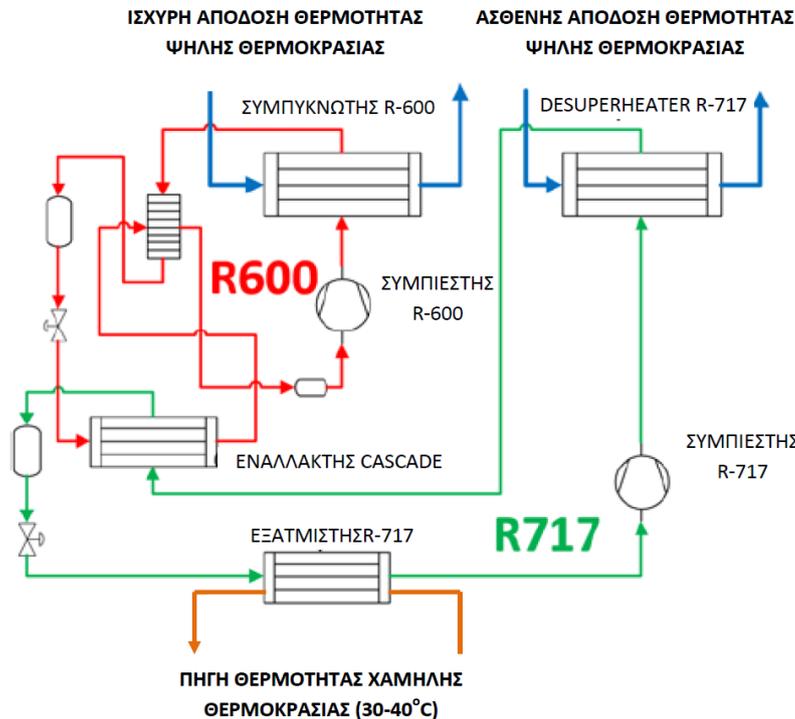


ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΤΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ – 4**ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΑ ΡΕΥΣΤΑ**

Στα προηγούμενα άρθρα εξετάσαμε αντλίες θερμότητας με ενιαίο ρευστό την αμμωνία. Εδώ θα δούμε πως μπορούμε να πετύχουμε «μεγάλη» ανάταση της θερμοκρασίας με την προσθήκη δεύτερου (ανεξάρτητου) κυκλώματος διαφορετικού ψυκτικού ρευστού, κατάλληλου για ψηλές θερμοκρασίες, όπως το Διοξείδιο του Άνθρακα (CO₂) και οι Υδρογονάνθρακες (διάταξη cascade). Με το CO₂, απαραίτητη προϋπόθεση είναι να «ξεκινάει» από μια θερμοκρασία εξάτμισης αρκετά κάτω από το κρίσιμο του σημείο (31° C), π.χ. < 20° C. Η απόδοση της θερμότητας γίνεται σε ψύκτη αερίου σε καθεστώς ολισθαίνουσας θερμοκρασίας. Με υδρογονάνθρακα, η απόδοση γίνεται σε σταθερή θερμοκρασία (συμπύκνωση) και σχετικά αποδοτικά, λόγω του ψηλού τριπλού σημείου που διαθέτουν αυτά τα ρευστά. Μια επιλογή cascade με φυσικά ρευστά είναι αμμωνία στο χαμηλό κύκλωμα (κρίσιμο σημείο 132° C) και βουτάνιο στο ψηλό κύκλωμα (κρίσιμο σημείο 152° C). Σε μια τέτοια εφαρμογή, για θερμοκρασία νερού χρήσης 110 - 125° C έχει υπολογιστεί COP της τάξης του 2,5 με χρήση συστατικών υπάρχουσας (βελτιωμένης) τεχνολογίας [2].

