

23-3-25

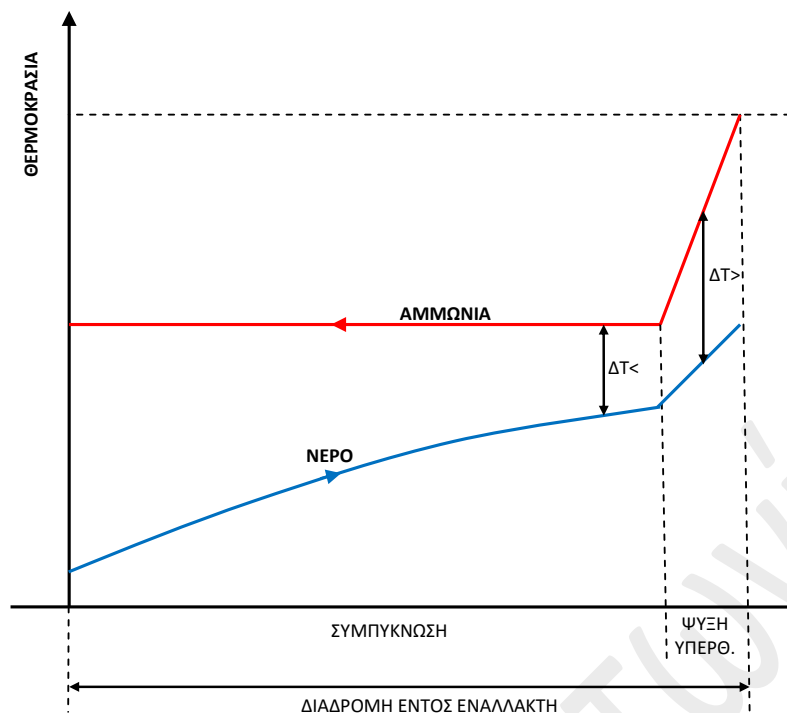
ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΨΥΚΤΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ – 3

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

ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗ ΝΕΡΟΥ ΑΠΟ ΥΠΕΡΘΕΡΜΟ ΑΤΜΟ ΚΑΙ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ

Η προθέρμανση νερού έχει εφαρμογή στις εργασίες υγιεινής και κατεργασίας προϊόντων, καθαρισμούς χώρων και στην εξοικονόμηση ενέργειας σε μεγάλα συστήματα ενισχυμένης θέρμανσης νερού από άλλες ενεργειακές πηγές (π.χ. λέβητες αερίου), όπου η προθέρμανση νερού με χρήση ανακτώμενης ενέργειας προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση. Η προθέρμανση μπορεί να γίνεται αποτελεσματικά σε εναλλάκτες του τύπου «σωλήνα εντός σωλήνας» (σχήματα 2 και 4). Η ιδιαιτερότητα αυτού του εναλλάκτη προθέρμανσης είναι ότι το νερό κάνει μόνο ένα πέρασμα από τον εναλλάκτη, δηλαδή εισέρχεται στο ένα άκρο του εναλλάκτη σε μια αρχική θερμοκρασία που έχει στην πηγή του και εξέρχεται στο άλλο άκρο «κερδίζοντας» ένα θερμοκρασιακό βήμα, ερχόμενο σε επαφή με το «θερμό» ψυκτικό ρευστό άπαξ. Η μελέτη του εναλλάκτη αυτής της μορφής είναι απλή και βοηθάει στη κατανόηση της λειτουργίας και του εναλλάκτη ανακύκλωσης, όπου η ίδια ποσότητα του νερού διέρχεται επάλληλες φορές από τον εναλλάκτη (π.χ. το νερό μιας δεξαμενής), «κερδίζοντας» κάθε φορά ένα «θερμοκρασιακό άλμα». Κάθε πέρασμα από τον εναλλάκτη προσομοιάζει με τον εναλλάκτη προθέρμανσης νερού, που περιγράφεται στα επόμενα.

