

.....Πρόλογος.....

Το παρόν εγχειρίδιο έχει στόχο την επαγγελματική επιμόρφωση. Η τελευταία διαφέρει από την ακαδημαϊκή εκπαίδευση, στο ότι πρέπει στο μικρότερο δυνατό χρόνο να αποδώσει «χειροπιαστά» οφέλη. Ο επιμορφωθείς πρέπει να πάει στη δουλειά του και να εφαρμόσει αμέσως, τουλάχιστον κάποια από αυτά που έμαθε. Ο χρόνος που του διατίθεται για την επιμόρφωση είναι ελάχιστος και συχνά εις βάρος του ελεύθερου χρόνου. Το χαρακτηριστικό αυτό της επιμόρφωσης αποτελεί και τη μεγάλη πρόκληση για τον εκπαιδευτή ή το συγγραφέα επιμορφωτικού υλικού: Πως μπορείς σε τόσο λίγο χρόνο ή σελίδες να μεταδώσεις τέτοια βαθιά αντικείμενα, όπως οι αρχές της Θερμοδυναμικής, της μεταφοράς θερμότητας και της ροής των ρευστών, που λογικά απαιτούν χρόνια και χρόνια σπουδών για να γίνουν κατανοητά σε βάθος; Ευτυχώς, κατά την επαγγελματική μου διαδρομή, υπήρξα σε αυτό το τομέα τυχερός. Έχοντας τελειώσει Πολιτικός Μηχανικός, οδηγήθηκα σχεδόν απρόβλεπτα να διοικήσω την οικογενειακή επιχείρηση που αφορούσε Ψυχρή Αποθήκευση. Οι βασική μου υποδομή στη Φυσική, με βοήθησε να ξεκινήσω τη μελέτη των εξειδικευμένων εγχειριδίων του κλάδου αυτού και να προχωρήσω σχετικά γρήγορα στο «δια ταύτα», δηλαδή πώς να διατηρείς και να λειτουργείς ορθά ένα συγκρότημα Βιομηχανικής Ψύξης. Η προσπάθεια αυτή, σε συνδυασμό με την εμπειρία 30 ετών, μου έδωσαν το θάρρος να κάνω την παρούσα απόπειρα, ώστε να βοηθήσω όσο μπορώ στο τομέα που εξειδικεύτηκα επαγγελματικά.

Η Ελλάδα περνάει δύσκολα χρόνια. Η «αποβιομηχάνιση», το ξένο χρήμα, το δημόσιο χρέος, η επιδίωξη του εύκολου κέρδους και η έλλειψη ορμητικότητας, μας φέρνει σήμερα σε δύσκολη θέση στο στίβο της παγκόσμιας οικονομίας, με «φτωχή» γκάμα εθνικών προϊόντων και υπηρεσιών. Όλοι καλούμαστε να προσφέρουμε ιδέες για επαναφορά της ανταγωνιστικότητας, με σχεδιασμό καινοτομικών προϊόντων και υπηρεσιών, που να γίνουν περιζήτητα. Η προσωπική μου άποψη, είναι ότι η Βιομηχανική Ψύξη κατέχει πρωτοπόρα θέση για την Ελληνική οικονομία του αύριο. Τα τρόφιμα και ο τουρισμός, που αναμφισβήτητα αποτελούν «εθνικά» προϊόντα (και κατά κάποιο τρόπο μονοπωλιακά λόγω του κλίματος), πλαισιώνονται από μια εκτεταμένη ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα, με όλες τις δυσκολίες σχεδιασμού και εφαρμογής. Έτσι, πιστεύω ότι η οικονομία του «αύριο» θα ζητήσει στελέχη με γνώσεις Βιομηχανικής Ψύξης και όποιος τις έχει θα κερδίσει. Η παγκόσμια πίεση για κατάργηση των συνθετικών ψυκτικών ρευστών θέτει ακόμα μια πρόκληση στη Βιομηχανική Ψύξη: Τη γνώση σχεδιασμού και λειτουργίας συγκροτημάτων με *φυσικά ψυκτικά αέρια*, τουτέστιν αμμωνία και διοξείδιο του άνθρακα. Όσοι πιστοί προσέλθετε...

Στο παρόν, ακολούθησα την πρακτική της προσπάθειας του γρήγορου αποτελέσματος με το λιγότερο κόπο, που αποτελεί όπως ανέφερα το χαρακτηριστικό της επαγγελματικής επιμόρφωσης. Δεν ασχολούμαι ξεκινώντας από το «άλφα», γιατί κάτι τέτοιο θα απαιτούσε τόμους. Αντίθετα, θεωρώ δεδομένο ότι ο αναγνώστης έχει ένα βασικό επίπεδο σε γνώσεις θερμότητας (που διδάσκονται σε Γυμνάσιο – Λύκειο) και μπαίνω κατευθείαν σε βασικά θέματα, που αφορούν τις αρχές Βιομηχανικής Ψύξης. Είμαι σχεδόν σίγουρος, ότι ο οποιοσδήποτε κατέχει αυτή τη βασική υποδομή, θα παρακολουθήσει άνετα το γραπτό. Ιδιαίτερη έμφαση δίνω σε αριθμητικές – ρεαλιστικές εφαρμογές, ώστε να γίνεται άμεσα κατανοητή η ωφελιμότητα της θεωρίας. Όπου έκρινα απαραίτητο, επεκτάθηκα λίγο περισσότερο, όπως για παράδειγμα στην έννοια της εντροπίας, στον εναλλάκτη και στο διβάθμιο σύστημα συμπίεσης.

