

22-11-20

ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΨΥΞΗΣ

Νίκος Χαριτωνίδης, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, Master of Engineering Univ. of Sheffield, Γενικός Διευθυντής ΨΥΓΕΙΑ ΑΛΑΣΚΑ ΑΕΒΤΕ & CRYOLOGIC ΕΕ.

ΓΕΝΙΚΑ

Ο συμπυκνωτής είναι ένα πολύ σημαντικό συστατικό της εγκατάστασης. Ο τύπος που επιλέγεται επηρεάζει την ενεργειακή κατανάλωση και ο προβληματισμός που απασχολεί το χρήστη, όσον αφορά την κατηγορία και το μέγεθος του συμπυκνωτή, είναι η επιρροή του στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, του νερού και του κινδύνου μετάδοσης της νόσου των λεγεωναριών. Ο συμπυκνωτής καλείται να υgroποιεί με ασφάλεια και οικονομία το υπέρθερμο αέριο σε όλη τη διάρκεια του έτους, όπου οι συνθήκες περιβάλλοντος και το φορτίο μεταβάλλονται συνεχώς. Η ανάλυση της λειτουργίας του συμπυκνωτή πρέπει να γίνεται σε συνδυασμό με τη λειτουργία του άλλου σημαντικού συστατικού που επηρεάζεται περισσότερο από αυτόν: Του συμπιεστή. Πράγματι, ο συμπυκνωτής καθορίζει την πίεση κατάθλιψης του συμπιεστή, η οποία με τη σειρά της καθορίζει το ενεργειακό προφίλ. Επομένως η ενεργειακή ανάλυση πρέπει να είναι συστημική, ήτοι για το ζεύγος συμπιεστή - συμπυκνωτή.

Οι κατηγορίες των συμπυκνωτών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανική ψύξη είναι οι αερόψυκτοι, οι υδρόψυκτοι, οι εξατμιστικοί και οι υβριδικοί - αδιαβατικοί. Στο παρόν θα περιγράψουμε τις τρεις πρώτες κατηγορίες (η τελευταία παρουσιάστηκε σε παλαιότερο άρθρο).

Ο προορισμός του συμπυκνωτή είναι να αποβάλλει προς το περιβάλλον τις εξής ποσότητες θερμότητας, που έχουν αποθηκευτεί στο ψυκτικό ρευστό κατά το «ταξίδι» του στο ψυκτικό κύκλωμα:

- ❖ Τη θερμότητα που απορροφήθηκε στους χώρους παραγωγής.
- ❖ Το έργο συμπίεσης του συμπιεστή (σε διβάθμιο σύστημα λογίζεται μόνο το έργο συμπίεσης του συμπιεστή ψηλής).

Άρα η ικανότητα (KW) του συμπυκνωτή είναι εξ ορισμού μεγαλύτερη από την ωφέλιμη ψυκτική ισχύ, κατά το μέγεθος του ρυθμού της θερμότητας που προστίθεται στο ρευστό από τον συμπιεστή (έργο συμπίεσης).

Στο συμπυκνωτή έρχονται σε επαφή δυο ρευστά με διαφορετικές θερμοκρασίες. Το ένα από αυτά είναι το ψυκτικό ρευστό, που βρίσκεται σε κατάσταση υπέρθερμου ατμού (κατάθλιψη συμπιεστή). Το άλλο (εξωτερικό) ρευστό, που έχει χαμηλότερη θερμοκρασία από το ψυκτικό ρευστό, μπορεί να είναι:

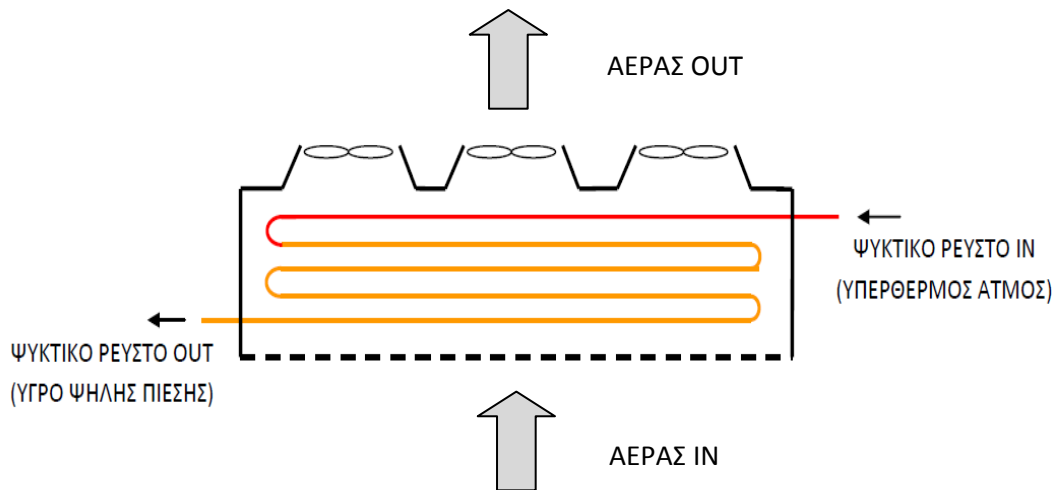
- ❖ Αέρας (αερόψυκτος συμπυκνωτής).

- ❖ Νερό (υδρόψυκτος συμπυκνωτής).
- ❖ Συνδυασμός αέρα και νερού (εξατμιστικός συμπυκνωτής, αδιαβατικός συμπυκνωτής).

Σε κάθε περίπτωση, αποκαθίσταται μια γέφυρα, όπου ρέει θερμότητα από το (θερμότερο) ψυκτικό ρευστό προς το (ψυχρότερο) εξωτερικό ρευστό.

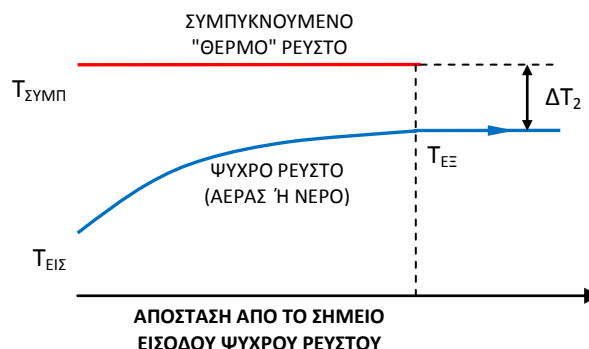
2. ΑΕΡΟΨΥΚΤΟΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗΣ

Ο αερόψυκτος συμπυκνωτής είναι η απλούστερη κατασκευή όλων των κατηγοριών. Το ψυκτικό ρευστό (υπέρθερμος ατμός) διαπερνάει μια συστοιχία *πτερυγιοφόρων* σωλήνων εντός του συμπυκνωτή, ενώ μια συστοιχία ανεμιστήρων "φυσάει" αέρα κάθετα προς τη ροή του ρευστού, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 1: Αρχή λειτουργίας αερόψυκτου συμπυκνωτή.

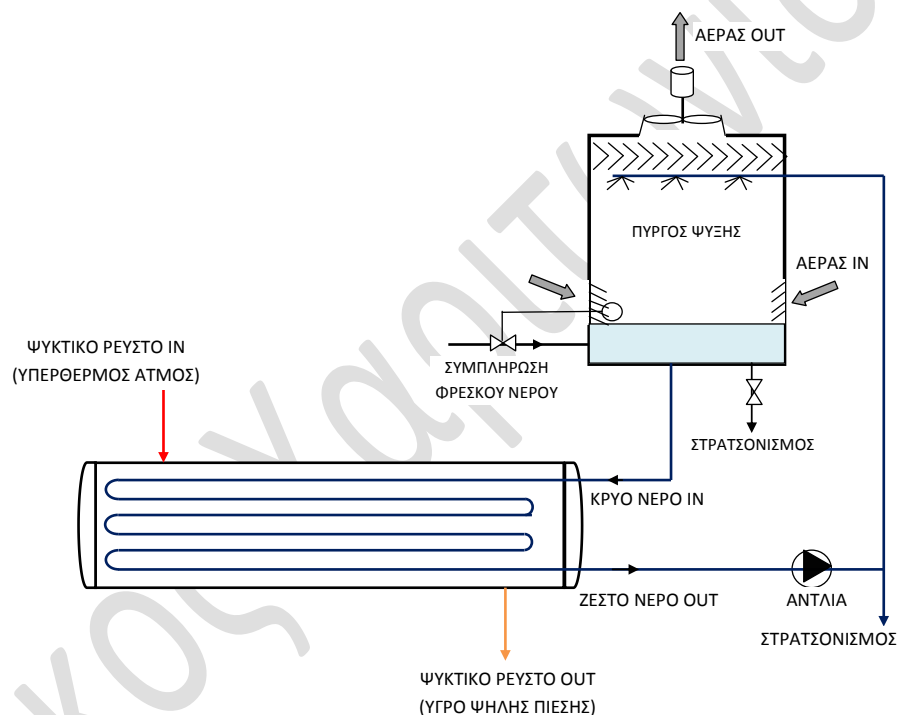
Ο μηχανισμός απομάκρυνσης θερμότητας στον αερόψυκτο συμπυκνωτή είναι απλός: Εκτελείται με αισθητή μεταβολή της θερμότητας του αέρα. Τούτος εισέρχεται σε θερμοκρασία (ξηρού βολβού) περιβάλλοντος και εξέρχεται σε ψηλότερη θερμοκρασία. Η τελευταία είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία συμπύκνωσης.



