ακόμα και στην περίπτωση αυτή η μελέτη του κύκλου πραγματοποιείται με τον ίδιο τρόπο.

Παράδειγμα 1.

Για την κυκλική διεργασία μιας απλής εγκατάστασης παραγωγής έργου με ατμό – κύκλος RANKINE- δίδονται οι ακόλουθες παράμετροι.

Πίεση λέβητα = 50 bar,

Πίεση εξόδου από το στρόβιλο = 1 bar

Θερμοκρασία υπερθέρμου ατμού = 450 oC

Θερμοκρασία εξόδου από τον στρόβιλο 150 oC

Να θεωρηθεί ότι:

Η πτώση πίεσης και οι απώλειες θερμότητας μεταξύ λέβητα, υπερθερμαντήρα και εισόδου στον στρόβιλο είναι αμελητέα.

Η πτώση πίεσης και οι απώλειες θερμότητας των σωληνώσεων μεταξύ εξόδου ατμοστρόβιλου, συμπυκνωτή και αντλίας τροφοδοσίας λέβητα είναι αμελητέα.

Η πτώση πίεσης και οι απώλειες θερμότητας μεταξύ εξόδου αντλίας και λέβητα είναι αμελητέα.

Στην έξοδο του συμπυκνωτή έχουμε κορεσμένο νερό.

Το νερό τροφοδοτείται στον λέβητα σε πίεση 50bar και σε θερμοκρασία κορεσμού η οποία αντιστοιχεί σε πίεση 1 bar.

Για την αρχική μελέτη της εγκατάστασης πρέπει :

1. Να παρασταθεί ο παραπάνω κύκλος σε διάγραμμα Εντροπίας-θερμοκρασίας.
2. Να υπολογιστεί η ειδική προσδιδόμενη θερμότητα από το λέβητα και τον υπερθερμαντήρα στο εργαζόμενο μέσο –νερό/ατμός-.
3. Να υπολογιστεί η ειδική αποδιδόμενη ενέργεια από το εργαζόμενο μέσο κατά τη διέλευσή του μέσα από τον ατμοστρόβιλο.
4. Να υπολογιστεί η ειδική αποδιδόμενη θερμότητα από το εργαζόμενο μέσο στον συμπυκνωτή.
5. Να υπολογιστεί η ειδική παροχή νερού στον συμπυκνωτή (kg νερού/ kg εργαζόμενου μέσου) που απαιτείται για την ψύξη του εργαζόμενου μέσου όταν η θερμοκρασία εισόδου του νερού είναι 15oC και η θερμοκρασία εξόδου 25 oC και τα δύο σε ατμοσφαιρική πίεση.
6. Να υπολογιστεί η παραγόμενη ηλ. Ενέργεια από τον στρόβιλο σε kWh/ kg εργαζόμενου μέσου όταν όλοι οι υπόλοιποι βαθμοί απόδοσης του στροβίλου και της γεννήτριας είναι συνολικά 75%.
7. Να υπολογιστεί ο βαθμός απόδοσης του κύκλου σε ηλεκτρική ενέργεια θεωρώντας ως προσδιδόμενη στο σύστημα ενέργεια αυτή που προσδίδεται στο εργαζόμενο μέσο από το συγκρότημα λέβητας/υπερθερμαντήρας.

Παράδειγμα 2

Για την κυκλική διεργασία μιας απλής εγκατάστασης παραγωγής έργου με ατμό δίδονται οι ακόλουθες παράμετροι.

Πίεση λέβητα = 100 bar,

Πίεση συμπυκνωτή = 0,04 bar

Θερμοκρασία υπερθέρμου ατμού = 530 oC

Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου = 0,80

Βαθμός απόδοσης της αντλίας τροφοδοσίας =0,75

Να υπολογιστούν τα τεχνικά έργα του στροβίλου, της αντλίας, οι ενέργειες που προσδίδονται ή αφαιρούνται με τη μορφή θερμότητας και ο θερμικός βαθμός απόδοσης της κυκλικής διεργασίας.