Το εγχειρίδιο χωρίζεται σε τρεις ενότητες. Στη πρώτη γίνεται γενική ανασκόπηση όλων των θερμοδυναμικών εννοιών που αφορούν τη Βιομηχανική Ψύξη. Εξετάζονται οι βασικότεροι ψυκτικοί κύκλοι, που είναι ο κύκλος Carnot, ο πρότυπος κύκλος συμπίεσης ατμού και ο πραγματικός ψυκτικός κύκλος. Παράλληλα, παρουσιάζεται η λογική και ο τρόπος χρήσης των διαγραμμάτων πίεσης – ενθαλπίας (Mollier) και των πινάκων κορεσμένων ψυκτικών ρευστών. Ο μελετητής και λειτουργός των συστημάτων Βιομηχανικής Ψύξης, σε τελευταία ανάλυση ενδιαφέρεται για την αποδοτικότητα της εγκατάστασης, ώστε το (ψυκτικό) αποτέλεσμα να συνοδεύεται με βελτιστοποίηση της κερδοφορίας. Η απαίτηση αυτή αποτυπώνεται από το συντελεστή απόδοσης (C.O.P.), στον οποίο γίνεται εκτεταμένη αναφορά. Η δεύτερη ενότητα αποτελεί κατά κάποιο τρόπο εμπέδωση της πρώτης ενότητας στα βασικότερα σημεία της, όπως ο κύκλος Carnot, ο πρότυπος κύκλος συμπίεσης ατμού και τα διβάθμια συστήματα και οι ιδιαιτερότητές τους, όπως η απομάκρυνση του flash gas και η ενδιάμεση ψύξη του υπέρθερμου ατμού κατάθλιψης χαμηλής βαθμίδας. Σε κάθε ενότητα, παρουσιάζεται η βασική θεωρία και ακολουθούν αντιπροσωπευτικές εφαρμογές, με έμφαση στα πλεονεκτήματα της αμμωνίας. Ο αναγνώστης μπορεί να εντοπίσει εδώ μια επαναληπτικότητα σε σχέση με τη πρώτη ενότητα, αλλά είπαμε, «εμπέδωση». Η Τρίτη ενότητα αποτελεί μια εξειδικευμένη εμπέδωση: Πραγματεύεται αποκλειστικά τη διβάθμια συμπίεση, τα οφέλη και τους τρόπους βελτίωσης της απόδοσης, με βασική θεωρία και εφαρμογές. Έδωσα ιδιαίτερη έμφαση στο θέμα αυτό, διότι πιστεύω ότι είναι άκρως απαραίτητη γνώση πριν την απόφαση της επιλογής των συμπιεστών, που αποτελούν τον ακριβότερο εξοπλισμό, από άποψη αγοράς και λειτουργίας.

Το παρόν εγχειρίδιο έχει στόχο να προσφέρει τις βασικές αρχές, που πρέπει να γνωρίζει οποιοσδήποτε σχεδιάζει, επιλέγει ή λειτουργεί ένα συγκρότημα Βιομηχανικής Ψύξης. Πρόκειται για μια ακριβή επένδυση, που πρέπει να γίνεται υπό το πρίσμα της γνώσης. Μια σύγχρονη μονάδα ψυχρής αποθήκευσης καταναλώνει περίπου 50 kWh ανά κυβικό μέτρο και χρόνο (μια παλιά μονάδα τα διπλάσια). Δηλαδή η ετήσια κατανάλωση μιας μονάδας 100.000 κ.μ. (μέτριο

μέγεθος) είναι 5.000.000 kWh. Με τρέχον κόστος ηλεκτρικής ενέργειας 0,1 €/kwh, τούτο μεταφράζεται σε 500.000 € το χρόνο. Μια μόλις κατά 10% μειωμένη απόδοση από λάθος σχεδιασμό ή λειτουργία, μεταφράζεται σε 50.000 € το χρόνο χαμένα λεφτά. Και τούτο για 15 – 20 χρόνια, που είναι ο κύκλος ζωής μιας τέτοιας εγκατάστασης. Τα συμπεράσματα δικά σας.