Σε μια αντλία θερμότητας τύπου cascade φυσικών ρευστών, όπως αμμωνίας - βουτανίου, υπάρχουν δυο σημεία ανάκτησης θερμότητας και μάλιστα ψηλής θερμοκρασίας (>100° C): Στο χαμηλό κύκλωμα ο εναλλάκτης μείωσης υπερθέρμανσης της αμμωνίας (desuperheater) πριν τον εναλλάκτη cascade και στο ψηλό κύκλωμα ο συμπυκνωτής βουτανίου. Αμφότεροι οι εναλλάκτες έχουν δυνατότητα παροχής θερμότητας ψηλής θερμοκρασίας (> 100° C), αλλά έχουν μεταξύ τους μια διαφορά: Ο συμπυκνωτής βουτανίου έχει σχετικά πολύ μεγαλύτερη θερμική ισχύ, λόγω της σχετικά μεγάλης ποσότητας λανθάνουσας θερμότητας που αποβάλλει. Ο desuperheater της αμμωνίας όμως έχει περιορισμένη ισχύ, λόγω της σχετικά μικρής ειδικής θερμότητας που έχει ο υπέρθερμος ατμός της αμμωνίας (αποβολή αισθητής θερμότητας). Εδώ η αποβολή θερμότητας γίνεται υπό συνθήκη ολισθαίνουσας θερμοκρασίας της αμμωνίας, ενώ το ίδιο γίνεται και για το θερμαινόμενο ρευστό, που τις περισσότερες φορές είναι νερό. Η εναλλαγή θερμότητας με *αντίστροφη ροή* των δυο ρευστών και υπό ολισθαίνουσες θερμοκρασιακές συνθήκες είναι πιο αποδοτική. Η θερμοκρασιακή ανύψωση όμως στο desuperheater αμμωνίας έχει σαν άνω όριο το σημείο που αντιστοιχεί στη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία κατάθλιψης του συμπιεστή αμμωνίας, που με την τρέχουσα τεχνολογία μπορεί να φτάσει τους 190° C [2]. Μια συνετή αξιοποίηση μιας τέτοιας αντλίας θερμότητας, είναι η χρήση του «ισχυρού» εναλλάκτη συμπύκνωσης του βουτανίου για «βαριές» βιομηχανικές διεργασίες μεγάλης απαιτούμενης θερμικής ισχύος, όπως ξήρανση, παστερίωση, βρασμός και η χρήση του «ασθενικού» εναλλάκτη desuperheater αμμωνίας για πιο «ελαφριές» χρήσεις μικρής απαιτούμενης θερμικής ισχύος, όπως η (προ)θέρμανση νερού. Επί του συνόλου της θερμικής προσφερομένης θερμικής ισχύος της αντλίας θερμότητας cascade, ενδεικτικά μπορεί το 80-90% να αποδίδεται από το συμπυκνωτή βουτανίου και 10-20% από το desuperheater αμμωνίας [2]. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η σχετική διάταξη.

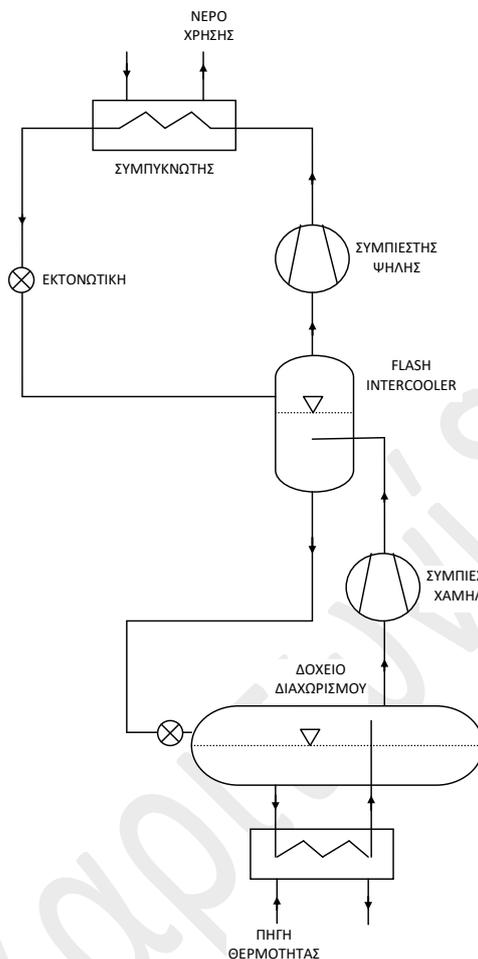


Σχήμα 1: Διάταξη Αντλίας Θερμότητας Cascade Αμμωνίας - Βουτανίου.

ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ ΜΕ ΕΙΕCΤΟΡ

Ας δούμε τώρα πως μπορεί «έξυπνα» να βελτιωθεί ο κύκλος μιας διβάθμιας αντλίας θερμότητας αμμωνίας με προσθήκη ejector. Ο ejector είναι μια απλή και οικονομική συσκευή, που μπορεί να κάνει μερική ανάκτηση των θερμοδυναμικών απωλειών κατά την εκτόνωση. Ιστορικά ο ejector δεν δημιουργήσε ενδιαφέρον στα συστήματα αμμωνίας λόγω των σχετικά μικρών θερμοδυναμικών απωλειών κατά την εκτόνωση σε αυτό το ρευστό, ενώ έτυχε ιδιαίτερου ενδιαφέροντος σε άλλα ρευστά όπως το CO₂, που παρουσιάζουν έντονες σχετικές θερμοδυναμικές απώλειες εκτόνωσης. Εν τούτοις, σε κύκλους αμμωνίας με μεγάλο λόγο πίεσης συμπύκνωσης προς πίεση εξάτμισης, όπως στις αντλίες θερμότητας, αναμένεται σημαντική εξοικονόμηση με τη χρήση ejector.

Ένα κλασικό σύστημα διβάθμιας αντλίας θερμότητας αμμωνίας παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.

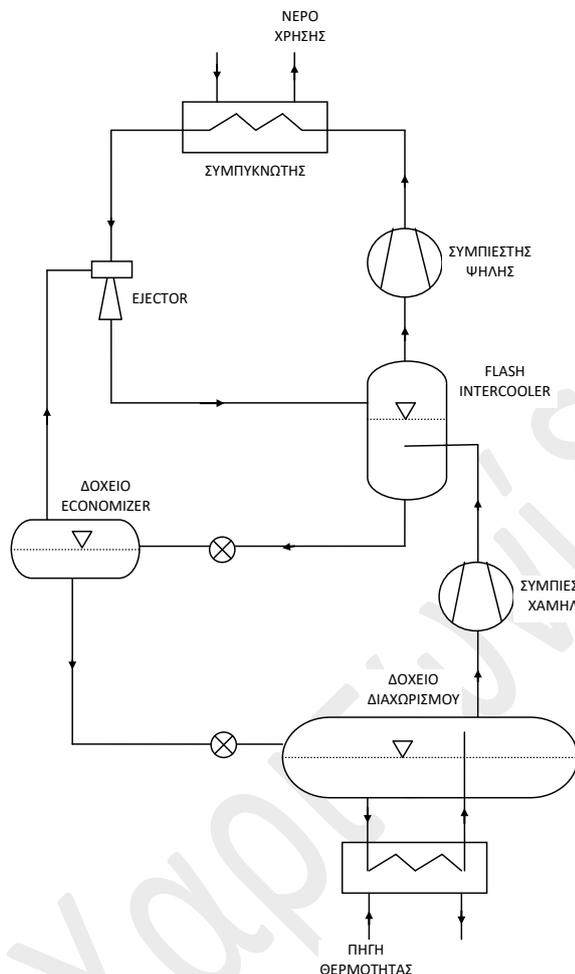


Σχήμα 2: Κλασσική διάταξη διβάθμιας αντλίας θερμότητας αμμωνίας.

Ο COP αυτού του συστήματος εξαρτάται κύρια από τις ακραίες θερμοκρασίες εξάτμισης - συμπύκνωσης και τις αποδόσεις συμπίεσης των δυο βαθμίδων. Επηρεάζεται επίσης από την ενδιάμεση πίεση, η οποία πρέπει να βελτιστοποιείται ανάλογα τις συνθήκες λειτουργίας¹.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το ίδιο σύστημα, με βελτίωση ejector [3].

¹ Η θεωρητική βέλτιστη τιμή της ενδιάμεσης πίεσης είναι η τετραγωνική ρίζα του γινομένου των (απόλυτων) πιέσεων εξάτμισης - συμπύκνωσης.



Σχήμα 3: Τροποποιημένη διάταξη διβάθμιας αντλίας θερμότητας αμμωνίας με προσθήκη ejector.