Υπολογισμοί.

Στην έξοδο του συμπυκνωτή –σημείο 1- η ενθαλπία του νερού είναι –πίνακας IV – 121,36 kJ/kg

Η αντλία παίρνει το νερό και το ανεβάζει στα 100bar. Αν υποθέσουμε ότι αυτή η συμπίεση είναι ισεντροπική –τέλεια- τότε μετά την συμπίεση το νερό θα έχει ίδια εντροπία με πριν. Από τον πίνακα IV η εντροπία πριν την αντλία είναι 0,4223 kJ/kg^oK. Ίδια εντροπία θα έχει υπό ιδανικές συνθήκες το νερό και μετά την αντλία. Από τον πίνακα VI βρίσκουμε με γραμμική παρεμβολή ότι στην κατάσταση αυτή (100bar/0,4223 kJ/kg^oK) η ενθαλπία του νερού είναι περίπου 131,5 kJ/kg.

Άρα το έργο που προσδίδεται από την αντλία στο νερό είναι:

$$(131,5 - 121,3)/0,75 = 13,5 \text{ kJ/kg}$$

Επομένως το νερό πριν την είσοδό του στον λέβητα –σημείο 2- έχει ενθαλπία:

$$13,5 + 121,3 = 134,8 \text{ kJ/kg.}$$

Πάλι από τον πίνακα VI βρίσκουμε την πραγματική θερμοκρασία και εντροπία του νερού στην κατάσταση 2 (30 °C και 0,43 kJ/kg^oK).

Ο λέβητας και ο υπερθερμαντήρας θερμαίνει το νερό και στην έξοδό του –σημείο 5- έχουμε υπέρθερμο ατμό. Στην έξοδο του λέβητα –σημείο 5- η ενθαλπία του μέσου είναι –πίνακας VI – 3451,1 kJ/kg.

Άρα από το λέβητα προσδίδεται θερμότητα

$$3451,1 - 134,8 = 3315 \text{ kJ/kg.}$$

Στην κατάσταση αυτή η εντροπία είναι 6,6950 kJ/kg^oK. Με ισεντροπική εκτόνωση μέσω του στρόβιλου στην πίεση 0,04 bar φθάνουμε σε κατάσταση υγρού ατμού. Στην κατάσταση αυτή -σημείο 6-πρέπει να βρούμε την ενθαλπία.

Εφαρμόζουμε την σχέση
 $h_6 = h'(T) + T[s - s'(T)]$

Η θερμοκρασία T είναι η θερμοκρασία κορεσμού σε p=0,04 bar ή 28,98 °C –πίνακας IV-.

$$\text{Άρα } h_6 = 121,36 + (273+28,98) \cdot (6,6950 - 0,4223) = 2015,5 \text{ kJ/kg}$$

Επομένως το τεχνικό έργο που αποδίδει η ισεντροπική –τέλεια- εκτόνωση είναι 3451-2015,5 = 1436 kJ/kg.

Επειδή όμως ο στρόβιλος έχει ισεντροπικό βαθμό απόδοσης 0,80 τελικά αποδίδεται έργο 1436*0,8 = 1148,8 kJ/kg

Επομένως η πραγματική ενθαλπία μετά τον στρόβιλο –σημείο 6- είναι

$$3451,1 - 1148,8 = 2302,3 \text{ kJ/kg.}$$

Το σημείο αυτό βρίσκεται επίσης στην περιοχή του υγρού ατμού. Το περιεχόμενό του σε ατμό είναι:

$$x_6 = (h_6 - h_6') / (h_6'' - h_6') = (2302,3 - 121) / (2553,6 - 121) = 0,89$$

Η εντροπία στη θέση αυτή είναι $S_6 = s_6' + x_6 \cdot (s_6'' - s_6') = 0,4223 + 0,89 \cdot (8,4725 - 0,4223) = 7,58 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