Αθήνα, Μάρτιος 2013

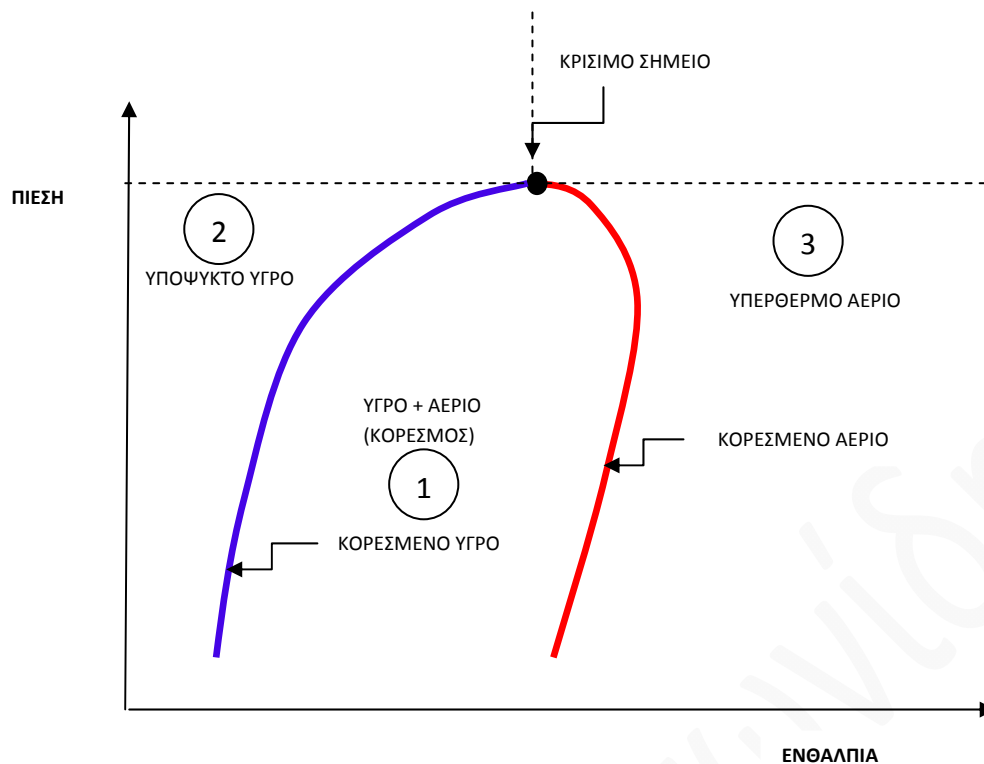
Νίκος Χαριτωνίδης

του από αντλία : Αν η άνοδος της θερμοκρασίας κατά τη διέλευση από την αντλία είναι αμελητέα, το υγρό στην έξοδο της αντλίας έχει αυξημένη πίεση στην ίδια θερμοκρασία, άρα είναι υπόψυκτο (η θερμοκρασία κορεσμού που αντιστοιχεί στη νέα πίεση είναι μεγαλύτερη από τη πραγματική).

6. ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΕΣΗΣ – ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ ΕΝΟΣ ΨΥΚΤΙΚΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ

Το διάγραμμα Πίεσης – Ενθαλπίας ενός ρευστού (γνωστό και σαν διάγραμμα Mollier), είναι πολύ χρήσιμο εργαλείο στην ανάλυση του ψυκτικού κύκλου, διότι :

- Κάθε σημείο του χάρτη αντιπροσωπεύει ένα συνδυασμό φυσικών μεγεθών. Από τις πληροφορίες που σημειώνονται, προσδιορίζονται όλα τα φυσικά μεγέθη που μας ενδιαφέρουν (ενθαλπία, πίεση, θερμοκρασία, εντροπία, ειδικός όγκος).
- Μας δείχνει ξεκάθαρα τις τρεις χαρακτηριστικές περιοχές, που αφορούν το ψυκτικό κύκλο : (1) τη περιοχή του κορεσμού, (2) τη περιοχή του υπέρθερμου ατμού και (3) τη περιοχή του υπόψυκτου υγρού (σχήμα 2).
- Μας δείχνει τη «διαδρομή» που ακολουθεί το ρευστό κατά τις διάφορες διεργασίες στο ψυκτικό κύκλο (συμπύκνωση, συμπύκνωση, εκτόνωση, εξάτμιση).
- Μας βοηθάει να κάνουμε γρήγορους υπολογισμούς, όσον αφορά τις ποσότητες θερμότητας που ρέουν προς και από το σύστημα (το ψυκτικό ρευστό).
- Μας προσφέρει εποπτεία, πώς να βελτιώσουμε την απόδοση του ψυκτικού μας συστήματος.
- Η πίεση, που αποτελεί τη μια από τις δυο συντεταγμένες του διαγράμματος, είναι ένα εύκολα μετρούμενο μέγεθος στη πράξη (μανόμετρα).
- Το διάγραμμα προσφέρει πληθώρα πληροφοριών στη περιοχή του υπέρθερμου ατμού, όπως θα δούμε παρακάτω, που δεν υπάρχουν στους πίνακες των αερίων.