Σχήμα 2: Θερμοκρασιακά προφίλ των δυο ρευστών κατά τη δίοδο τους από το συμπυκνωτή.

3. ΥΔΡΟΨΥΚΤΟΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗΣ

Η θεωρητική ανάλυση της λειτουργίας του υδρόψυκτου συμπυκνωτή είναι παρόμοια με του αερόψυκτου: Η μοναδική διαφορά είναι ότι το "ψυχρό" ρευστό είναι νερό αντί αέρας και ο εναλλάκτης είναι του τύπου κελύφους και σωλήνας (shell and tube) ή πλακοειδής (plate). Φυσικά το νερό ψύξης δεν απορρίπτεται αλλά ανακυκλώνεται. Τούτο απαιτεί την προσθήκη στο σύστημα ενός πύργου ψύξης, όπου το νερό υποβάλλεται σε ρεύμα αέρα, ένα μέρος αυτού εξατμίζεται και το υπόλοιπο ψύχεται (αδιαβατικά) και ανακυκλώνεται. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η αρχή λειτουργίας του υδρόψυκτου συμπυκνωτή.

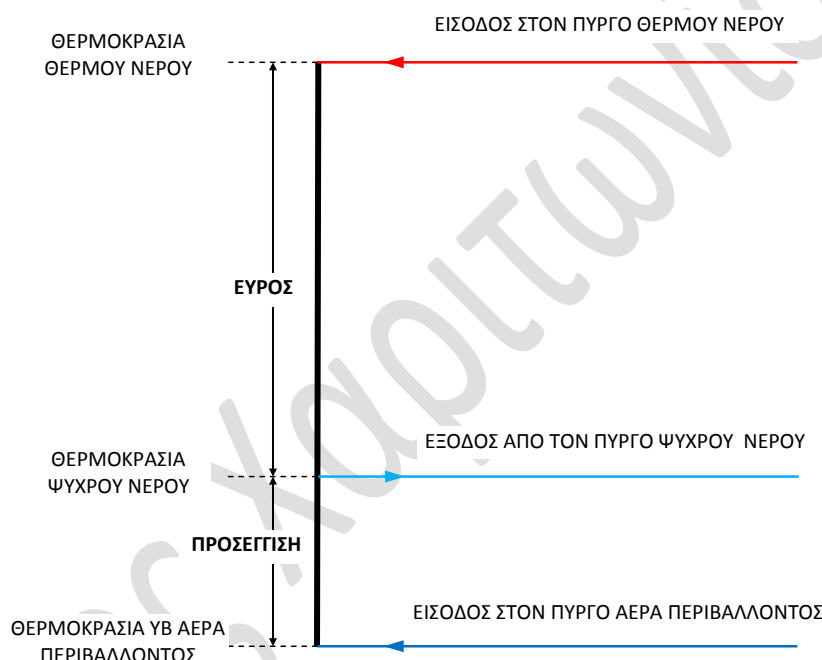


Σχήμα 3: Αρχή λειτουργίας υδρόψυκτου συμπυκνωτή.