Στον συμπυκνωτή πρέπει να αφαιρέσουμε το ποσό θερμότητας

$$2302,3 - 121 = 2181 \text{ kJ/kg}$$

Τελικά το ωφέλιμο έργο που αποδίδεται από τη διεργασία είναι

$$1148,8 - 13,5 = 1135,3 \text{ kJ/kg.}$$

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης της διεργασίας είναι 1135,3/3315 = 0,34 = 34%

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού & Θερμότητας

Γενικά

Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο σε έναν θερμικό κύκλο Ράνκιν ένα σημαντικό μέρος από την ενθαλπία του εργαζόμενου μέσου αποβάλλεται στο περιβάλλον. Στο παράδειγμα 2 του κεφαλαίου 8 οι υπολογισμοί δείχνουν ότι ενώ από τα 3315 kJ/kg τα οποία προσδίδονται στο εργαζόμενο μέσο από τον λέβητα μόνον 1148,8 kJ/kg μετατρέπονται σε ωφέλιμο έργο ενώ 2181 kJ/kg θα πρέπει να αφαιρεθούν με τη βοήθεια του συμπυκνωτή και να απορριφθούν στο περιβάλλον ως θερμότητα. Εάν υπήρχε τρόπος αυτή η θερμότητα να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα τότε ο συνολικός βαθμός αξιοποίησης της προσδιδόμενης στο λέβητα θερμότητας θα αύξανε. Στην περίπτωση που έστω τμήμα της θερμότητας αυτής μπορεί να αξιοποιηθεί ωφέλιμα για θερμικές ανάγκες έχουμε συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Ορισμοί

Εάν γενικεύσουμε την παραπάνω παρατήρηση μπορούμε να καταλήξουμε στον ορισμό της Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού & Θερμότητας -ΣΗΘ-.

Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας είναι η ωφέλιμη αξιοποίηση της θερμότητας η οποία απομένει κατά την παραγωγή ηλεκτρισμού-έργου- με εφαρμογή θερμικών κύκλων παραγωγής έργου.

Με βάση τον παραπάνω ορισμό η έννοια της ΣΗΘ έχει εφαρμογή μόνον σε θερμικούς κύκλους παραγωγής έργου. Εάν καταφέρουμε τμήμα έστω της θερμότητας η οποία συμπαραγάγεται να το αξιοποιήσουμε αποδοτικά τότε έχουμε συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού & Θερμότητας.

Ας δούμε την εφαρμογή της ΣΗΘ χρησιμοποιώντας λίγο τροποποιημένο το παράδειγμα 2 του κεφαλαίου 8.

Παράδειγμα 1

Για την κυκλική διεργασία μιας απλής εγκατάστασης παραγωγής έργου με ατμό δίδονται οι ακόλουθες παράμετροι.