Σχήμα 2 : Διάγραμμα Πίεσης – Ενθαλπίας Ψυκτικού Αερίου

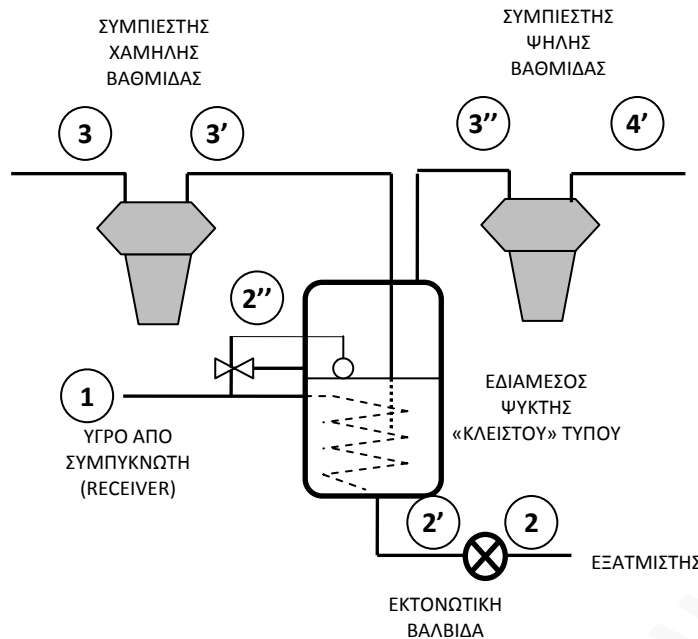
Στο σχήμα 2 φαίνεται ένα τυπικό διάγραμμα Πίεσης – Ενθαλπίας ενός ψυκτικού ρευστού. Τα χαρακτηριστικά του διαγράμματος είναι :

- Τα σημεία που βρίσκονται επί της καμπύλης είναι σε κατάσταση κορεσμού.
- Το ανώτατο σημείο της καμπύλης ονομάζεται «κρίσιμο σημείο». Στο σημείο αυτό, υπάρχει «οριακή κατάσταση», όπου το ρευστό είναι σε κατάσταση κορεσμού, αλλά δεν είναι διακριτή η υγρή από την αέριο μορφή. Στο κρίσιμο σημείο αντιστοιχεί μια θερμοκρασία κορεσμού, που ονομάζεται κρίσιμη θερμοκρασία. Είναι αδύνατη η υγροποίηση του ρευστού, αν έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία από τη κρίσιμη. Για παράδειγμα, η κρίσιμη θερμοκρασία της αμμωνίας είναι 132° C και του διοξειδίου του άνθρακα (R-744) 31° C.
- Τα σημεία που βρίσκονται επί του τμήματος της καμπύλης αριστερά από το κρίσιμο σημείο παριστάνουν το υγρό σε κατάσταση κορεσμού (100% κορεσμένο υγρό).
- Τα σημεία που βρίσκονται του τμήματος της καμπύλης δεξιά από το κρίσιμο σημείο παριστάνουν το αέριο σε κατάσταση κορεσμού (100% κορεσμένο αέριο).
- Τα σημεία που βρίσκονται στο εσωτερικό της καμπύλης παριστάνουν καταστάσεις, όπου συνυπάρχει υγρό και αέριο σε κατάσταση κορεσμού. Όσο πιο αριστερά είναι το σημείο, τόσο μεγαλύτερη είναι η αναλογία σε υγρό (περιοχή 1).