4. ΠΥΡΓΟΙ ΨΥΞΗΣ

Στο προηγούμενο σχήμα φαίνεται η διάταξη ενός πύργου ψύξης. Το θερμό νερό που εξέρχεται από το συμπυκνωτή οδηγείται με αντλία στο επάνω μέρος του πύργου ψύξης, όπου καταιώνίζεται μέσω συστοιχίας ψεκαστήρων. Ταυτόχρονα ένας ανεμιστήρας στο επάνω μέρος του πύργου εξαναγκάζει τον αέρα να εισέρχεται από ανοίγματα στο κάτω μέρος και να κινείται αντίστροφα από το ρεύμα του νερού (counter flow). Πάνω από τους ψεκαστήρες υπάρχουν περισιδωτά ανοίγματα που επιτρέπουν τη δίοδο του αέρα αλλά παγιδεύουν τα σταγονίδια του

νερού (drift eliminators). Ο αέρας εξαναγκάζει μια ποσότητα του νερού να εξατμιστεί. Η ενέργεια που αφαιρείται από το νερό λόγω της εξατμίσεώς του προκαλεί πτώση της θερμοκρασίας του (εξατμιστική ψύξη). Έτσι το νερό που συλλέγεται στο κάτω μέρος του πύργου έχει μειωμένη θερμοκρασία και οδηγείται στην είσοδο του συμπυκνωτή κ.ο.κ. Η πτώση θερμοκρασίας που υφίσταται το νερό κατά τη διαδρομή του στον πύργο ονομάζεται "εύρος" (range), ενώ η διαφορά θερμοκρασίας του νερού εξόδου από τον πύργο μείον τη θερμοκρασία υγρού βολβού ονομάζεται "προσέγγιση" (approach). Η μεγαλύτερη δυνατή πτώση που μπορεί θεωρητικά να υποστεί το νερό εντός του πύργου είναι μέχρι τη θερμοκρασία υγρού βολβού (YB) του αέρα που εισέρχεται στον πύργο.



Σχήμα 4: Εύρος και προσέγγιση Πύργου Ψύξης.

Ο λόγος "εύρος / (εύρος + προσέγγιση)" ορίζεται σαν βαθμός απόδοσης του πύργου ψύξης και προφανώς είναι πάντα < 1 .

Η ψυκτική ικανότητα του πύργου συμπίπτει με την ικανότητα του υδρόψυκτου συμπυκνωτή και ισούται με το γινόμενο της παροχής επί την ειδική θερμότητα του νερού (4,19 KJ/kg.K) επί το εύρος.

Η θερμοκρασία υγρού βολβού αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην απόδοση του πύργου και του συστήματος γενικότερα, δεδομένου ότι τελικά καθορίζει την ελάχιστη δυνατή θερμοκρασία του "ψυχρού" νερού που εισέρχεται στον υδρόψυκτο συμπυκνωτή και κατ' επέκταση την

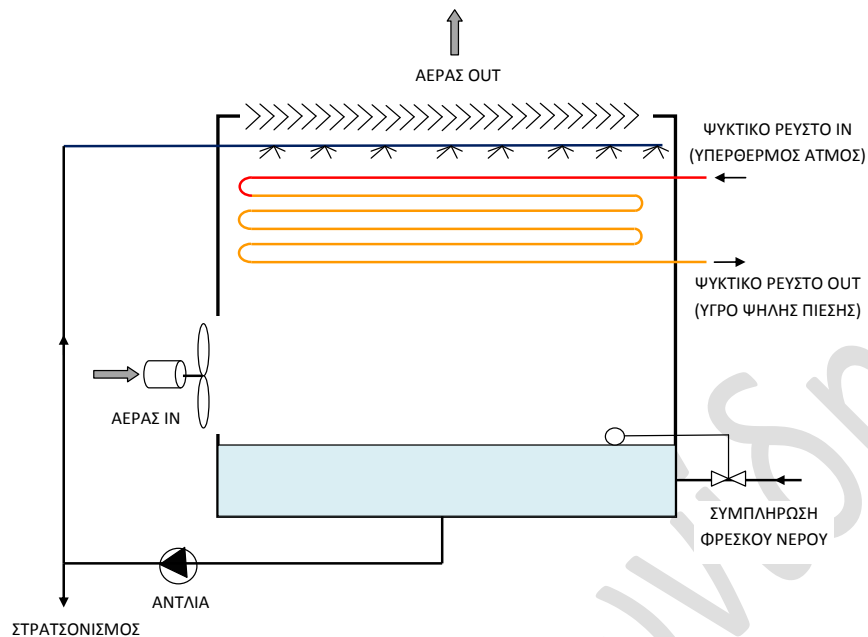
θερμοκρασία συμπύκνωσης. Ο μελετητής πρέπει να έχει υπόψη του ότι η επιλεγείσα θερμοκρασία ΥΒ σχεδιασμού μπορεί να υπερβαίνεται λόγω τοπικής ανακύκλωσης του εξερχόμενου (υγρού) ρεύματος αέρα από το επάνω μέρος του πύργου και πρέπει να είναι βέβαιος ότι αντιμετωπίζεται αυτή η κατάσταση.