Πίεση λέβητα = 100 bar,

Πίεση συμπυκνωτή = 2 bar

Θερμοκρασία υπερθέρμου ατμού = 530 °C

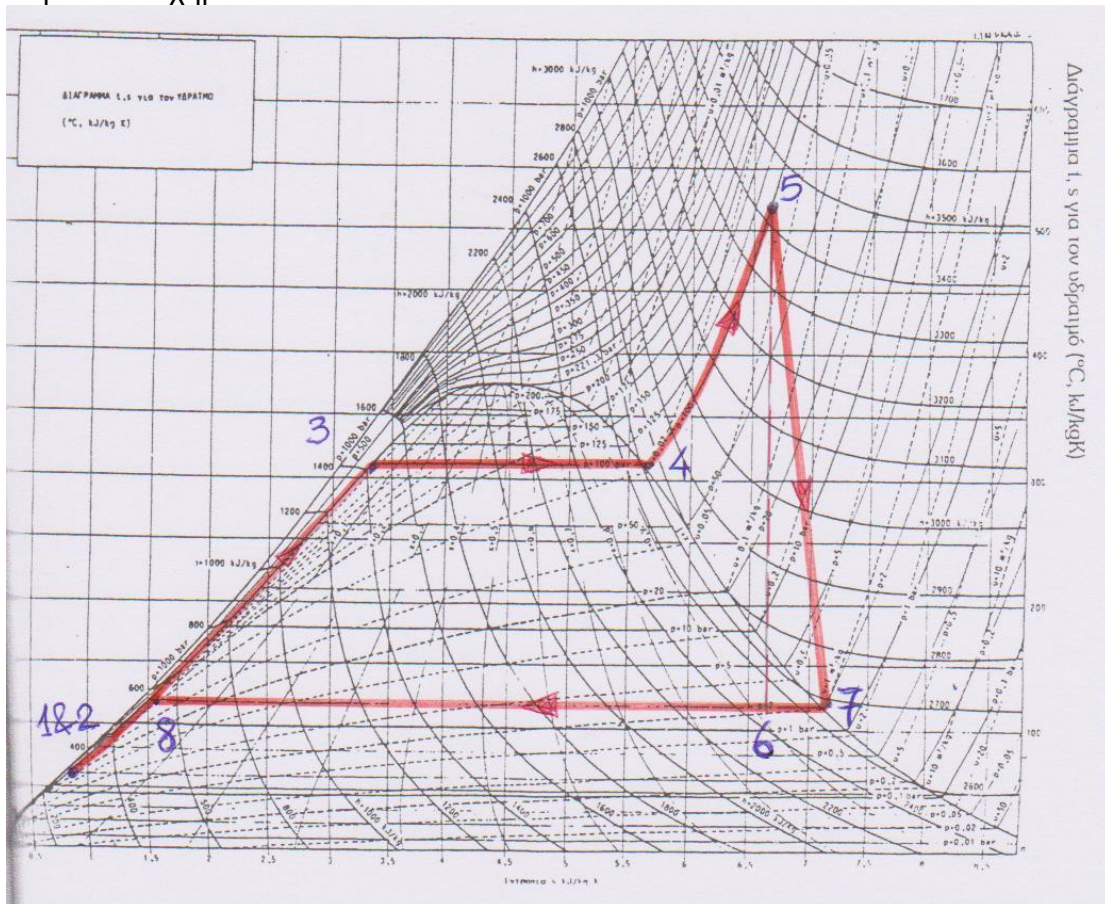
Βαθμός απόδοσης λέβητα σε σχέση με την ΑΘΔ του καυσίμου 85%.

Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου = 0,80

Βαθμός απόδοσης μετατροπής του έργου του στροβίλου σε ηλεκτρισμό 0,95.
 Βαθμός απόδοσης της αντλίας τροφοδοσίας =0,75
 Η έξοδος του ατμοστροβίλου οδηγείται σε μια θερμική διεργασία ξήρανσης χαρτοπολλτού από όπου εξέρχεται ως κορεσμένο συμπύκνωμα σε πίεση 2 bar. Στη συνέχεια ψύχεται με τη βοήθεια πύργου ψύξης σε θερμοκρασία 70°C. Τέλος το συμπύκνωμα τροφοδοτείται από την αντλία στον λέβητα σε πίεση 100 bar όπου επαναλαμβάνει τον κύκλο ατμοποίησης.
 Να υπολογιστούν τα τεχνικά έργα του στροβίλου, της αντλίας, οι ενέργειες που προσδίδονται ή αφαιρούνται με τη μορφή θερμότητας και ο θερμικός και ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της κυκλικής διεργασίας.

Υπολογισμοί.

Γενικά βοηθάει στην κατανόηση της κυκλικής διεργασίας η παράστασή της σε διάγραμμα θερμοκρασίας -εντροπίας T/s. Η παράσταση αυτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 9.1.