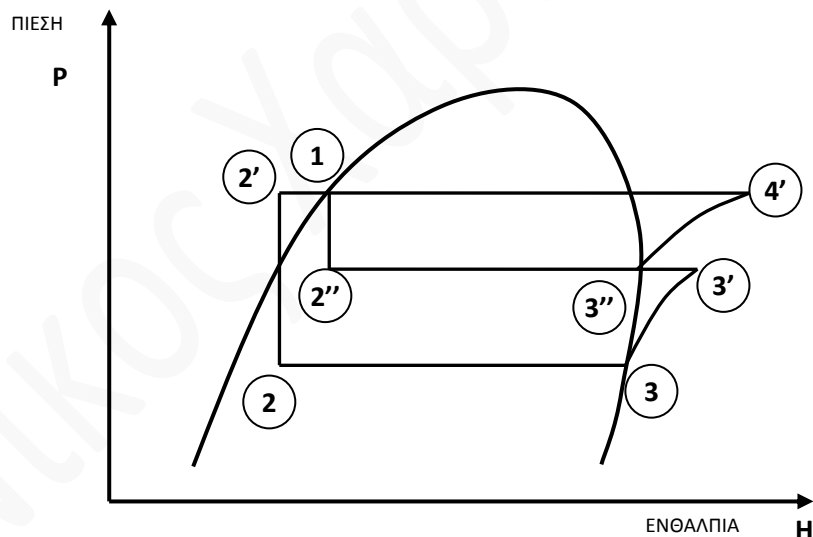
Η μεθοδολογία απομάκρυνσης του flash gas έχει και κάποια μειονεκτήματα : Το υγρό ψηλής πίεσης εκτονώνεται στην ενδιάμεση πίεση, πριν ξεκινήσει τη διαδρομή του για τους εξατμιστές και έτσι κατά κάποιο τρόπο «χάνει δύναμη». Αν οι διαδρομές είναι μεγάλες ή σε σημαντική ανωφέρεια, υπάρχουν σημαντικές πτώσεις πίεσης, που μπορεί να καταστήσουν δύσκολη τη διέλευση του ρευστού από τη κύρια εκτονωτική βαλβίδα του εξατμιστή (δεν έχει «δύναμη»). Επίσης, επειδή η θερμοκρασία κορεσμού, που αντιστοιχεί στην ενδιάμεση πίεση, είναι συνήθως μικρότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, το (κορεσμένο - παγωμένο) υγρό «κερδίζει» θερμότητα κατά τη διαδρομή, πράγμα που το οδηγεί σε εξάτμιση πριν την είσοδό του στον εξατμιστή. Τούτο καθιστά απαραίτητη τη μόνωση των γραμμών τροφοδοσίας (πράγμα που αυξάνει το αρχικό κόστος. **Βλέπε σχετική εφαρμογή 1.**

4.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΨΥΞΗΣ ΥΓΡΟΥ ΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (ΔΟΧΕΙΟ ΕΝΔΙΑΜΕΣΗΣ ΨΥΞΗΣ «ΚΛΕΙΣΤΟΥ» ΤΥΠΟΥ)

Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, η κατευθείαν μείωση της πίεσης του υγρού ψηλής πίεσης στην ενδιάμεση πίεση κορεσμού, έχει το μειονέκτημα ότι το υγρό «χάνει τη δύναμή του», ειδικά όταν υπάρχουν μεγάλες διαδρομές προς τους εξατμιστές. Μια μέθοδος έμμεσης απομάκρυνσης του flash gas, χωρίς να μειωθεί η πίεση του υγρού, είναι η διέλευσή του σε κλειστό κύκλωμα μέσα από «λουτρό» κορεσμένου υγρού ενδιάμεσης πίεσης. Έτσι, το υγρό διατηρεί τη πίεσή του, αλλά σύγχρονα ψύχεται. Με άλλα λόγια, γίνεται υπόψυκτο. Κατά την υπόψυξη, αφαιρείται θερμότητα από το υγρό ψηλής πίεσης, η οποία με τη σειρά της προκαλεί εξάτμιση μιας ποσότητας υγρού του «λουτρού». Ο ατμός αυτός που προκύπτει, είναι μια μορφή flash gas και οδηγείται κατευθείαν στο συμπιεστή. Η διάταξη υπόψυξης του υγρού ψηλής πίεσης μέσα από «κλειστό» ενδιάμεσο ψύκτη, καθώς και το αντίστοιχο διάγραμμα πίεσης – ενθαλπίας, φαίνονται στα επόμενα σχήματα, όπου φαίνεται και η διεργασία της ενδιάμεσης ψύξης, που θα αναλυθεί περισσότερο στα επόμενα :



Σχήμα 8 : Διάταξη υπόψυξης υγρού ψηλής πίεσης σε ενδιάμεσο ψύκτη «κλειστού» τύπου.



Σχήμα 9 : Αναπαράσταση σε διάγραμμα πίεσης – ενθαλπίας της διάταξης υπόψυξης υγρού ψηλής πίεσης σε ενδιάμεσο ψύκτη «κλειστού» τύπου σχήματος 8.

Μερικές παρατηρήσεις επί του σχήματος 8 είναι οι εξής :

- Το υγρό ψηλής πίεσης διέρχεται μέσα από ένα εναλλάκτη, που είναι βυθισμένος σε «λουτρό» κορεσμένου υγρού ενδιάμεσης πίεσης. Η αφαιρούμενη θερμότητα αναγκάζει μια ποσότητα του

υγρού του «λουτρού» να εξατμιστεί. Ο ατμός αυτός προστίθεται στην αναρρόφηση του συμπιεστή ψηλής βαθμίδας.