Ο ejector είναι μια συσκευή χωρίς κινούμενα μέρη, που η λειτουργία του βασίζεται μόνο στη γεωμετρική του διαμόρφωση. Υποκαθιστά την εκτονωτική βαλβίδα και η χρήση του είναι συνήθης σε transcritical συστήματα CO₂ στην έξοδο του ψύκτη αερίου, όπου εκτονώνεται το υπερκρίσιμο CO₂². Πολύ περιληπτικά, η αρχή λειτουργίας του έχει ως εξής: Το ρευστό ψηλής πίεσης (αέριο, υγρό ή υπερκρίσιμο ρευστό) εξαναγκάζεται να διέλθει από μια όλο και μειούμενη διατομή. Στο σημείο της ελάχιστης διατομής η ταχύτητα του ρευστού μεγιστοποιείται, συχνά σε υπερηχητικό επίπεδο. Στην περιοχή αυτή γίνεται μια παράπλευρη λήψη ρευστού από άλλο σημείο της εγκατάστασης, η οποία κινητοποιείται από την υποπίεση που δημιουργείται κάθετα με τη ροή ψηλής ταχύτητας (φαινόμενο Bernoulli). Οι δυο ροές κατόπιν αναμιγνύονται, ενώ η διατομή του ejector προοδευτικά πάλι αυξάνεται (οπότε μειώνεται και η ταχύτητα, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η πίεση του ρευστού³) και το ρευστό καταλήγει στο δοχείο περισυλλογής του (flash intercooler στο σχήμα 3). Η πίεση που επικρατεί στην παράπλευρη θύρα του ejector είναι χαμηλότερη

² Η βέλτιστη πίεση κατάθλιψης του υπερκρίσιμου CO₂ στα συστήματα αυτά ρυθμίζεται με αυξομείωση της παροχής με ενεργοποίηση - απενεργοποίηση συστοιχίας ejector σε παράλληλη σύνδεση.

³ Με βάση την αρχή διατήρησης της ενέργειας, όταν σε κλειστό σύστημα μειώνεται η κινητική ενέργεια (ταχύτητα) αυξάνεται η δυναμική ενέργεια (πίεση).

από την πίεση αναρρόφησης του συμπιεστή (ψηλής), δημιουργώντας έτσι τη δυνατότητα μιας «δωρεάν» μείωσης της θερμοκρασίας εξάτμισης (ή ισοδύναμα μια δωρεάν «προσυμπίεση»), ήτοι βελτίωση του COP. Η παράπλευρη λήψη του ejector τυπικά γίνεται από εξατμιστή ή δοχείο διαχωρισμού. Στην αντλία θερμότητας που εξετάζεται στο σχήμα επελέγη σημείο παράπλευρης λήψης ξεχωριστό δοχείο, όπου μέσω του ejector επιτυγχάνεται πίεση χαμηλότερη από εκείνη της εξάτμισης στο δοχείο intercooler που ταυτίζεται με την πίεση αναρρόφησης της ψηλής βαθμίδας της αντλίας θερμότητας. Η χαμηλότερη αυτή πίεση προσδίδει στο δοχείο αυτό την ιδιότητα του economizer: Προσφέρει τη δυνατότητα της εκτόνωσης από την ενδιάμεση στη χαμηλή πίεση σε δυο στάδια, ήτοι μείωση των θερμοδυναμικών απωλειών.

Η βελτίωση του COP εξαρτάται κατά πολύ από τη γεωμετρία του ejector και επιπρόσθετα από τον «overall» λόγο των πιέσεων συμπύκνωσης - εξάτμισης⁴. Για λόγους από 6 ως 10 η βελτίωση μπορεί να είναι 2 ως 4% αντίστοιχα [3]. Η γεωμετρία του ejector πρέπει να είναι εξειδικευμένη ανάλογα τα χαρακτηριστικά του κάθε συστήματος και τα εσωτερικά του τοιχώματα πρέπει να είναι άριστα λειασμένα για μείωση του συντελεστή τριβής, που είναι σημαντική λόγω της πολύ ψηλής ταχύτητας.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Νίκος Χαριτωνίδης «ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΨΥΞΗΣ – ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΑΜΜΩΝΙΑ», 2020.
2. O. Bamigbetan, T. M. Eikevik, P. Nekså, M. Bantle "Extending Ammonia High Temperature Heat Pump using Butane in a Cascade System", 7th IIR Conference: Ammonia and CO₂ Refrigeration Technologies, Ohrid, 2017.
3. K. Banasiak, A. Hafner, A. Steiner "COP Improvement of Two-stage Ammonia Heat Pumps by Use of Ejector", 6th IIR Conference: Ammonia and CO₂ Refrigeration Technologies, Ohrid, 2015.

⁴ Για παράδειγμα, για πίεση συμπύκνωσης 80° C και πίεση εξάτμισης 2° C ο «overall» λόγος είναι 41,42 / 4,62 = 9.