Σχήμα 9.1. Η κυκλική διεργασία του παραδείγματος 1.

Στην έξοδο του πύργου ψύξης –σημείο 1- η ενθαλπία του νερού είναι περίπου 292 kJ/kg -βλέπε σχήμα 9.1.
 Η αντλία παίρνει το νερό και το ανεβάζει στα 100bar. Αν υποθέσουμε ότι αυτή η συμπίεση είναι ισεντροπική –τέλεια- τότε μετά την συμπίεση το νερό θα έχει ίδια εντροπία με πρίν. Από το σχήμα 1 η εντροπία πριν την αντλία είναι 0,95 kJ/kg°K.

Ίδια εντροπία θα έχει υπό ιδανικές συνθήκες το νερό και μετά την αντλία. Από τον πίνακα VI βρίσκουμε με γραμμική παρεμβολή ότι στην κατάσταση αυτή (100bar/0,95 kJ/kg^oK) η ενθαλπία του νερού είναι περίπου 300,9 kJ/kg.

Άρα το έργο που προσδίδεται από την αντλία στο νερό είναι:

$$(300,9 - 292)/0,75 = 11,8 \text{ kJ/kg}$$

Επομένως το νερό πριν την είσοδό του στον λέβητα –σημείο 2- έχει ενθαλπία:

$$292 + 11,8 = 303,8 \text{ kJ/kg.}$$

Πάλι από τον πίνακα VI βρίσκουμε την πραγματική θερμοκρασία και εντροπία του νερού στην κατάσταση 2.

Ο λέβητας και ο υπερθερμαντήρας θερμαίνει το νερό και στην έξοδό του –σημείο 5- έχουμε υπέρθερμο ατμό. Στην έξοδο του λέβητα –σημείο 5- η ενθαλπία του μέσου είναι –πίνακας VI – 3451,1 kJ/kg.

Άρα από το λέβητα προσδίδεται θερμότητα

$$3451,1 - 303,8 = 3147,3 \text{ kJ/kg.}$$

Επομένως το καύσιμο το οποίο χρησιμοποιήθηκε στον λέβητα είναι

$$3147,3/0,85 = 3702 \text{ kJ/kg.}$$

Στην κατάσταση αυτή -έξοδος από τον υπερθερμαντήρα- η εντροπία είναι 6,6950 kJ/kg^oK. Με ισεντροπική εκτόνωση μέσω του στρόβιλου στην πίεση 2 bar φθάνουμε σε κατάσταση υγρού ατμού.

Στην κατάσταση αυτή -σημείο 6-πρέπει να βρούμε την ενθαλπία. Χρησιμοποιώντας προσεγγιστικά το διάγραμμα Ts βρίσκουμε ότι

$$h_6 = 2480 \text{ kJ/kg}$$

Επομένως το τεχνικό έργο που αποδίδει η ισεντροπική –τέλεια- εκτόνωση είναι 3451-2480 = 971 kJ/kg.

Επειδή όμως ο στρόβιλος έχει ισεντροπικό βαθμό απόδοσης 0,80 τελικά αποδίδεται έργο 971*0,8 = 776,8 kJ/kg

Επομένως η πραγματική ενθαλπία μετά τον στρόβιλο –σημείο 6- είναι

$$3451,1 - 776,8 = 2674,3 \text{ kJ/kg.}$$

Το σημείο αυτό βρίσκεται οριακά στην περιοχή του υγρού/ ατμού. Το περιεχόμενό του σε ατμό είναι:

$$X_6 = (h_6 - h_6') / (h_6'' - h_6') = (2674,3 - 504,52) / (2704,6 - 504,52) = 0,98$$

Μετά την έξοδο του εργαζόμενου μέσου από τον στρόβιλο αυτό οδηγείται στο ξηραντήριο όπου αποδίδει τμήμα της θερμότητάς του μέχρις ότου συμπυκνωθεί σε κορεσμένο νερό πίεσης 2 bar. Η θερμότητα που αποδίδεται από το εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιείται στη διαδικασία της ξήρανσης του χαρτοπολλτού.