- Η ενδιάμεση πίεση διατηρείται από το συμπιεστή ψηλής βαθμίδας.
- Η κατάθλιψη του συμπιεστή χαμηλής βαθμίδας βυθίζεται μέσα στο «λουτρό» του κορεσμένου υγρού. Έτσι, οι υπέρθερμοι ατμοί ψύχονται μέχρι του σημείου κορεσμού (θεωρητικά). Φυσικά, τούτο σημαίνει ότι η αφαιρούμενη θερμότητα αναγκάζει μια ποσότητα του υγρού του «λουτρού» να εξατμιστεί. Ο ατμός αυτός προστίθεται στην αναρρόφηση του συμπιεστή υψηλής. Η βύθιση του στομίου εξαγωγής της κατάθλιψης χαμηλής εντός του λουτρού πρέπει να είναι 0,6 – 1,2 μ., πράγμα που δημιουργεί μια αντίσταση λόγω της υδροστατικής πίεσης (αντίθλιψη) και μια εκ τούτης αύξηση της ενέργειας στο συμπιεστή χαμηλής. Επίσης, ο «αναβρασμός» που δημιουργείται (παφλασμός), δυσκολεύει το έργο διαχωρισμού υγρού – αερίου στον ενδιάμεσο ψύκτη (αύξηση κινδύνου εισόδου υγρού στο συμπιεστή υψηλής).
- Τελικά, ο συμπιεστής ψηλής, έχει καθήκον συμπίεσης του αθροίσματος των εξής ποσοτήτων: (1) του ατμού που προκύπτει από τη συμπίεση χαμηλής, (2) τη ποσότητα που εξατμίστηκε κατά την υπόψυξη του υγρού ψηλής πίεσης και (3) τη ποσότητα που εξατμίστηκε λόγω της ενδιάμεσης ψύξης του υπέρθερμου ατμού που προέρχεται από τη χαμηλή συμπίεση.

Είναι φανερό, ότι η μέθοδος υπόψυξης υγρού ψηλής πίεσης σε ενδιάμεσο ψύκτη κλειστού τύπου, έχει το μειονέκτημα ότι το υγρό είναι αδύνατον να ψυχθεί μέχρι τη θερμοκρασία κορεσμού της ενδιάμεσης ψύξης, αφού πρέπει πάντα να υπάρχει μια διαφορά θερμοκρασίας (ΔT), για να ρέει η θερμότητα. Η επιτευχθείσα θερμοκρασία είναι συνήθως 10 K παραπάνω από τη θερμοκρασία του λουτρού (3). Ο υπολογισμός της επιφάνειας του «βυθισμένου» εναλλάκτη είναι ένα θέμα κάπως περίπλοκο, ειδικά στο καθορισμό του συνολικού συντελεστή θερμικής μεταφοράς U . Μια απλή μέθοδος υπολογισμού, είναι η εμπάπτιση 2,5 τ.μ. εναλλάκτη, ανά 100 KW ψυκτικής ικανότητας στον εξατμιστή (1).

4.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΗΣ ΕΝΔΙΑΜΕΣΗΣ ΨΥΞΗΣ

Στα προηγούμενα, αναλύσαμε τα οφέλη, όταν απομακρύνεται το flash gas σε μια ενδιάμεση (βέλτιστη) πίεση. Θεωρήσαμε μάλιστα, ότι διατίθεται ιδιαίτερος συμπιεστής για το καθήκον αυτό, ενώ ο κύριος συμπιεστής εκτελεί μονοβάθμια συμπίεση (σχήμα 5). Δεχθήκαμε επίσης την ύπαρξη του δοχείου διαχωρισμού, εντός του οποίου επικρατούν συνθήκες κορεσμού, σε μια ενδιάμεση πίεση, που διαμορφώνεται από το συμπιεστή απομάκρυνσης του flash gas. Στη πράξη, συνήθως δεν γίνεται έτσι. Η απομάκρυνση του flash gas συνδυάζεται με τη διβάθμια συμπίεση. Δεν υπάρχει συμπιεστής με αποκλειστικό καθήκον την απομάκρυνση του flash gas, αλλά συμπιεστής 2^{ης} βαθμίδας (συμπιεστής ψηλής), ο οποίος «παραλαμβάνει» το αέριο κατάθλιψης της 1^{ης} βαθμίδας και το συμπιέζει σε ακόμα ένα (2^ο) βήμα. Το flash gas

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΡΙΤΗΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ

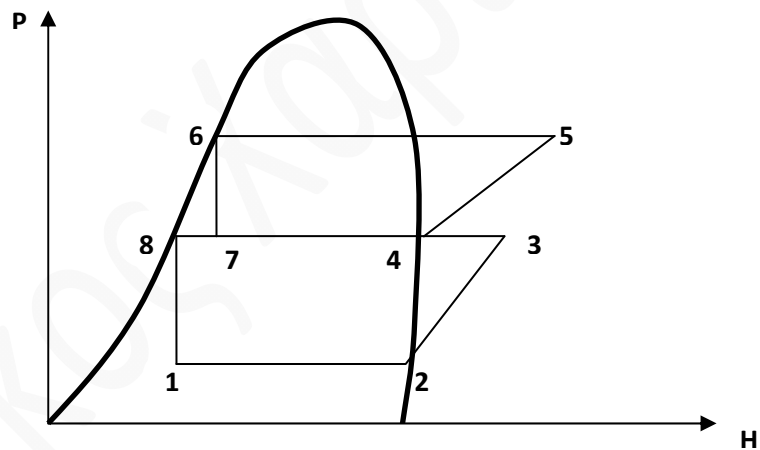
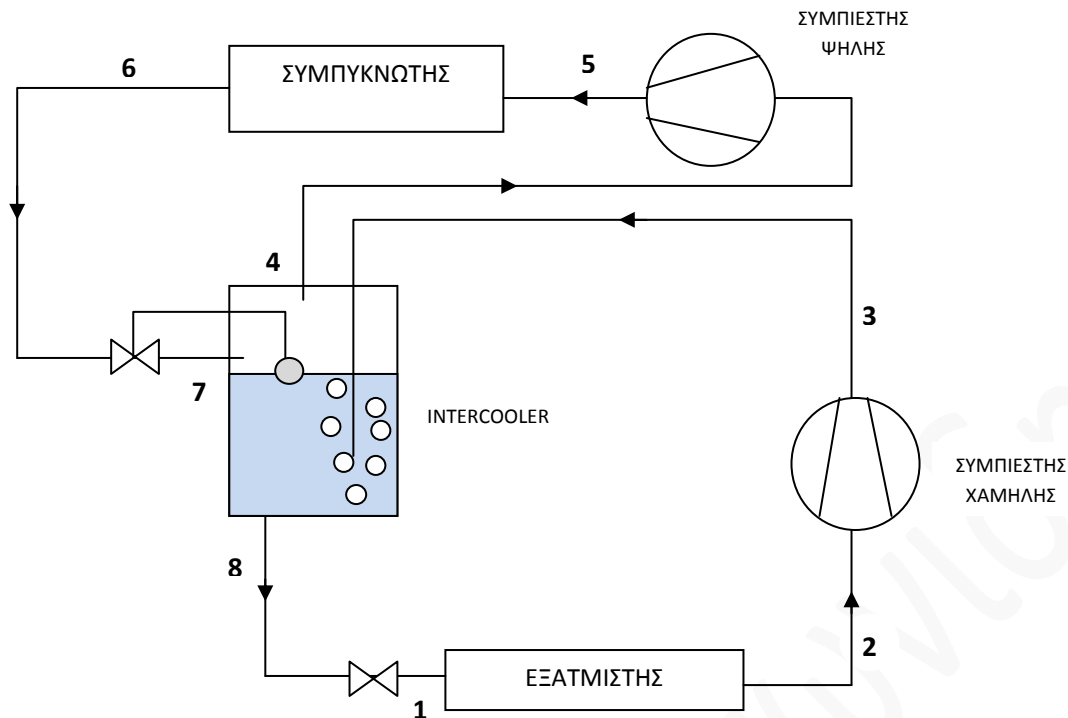
Η απόδοση του ψυκτικού κύκλου πέφτει δραματικά, όσο απομακρύνονται μεταξύ τους οι θερμοκρασίες εξάτμισης – συμπύκνωσης. Αυτό ακριβώς συμβαίνει στις εφαρμογές των βαθιών καταψύξεων, όπου η εξάτμιση μπορεί να είναι στους -40°C και η συμπύκνωση στους 40°C . Αυτό το «χάσμα» των 80 βαθμών, απαιτεί πολύ μεγάλη ποσότητα ενέργειας για να «γεφυρωθεί». Αν επιχειρήσουμε να το κάνουμε μονοβάθμια συμπίεση, θα έχουμε ένα απλούστερο (φθηνότερο) ψυκτικό κύκλωμα, αλλά θα πληρώνουμε υπερβολική ενέργεια και συντήρηση, λόγω υπερβολικής καταπόνησης του συμπιεστή. Η διβάθμια συμπίεση χρησιμοποιείται λόγω της εξοικονόμησης που προσφέρει στη λειτουργία (βελτίωση συντελεστή απόδοσης COP). Από την άλλη πλευρά, μια εγκατάσταση διβάθμιας συμπίεσης απαιτεί πρόσθετους εξοπλισμούς και οδηγεί σε αυξημένο κόστος επένδυσης. Επιπρόσθετα, συχνά είναι τέτοιες οι συνθήκες λειτουργίας, που η μονοβάθμια συμπίεση είναι πρακτικά αδύνατη, όπως π.χ. σε συστήματα κατάψυξης με αμμωνία και εμβολοφόρους συμπιεστές, όπου σε λόγους συμπίεσης μεγαλύτερους του 6, πέφτει η απόδοση σε ανεπίτρεπτα όρια, ενώ η θερμοκρασία κατάθλιψης ανεβαίνει υπερβολικά (μηχανικές φθορές). Από οικονομική άποψη, η απόφαση μονοβάθμιο ή διβάθμιο είναι αποτέλεσμα της αξιολόγησης του κόστους κύκλου ζωής (life cycle cost), όπου το αυξημένο κόστος εγκατάστασης ζυγίζεται έναντι του μειωμένου κόστους λειτουργίας. Στη πράξη, η πρώτη βαθμίδα συνήθως ονομάζεται «χαμηλή», ενώ η δεύτερη βαθμίδα ονομάζεται «ψηλή». Στην ενότητα αυτή επιμένουμε στην ανάλυση της διβάθμιας συμπίεσης, δεδομένου ότι θεωρούμε ότι είναι μια από τις σημαντικότερες αποφάσεις στη φάση σχεδιασμού, που αποτελεί τη «κληρονομιά» της εγκατάστασης. Πάλι, σαν εργαλείο εμπέδωσης θα χρησιμοποιηθούν οι αριθμητικές εφαρμογές.