Στο εναλλάκτη τύπου «σωλήνα εντός σωλήνας» επιτυγχάνεται αντίστροφη ροή ψυκτικού ρευστού / προς θέρμανση ρευστού. Η εναλλαγή θερμότητας γίνεται καταρχήν στην περιοχή συμπύκνωσης (σταθερή θερμοκρασία ψυκτικού ρευστού) και ακολουθεί και στην περιοχή του υπέρθερμου ατμού, όπου επιτυγχάνεται ένα σημαντικό θερμοκρασιακό άλμα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του υπέρθερμου ατμού. Με την αντίστροφη ροή στην περιοχή αυτή μεγιστοποιείται η LMTD και έτσι μεγιστοποιείται και η άνοδος της θερμοκρασίας του προς θέρμανση ρευστού (μεγιστοποίηση ΔT). Η διεργασία της εναλλαγής θερμότητας στις περιοχές συμπύκνωσης και ψύξης υπέρθερμου ατμού φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



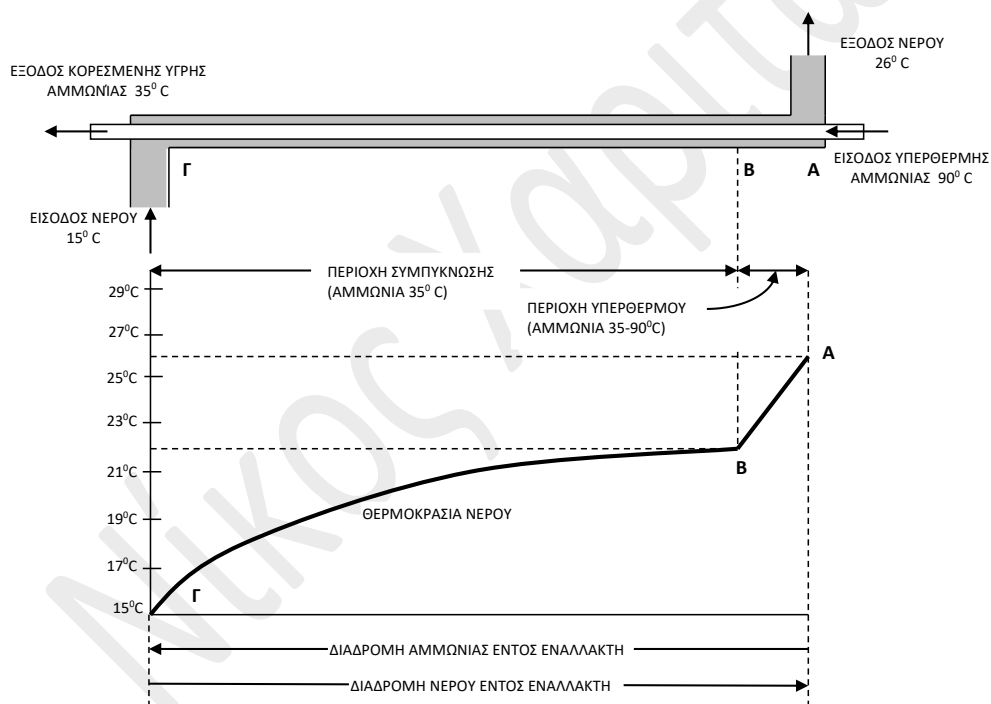
Σχήμα 1: Διεργασία ανάκτησης θερμότητας στις περιοχές συμπύκνωσης και ψύξης υπέρθερμου ατμού.

Η άνοδος της θερμοκρασίας του νερού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και ο υπολογισμός της είναι σύνθετος. Οι βασικότεροι από αυτούς τους παράγοντες είναι:

- ❖ Η θερμοκρασία εισόδου του νερού.
- ❖ Η παροχή του νερού.
- ❖ Η θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού ρευστού (π.χ. υπέρθερμη αμμωνία).
- ❖ Η θερμοκρασία συμπύκνωσης του ψυκτικού ρευστού.
- ❖ Η παροχή του ψυκτικού ρευστού.

Ο μηχανισμός θέρμανσης του νερού έχει ως εξής (βλέπε σχήματα 1 και 2): Το ψυκτικό ρευστό εισέρχεται στον εναλλάκτη (σημείο Α) σε κατάσταση υπέρθερμου ατμού, δηλαδή σε μεγάλη σχετικά θερμοκρασία (για συστήματα αμμωνίας 80-100°C). Μετά την είσοδό του, αρχίζει να «χάνει» θερμοκρασία, αποδίδοντας «αισθητή» θερμότητα προς το νερό. Η πτώση θερμοκρασίας στη περιοχή αυτή γίνεται γρήγορα και συνεχίζεται μέχρι το σημείο Β, οπότε το ψυκτικό ρευστό φθάνει σε κατάσταση κορεσμού. Από το σημείο αυτό και μετά, η θερμοκρασία του παραμένει σταθερή (θερμοκρασία συμπύκνωσης), ενώ η θερμότητα που αποδίδεται προς το νερό είναι η «λανθάνουσα» θερμότητα συμπύκνωσης. Στη περιοχή της λανθάνουσας θερμότητας τα ποσά θερμότητας που εναλλάσσεται είναι μεγάλο, αλλά η εναλλαγή γίνεται με αργό ρυθμό, λόγω της