Στην κατάσταση εξόδου από το ξηραντήριο το εργαζόμενο μέσο είναι κορεσμένο νερό πίεσης 2 bar. Άρα έχει ενθαλπία 504,52 kJ/kg. Επομένως αποδίδει στην ξήρανση 2674,3 - 504,52 = 2169,78 kJ/kg.

Στην συνέχεια το εργαζόμενο μέσο οδηγείται στον πύργο ψύξης όπου ψύχεται σε θερμοκρασία 70°C. Στη θερμοκρασία αυτή και σε πίεση 2 bar η ενθαλπία του μέσου είναι 292,9 kJ/kg. Άρα από τον πύργο ψύξης απορρίπτεται στο περιβάλλον θερμότητα ίση με $504,52 - 292,9 = 211,6$ kJ/kg.

Αν δούμε τον συνολικό βαθμό απόδοσης του κύκλου μας τώρα έχουμε:

Η ηλεκτρική ενέργεια που αποδίδεται από τη διεργασία είναι

$$776,8 \cdot 0,95 - 11,8 = 726,16 \text{ kJ/kg.}$$

Η θερμότητα που αξιοποιείται ωφέλιμα από την διεργασία είναι αυτή που αποδίδεται στο ξηραντήριο του χαρτοπολτού την οποία αν δεν την αξιοποιούσαμε από τον κύκλο μας θα έπρεπε να την παράγουμε με πρόσθετη καύση καυσίμου σε κάποιον λέβητα με υποθετικό βαθμό απόδοσης π.χ. 90%.

Άρα λοιπόν το πρωτογενές κάυσιμο που εξοικονομείται από την διεργασία μας είναι

$$2169,78 / 0,90 = 2410,8 \text{ kJ/kg}$$

Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε την ορολογία θερμικός και ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης. Για το παράδειγμά μας ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι:

$$726,16 / 3702 = 0,196 = 19,6\%.$$

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης της διεργασίας είναι $2169 / 3702 = 0,585 = 58,5\%$

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης (ηλεκτρικός και θερμικός μαζί) είναι:

$$(726 + 2169) / 3702 = 0,782 = 78,2 \%$$

Βλέπουμε λοιπόν ότι η ωφέλιμη αξιοποίηση της παραγόμενης από τον κύκλο Ράνκιν θερμότητας αύξησε σημαντικά το βαθμό αξιοποίησης του καυσίμου του λέβητα. Αυτό επιτεύχθηκε με την Συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας ή καλύτερα με την Αξιοποίηση της θερμότητας που περισεύει κατά την μετατροπή της σε ηλεκτρισμό.