2. ΕΙΔΗ ΔΙΒΑΘΜΙΑΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

Στη διβάθμια συμπίεση χρησιμοποιείται ένα δοχείο, που ονομάζεται ενδιάμεσος ψύκτης (intercooler). Το δοχείο αυτό επικοινωνεί τον ατμό που προέρχεται από τη κατάθλιψη της χαμηλής, με τον ατμό που προσάγεται στην αναρρόφηση της ψηλής βαθμίδας. Λόγω αυτής της επικοινωνίας, η πίεση κατάθλιψης της χαμηλής είναι ίση με τη πίεση αναρρόφησης της ψηλής και συχνά ορίζεται σαν «ενδιάμεση» πίεση. Ο κύριος προορισμός του ενδιάμεσου ψύκτη, είναι η ψύξη του υπέρθερμου ατμού κατάθλιψης της χαμηλής. Αν δεν γίνει αυτό, θα υπάρξει υπερθέρμανση του συμπιεστή ψηλής και ενδεχόμενη καταστροφή του από αυτό το λόγο. Όπως θα δούμε στα επόμενα, υπάρχουν δυο βασικές κατηγορίες διβάθμιου : (α) με ενδιάμεσο ψύκτη «ανοικτού» τύπου και (β) με ενδιάμεσο ψύκτη «κλειστού τύπου».

3. ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΣ ΨΥΚΤΗΣ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ

Στο σύστημα αυτό, το ψηλής πίεσης ρευστό από το συμπυκνωτή διοχετεύεται στον ενδιάμεσο ψύκτη (intercooler), όπου διατηρείται η ενδιάμεση πίεση του διβαθμίου συστήματος. Εντός του ενδιάμεσου ψύκτη, υπάρχει μίγμα υγρού – αερίου στη πίεση – θερμοκρασία κορεσμού της ενδιάμεσης πίεσης. Από το κάτω μέρος του ενδιάμεσου ψύκτη (υγρό), το ψυκτικό ρευστό διοχετεύεται προς την εκτονωτική βαλβίδα του ψυκτικού θαλάμου (ή το δοχείο διαχωρισμού υγρού – αερίου σε συστήματα υπερπλήρωσης με αντλία). Στην έξοδο του θαλάμου (ή στο επάνω μέρος του δοχείου διαχωρισμού υγρού – αερίου σε συστήματα υπερπλήρωσης με αντλία), το αέριο παραλαμβάνεται από το συμπιεστή χαμηλής, ο οποίος το συμπιέζει μέχρι την ενδιάμεση πίεση και το καταθλίβει εντός του intercooler, με εμβαπτισμό του υπέρθερμου αερίου εντός του «παγωμένου» υγρού (παφλασμός). Έτσι, το αέριο ψύχεται (θεωρητικά) μέχρι τη θερμοκρασία κορεσμού της ενδιάμεσης πίεσης (υπό σταθερά πίεση) και κατόπιν παραλαμβάνεται από το συμπιεστή ψηλής, ο οποίος το στέλνει υπέρθερμο στο συμπυκνωτή προς υγροποίηση κ.ο.κ. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται σχηματικά το διβάθμιο σύστημα με intercooler ανοικτού τύπου, μαζί με το αντίστοιχο διάγραμμα Mollier.



4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΒΑΘΜΙΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΜΕ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟ ΨΥΚΤΗ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ

Θα ακολουθήσει μια ανάλυση, που θα καταλήξει στο συντελεστή απόδοσης (COP). Στη πορεία, θα έχουμε την ευκαιρία, να συγκρίνουμε τους συντελεστές απόδοσης των διαφόρων εναλλακτικών λύσεων, με το συντελεστή απόδοσης του μονοβάθμιου κύκλου, έτσι ώστε να σταθμίσουμε τα οφέλη των διβάθμιων συστημάτων. Η ανάλυση θα βασιστεί στα ισοζύγια παροχών και ενεργειών σε ένα συγκεκριμένο σημείο του κυκλώματος, που επιλέγεται να είναι ο ενδιάμεσος ψύκτης. Στόχος μας, είναι ο υπολογισμός του COP, ο οποίος ισούται με