Στο σύστημα του υδρόψυκτου συμπυκνωτή - πύργου ψύξης υπάρχουν απώλειες νερού λόγω εξάτμισης και λόγω παράσυρσης σταγονιδίων από τον ανεμιστήρα (drift losses). Λόγω της εξάτμισης, τα διαλυμένα στερεά στο απομένον νερό αυξάνονται, πράγμα που σημαίνει κίνδυνο επικάθησης αλάτων και μείωση του συντελεστή U του εναλλάκτη λόγω του εμποδίου στη ροή θερμότητας από το στρώμα της επικάθησης. Τούτο αντιμετωπίζεται καταρχήν με εθελοντική απόρριψη μιας ποσότητας νερού (στρατσονισμός) και ισόποση τροφοδοσία φρέσκου νερού και με έλεγχο των αιωρούμενων στερεών και ανάπτυξης αλγών με διαχείριση του νερού (αποσκήρυνση - προσθήκη χημικών ουσιών). Η επιλογή ενός πύργου ψύξης γίνεται με στοιχεία εισόδου τη θερμοκρασία υγρού βολβού, το εύρος, την προσέγγιση και την απαιτούμενη παροχή του νερού.

5. ΕΞΑΤΜΙΣΤΙΚΟΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗΣ

Ο εξατμιστικός συμπυκνωτής είναι ένας συνδυασμός αερόψυκτου και υδρόψυκτου συμπυκνωτή σε μια συμπαγή μονάδα. Η μονάδα αυτή περιέχει τα στοιχεία του εναλλάκτη συμπύκνωσης και φέρει τα λοιπά χαρακτηριστικά ενός πύργου ψύξης. Ο εναλλάκτης δεν φέρει πτερύγια για να μπορεί να βρέχεται εύκολα με νερό. Όπως στον υδρόψυκτο συμπυκνωτή, έτσι και στον εξατμιστικό η θερμοκρασία συμπύκνωσης ρέπει προς τη θερμοκρασία ΥΒ του περιβάλλοντος αέρα και σε ένα ιδανικό σύστημα θα εξισωνόταν με αυτή. Στην [1] αναφέρεται ότι σε εξατμιστικό συμπυκνωτή η συμπύκνωση μπορεί να επιτυγχάνεται μόλις 6K πάνω από τη θερμοκρασία υγρού βολβού, ενώ απαιτούνται 15K πάνω από τη θερμοκρασία ξηρού βολβού για αερόψυκτο συμπυκνωτή.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η αρχή λειτουργίας του εξατμιστικού συμπυκνωτή.



Σχήμα 5: Αρχή λειτουργίας εξατμιστικού συμπυκνωτή.

Ο μηχανισμός αφαίρεσης της θερμότητας από το συμπυκνούμενο ρευστό εκτελείται κυρίως μέσω της λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης του νερού που έρχεται σε επαφή με τη θερμή εξωτερική επιφάνεια του εναλλάκτη.

Ο σχεδιασμός του εξατμιστικού συμπυκνωτή αποτελεί περίπλοκο πρόβλημα και απαιτεί βέλτιστο συνδυασμό μιας σειράς παραγόντων, όπως διάμετρος και μήκος σωλήνας, αποστάσεις σωλήνων, είδος κυκλώματος ψυκτικού ρευστού, παροχή αέρα, παροχή νερού ανακύκλωσης και διαστάσεις κελύφους.

Αναφορές:

[1] S. Forbes Pearson "Use of Carbon Dioxide for Air Conditioning and General Refrigeration", Sustainability of the Cold Chain, Cambridge, 2010.