μικρής διαφοράς θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, σε σύστημα αμμωνίας, που η συμπύκνωση γίνεται π.χ. στους 35°C , ο υπέρθερμος ατμός εισέρχεται σε θερμοκρασία π.χ. 90°C (σημείο Α), ψύχεται μέχρι τους 35°C (σημείο Β) και κατόπιν παραμένει σε σταθερή θερμοκρασία 35°C μέχρι την έξοδο. Αντίστοιχα, το νερό όταν εισέρχεται (σημείο Γ), «βρίσκει» την αμμωνία στους 35°C . Αν υποθέσουμε ότι το νερό έχει στην είσοδο θερμοκρασία 15°C , μόλις έρθει σε επαφή με την αμμωνία των 35°C ($\Delta T = 20\text{ K}$) αρχίζει να ζεσταίνεται. Ο ρυθμός θέρμανσης αρχικά είναι μεγάλος λόγω της μεγάλης θερμοκρασιακής διαφοράς ΔT , προοδευτικά όμως μειώνεται όσο προχωράει το νερό στον εναλλάκτη, λόγω μείωσης του ΔT . Στο σημείο Β, το νερό έχει φθάσει π.χ. σε θερμοκρασία 22°C ($\Delta T = 7\text{ K}$), οπότε εισέρχεται στη «θερμότερη» περιοχή του υπέρθερμου ατμού των $35 - 90^{\circ}\text{C}$. Εκεί γίνεται μια γρήγορη άνοδος της θερμοκρασίας λόγω μεγάλου ΔT , η οποία όμως αναφέρεται σε μικρό μήκος (η ποσότητα της αισθητής θερμότητας είναι πολύ μικρή σε σχέση με τη λανθάνουσα). Το μήκος ΑΒ συνήθως είναι της τάξης του 10-15% του συνολικού μήκους ΑΓ [2]. Το νερό τελικά εξέρχεται σε μια θερμοκρασία π.χ. 26°C . Η διεργασία εναλλαγής φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 2: Προθέρμανση νερού χρήσης με εν σειρά ψύξη υπέρθερμου ατμού και συμπύκνωση αμμωνίας.

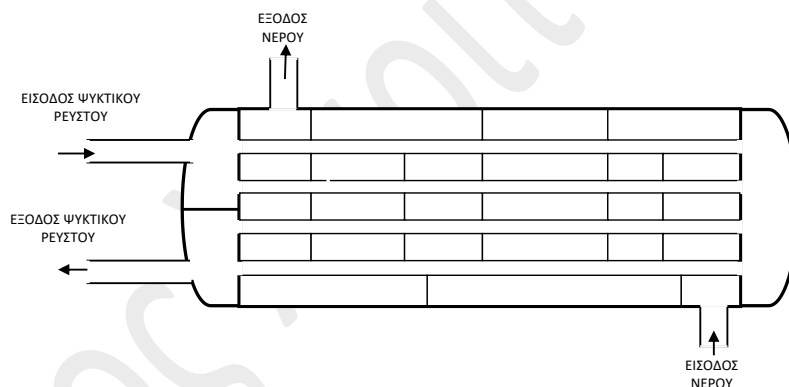
Η καμπύλη θέρμανσης του νερού στην περιοχή συμπύκνωσης έχει όλο και μειούμενη κλίση, ήτοι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας όλο και μειώνεται. Ο λόγος είναι ότι η αμμωνία έχει σταθερή

θερμοκρασία (συμπύκνωσης), ενώ το νερό προοδευτικά θερμαίνεται. Τούτο σημαίνει ότι προοδευτικά μειώνεται το ΔT (διαφορά θερμοκρασίας αμμωνίας - νερού), άρα και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας¹.

ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι εναλλάκτες ανάκτησης ενέργειας βασίζονται στη φυσική προσέγγιση των δυο ρευστών (ψυκτικού ρευστού και προς θέρμανση ρευστού), ώστε να λάβει χώρα μεταφορά θερμότητας με αγωγή (conduction). Υπάρχουν δυο βασικοί τύποι εναλλακτών:

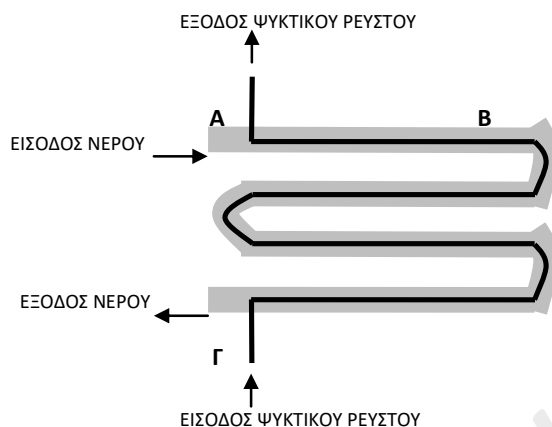
Εναλλάκτης τύπου «κέλυφος και σωλήνα» (shell & tube). Ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται όταν δεν είναι μεγάλη η απαίτηση της θερμοκρασίας του προς θέρμανση ρευστού. Τυπικό παράδειγμα τέτοιας εφαρμογής είναι η θέρμανση γλυκόλης για υποδαπέδια θέρμανση καταψύξεων. Η απαίτηση στις εφαρμογές αυτές είναι της τάξης των 6 W ανά τ.μ. δαπέδου, η οποία καλύπτεται με κυκλοφορία μεγάλης μάζας ρευστού (π.χ. σωλήνες ανά 1 μέτρο) ήπιας θερμοκρασίας (10-15⁰ C). Η αρχή λειτουργίας του εναλλάκτη «κέλυφος και σωλήνα» φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 3: Αρχή λειτουργίας εναλλάκτη κελύφους και σωλήνας (shell & tube).

Εναλλάκτης τύπου «σωλήνα εντός σωλήνας» (tube in tube). Ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται όταν πρέπει να μεγιστοποιηθεί η θερμοκρασία του προς θέρμανση ρευστού και αναλύθηκε πιο πάνω. Η αρχή λειτουργίας του εναλλάκτη «σωλήνα εντός σωλήνα» φαίνεται στο επόμενο σχήμα:

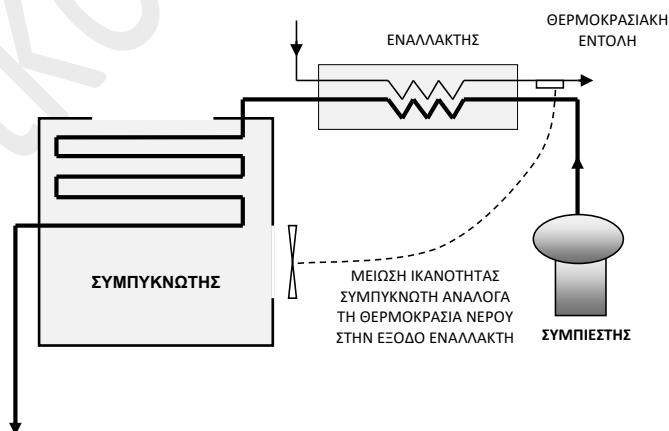
¹ Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας (KW) σε κάθε στοιχειώδες τμήμα του εναλλάκτη ισούται με $A \cdot U \cdot \text{LMTD}$, όπου A η επιφάνεια του εναλλάκτη (m²), U ο καθολικός συντελεστής θερμικής μεταφοράς (w/m².K) και LMTD η λογαριθμική μέση διαφορά θερμοκρασίας των δυο ρευστών (K). Αν το A·U παραμένει σταθερό, η μείωση του ΔT επιφέρει μείωση και του LMTD, άρα μείωση του ρυθμού μεταφοράς της θερμότητας.