Στην πράξη έχει καθιερωθεί, αν και δεν είναι δόκιμος, ο ορισμός Συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Η συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις περιπτώσεις θερμικών κύκλων μετατροπής της θερμότητας σε έργο και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Έτσι έχουμε συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας σε κινητήρες εσωτερικής καύσης όπου αξιοποιούμε ωφέλιμα τη θερμότητα του νερού ψύξης των χιτωνίων -π.χ. θέρμανση του αυτοκινήτου- ή τη θερμότητα των καυσαερίων του κινητήρα ψύχοντάς τα. Επίσης μπορούμε να έχουμε συμπαραγωγή όταν ψύχουμε τα καυσαέρια αεριοστροβίλων ή άλλων θερμικών μηχανών παραγωγής έργου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Katsanevakis A., Tsaliki, P., International oil prices and production cost of the Greek industry, 9th Int. Conference on Entrepreneurship, Competitiveness and Growth in South-East Europe, Univ. of Macedonia, Greece, Sep 2004.
- [2] Fuel cell fundamentals, Ryan O'Hayre et all, ISBN 0-471-74148-5, Willey, 2006.
- [3] Fuel cell systems explained, James Larminie, Andrew Dicks, Willey, 2006.
- [4] D. Chisholm, TWO-PHASE FLOW IN PIPELINES AND EXCHANGERS, The institution of Chemical Engineers, 1983.
- [5] Steam 97, software from Linhoff-March Ltd.
- [7] Hans Dieter Baehr, ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ, μετάφραση Κ. Πάττα, 1980.
- [8] Adrian Bejan, George Tsatsaronis, Michael Moran, THERMAL DESIGN AND OPTIMIZATION, John Wiley And Sons, INC, 1996.
- [9] Κωνσταντίνου Χ. ΛΕΦΑ, ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΟΥ ΥΔΡΑΤΜΟΥ, Έκδοση Τ.Ε.Ε., 1994 ΤΟΜΟΣ Α και Β.
- [11] VDI-Wärmeatlas, μετάφραση Κ. Πάττα.
- [12] Μετάδοση Θερμότητας, Κ. Πασπαλάς.
- [14] Robert S. Brodkey, Harry C. Hershey, TRANSPORT PHENOMENA, Mcgraw-hill international editions, 1988.
- [15] Suhas V. Patankar, NUMERICAL HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW, Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
- [16] Peter Bradshaw, Tuncer Cebeci, James H. Whitelaw, ENGINEERING CALCULATION METHODS FOR TURBULENT FLOW, Academic Press, 1981.
- [17] Gary L. Borman, Kenneth W. Ragland, COMBUSTION ENGINEERING, McGraw-Hill international editions, 2000.
- [18] www.cd-adapco.com
- [19] Afgan, Schlünder, Heat transfer, Mc-Graw Hill, 1981.
- [20] Strömungsmaschinen, Aufbau und Wirkungsweise, Willi Bohl, Vogel Buchverlag, 1982.
- [21] ISO EN 12953.

[22] ΤΟΤΕΕ , 2481/86, Εγκαταστάσεις σε κτίρια, διανομή ατμού μέχρι PN 16-300oC, Τ.Ε.Ε., 1989.

[23] Εγχειρίδιο της SPIRAX SARCO για τη διανομή ατμού.

ΣΥΜΒΟΛΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο παράρτημα παρατίθενται πίνακες, διαγράμματα και στοιχεία υπολογισμού τα οποία είναι χρήσιμα για την εφαρμογή των μεθόδων οι οποίες αναπτύχθηκαν στα κεφάλαια του βιβλίου.

Στο παράρτημα περιλαμβάνονται:

1. Οι μετατροπές μονάδων
2. Τα σχεδιαστικά σύμβολα που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση των συσκευών στα συστήματα παραγωγής έργου με θερμικούς κύκλους.
3. Οι πίνακες ατμών
4. Οι πίνακες με τα βασικά στοιχεία των φυσικών μεγεθών των αερίων καύσης.
5. Το εγχειρίδιο χρήσης της πειραματικής συσκευής του εργαστηρίου. Το εγχειρίδιο αυτό είναι μία πολύ καλή εισαγωγή στη χρήση της αγγλικής ορολογίας στον τομέα αυτό καθώς επίσης περιλαμβάνει πολύ καλές ασκήσεις ισοζυγίων θερμότητας σε κύκλους παραγωγής έργου.
6. Παράδειγμα από τμήματα φύλλων ελέγχου ποιότητας ατμολέβητα.
7. Πίνακας με τυποποιημένες διαστάσεις σωλήνων για δίκτυα ατμού, (TOTEE).

Η μελέτη των στοιχείων του παραρτήματος είναι απαραίτητη για την ολοκληρωμένη κατανόηση και εμπέδωση των στοιχείων των σημειώσεων αυτών.

Τέλος