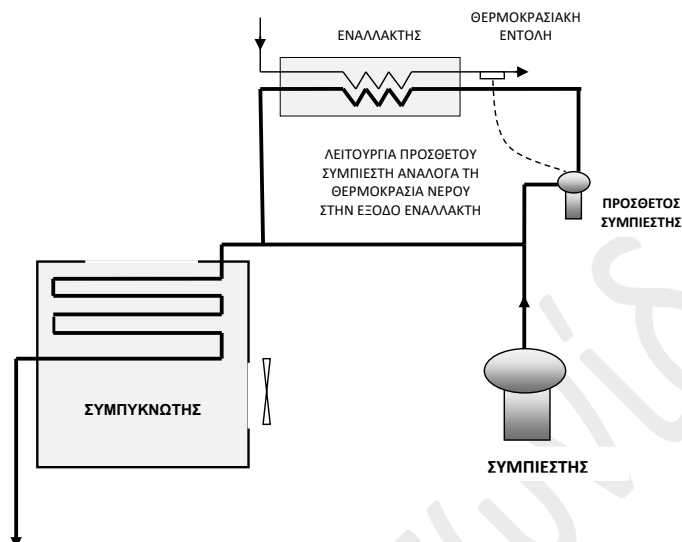
Σχήμα 4: Αρχή λειτουργίας εναλλάκτη σωλήνα εντός σωλήνας (tube in tube).

ΤΕΧΝΗΤΗ ΑΝΟΔΟΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΠΗΓΗΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ

Συχνά, η θερμοκρασία της πηγής ανάκτησης ενέργειας είναι πολύ χαμηλή, με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η μεταφορά θερμότητας, λόγω έλλειψης θερμοκρασιακής διαφοράς. Το πρόβλημα συναντάται σε περιόδους χαμηλής ψυκτικής ισχύος, όπως π.χ. το χειμώνα, όπου η συμπύκνωση γίνεται σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία. Στις περιπτώσεις αυτές, είναι συχνά «βιώσιμο» να ανεβάζουμε τεχνητά τη θερμοκρασία συμπύκνωσης, ώστε να επιτευχθεί η μεταφορά της θερμότητας. Η τεχνητή ανύψωση της θερμοκρασίας μπορεί να γίνει με δυο τρόπους: (α) τη μείωση της ικανότητας (capacity) του συμπυκνωτή και (β) την προσθήκη ενός βήματος συμπίεσης με τη χρήση ενός πρόσθετου (μικρού) συμπιεστή, ο οποίος ανεβάζει τη πίεση του υπέρθερμου ατμού κατάθλιψης των συμπιεστών ψύξης σε μια ανεξάρτητη γραμμή, όπου είναι εγκατεστημένος ο εναλλάκτης, σε παράλληλη σύνδεση με τον συμπυκνωτή. Οι μεθοδολογίες φαίνονται στα επόμενα σχήματα.



Σχήμα 5: Τεχνητή αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης με μείωση της ικανότητας του συμπυκνωτή.



Σχήμα 6: Τεχνητή αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης με αύξηση της πίεσης με πρόσθετο συμπιεστή σε ξεχωριστό κύκλωμα του εναλλάκτη.

Από τις παραπάνω λύσεις τεχνητής αύξησης της θερμοκρασίας, η πρώτη είναι οικονομικότερη στην εγκατάσταση αλλά ακριβότερη στη λειτουργία (λόγω του ότι όλο το ψυκτικό ρευστό εξαναγκάζεται να συμπυκνωθεί στην αυξημένη θερμοκρασία / πίεση), ενώ η δεύτερη το αντίθετο. Η τελική επιλογή εξαρτάται από μελέτη κόστους κύκλου ζωής. Σε κάθε περίπτωση, για να είναι βιώσιμη η επένδυση πρέπει το όφελος (ανάκτηση θερμότητας) να είναι μεγαλύτερο από το κόστος (κόστος επένδυσης + λειτουργίας). Σημειώνεται εδώ ότι στο λειτουργικό κόστος πρέπει να ληφθούν υπόψη έμμεσες αρνητικές επιπτώσεις της λειτουργίας ανάκτησης, όπως πτώση πίεσης, πτώση απόδοσης συμπιεστή όταν γίνεται τεχνητή άνοδος της θερμοκρασίας συμπύκνωσης (αύξηση λόγου συμπίεσης) κλπ.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Νίκος Χαριτωνίδης «ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΨΥΞΗΣ – ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΑΜΜΩΝΙΑ», 2020.
2. Wilbert F. Stoecker "Industrial Refrigeration Handbook", McGraw Hill, 1998.