

25-6-23

**ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗΣ ΜΕ ΑΜΜΩΝΙΑ**

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

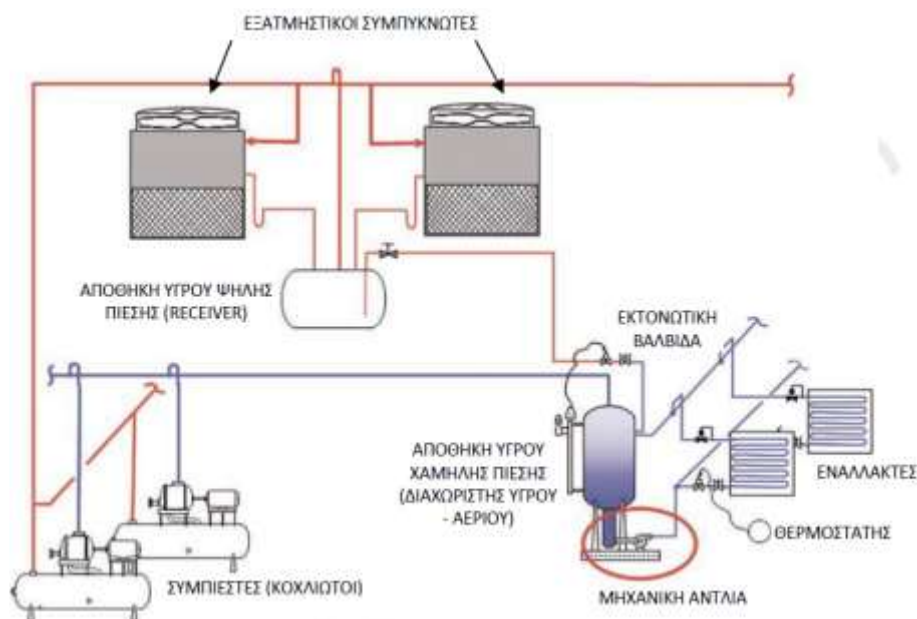
Στα δυο προηγούμενα άρθρα αφιερωμένα στην αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ) είδαμε τις βασικές θερμοφυσικές της ιδιότητες και δείξαμε ότι τυπικά είναι το πιο «δυνατό» ρευστό από άποψη απόδοσης. Από την άλλη πλευρά είδαμε ότι η χρήση αυτού του ρευστού περικλείει κινδύνους για ανθρώπους και περιουσίες και απαιτούνται θεσμικά μέτρα ασφάλειας, για τα οποία δώσαμε ερεθίσματα. Στη συνέχεια και στα πλαίσια της δυνατότητας εμβάθυνσης στα πλαίσια ενός άρθρου προχωράμε στη συνοπτική παρουσίαση των συστημάτων αμμωνίας βιομηχανικής ψύξης, που προϋποθέτουμε ότι είναι της υπερπλήρωσης, της (βελτιωμένης) ξηρής εκτόνωσης και τα συνεργαζόμενα με το  $\text{CO}_2$ , που είναι τα cascade και τα πρωτεύοντος ρευστού  $\text{NH}_3$  / δευτερεύοντος  $\text{CO}_2$ . Το  $\text{CO}_2$  ως δευτερεύον έχει τη δυνατότητα πολύ χαμηλών θερμοκρασιών, σε αντίθεση με τη γλυκόλη που περιορίζεται μόνο στις συντηρήσεις. Επίσης, θα διαχωρίσουμε τα συστήματα σε εκείνα του κεντρικού μηχανοστασίου και εκείνα των συμπαγών – εργοστασιακών – συμπαγών μονάδων που προσφέρουν λύσεις «plug & play». Στο άρθρο αυτό ξεκινάμε με τα συστήματα υπερπλήρωσης, που παραδοσιακά είναι τα πιο διαδομένα στη βιομηχανική ψύξη με αμμωνία.

Η ορολογία «συστήματα υπερπλήρωσης υγρού» αναφέρεται στην παροχή προς τον εναλλάκτη μεγαλύτερης ποσότητας (μάζας) υγρού από αυτήν που εξατμίζεται. Έτσι, στην έξοδο του εναλλάκτη έχουμε μίγμα υγρού – αερίου, σε αντίθεση με τα συστήματα «ξηρής» εκτόνωσης, όπου στην έξοδο του εναλλάκτη έχουμε 100% (ελαφρά υπέρθερμο) αέριο. Στη τελευταία περίπτωση, η παροχή προς τον εναλλάκτη είναι όση ακριβώς απαιτείται για να εξασφαλίζει τον απαιτούμενο ρυθμό εξάτμισης<sup>1</sup> (υπενθυμίζεται ότι το ψυκτικό φορτίο απορροφάται μέσω της λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης).

Στα συστήματα υπερπλήρωσης υπάρχει ένα κεντρικό δοχείο αποθήκευσης «παγωμένου» ψυκτικού ρευστού (low pressure receiver), όπου εκτονώνεται το υγρό ψηλής πίεσης που προέρχεται από την συμπύκνωση (high pressure receiver), πιθανά κατόπιν υπόψυξης. Το «παγωμένο» υγρό κατόπιν διανέμεται στους εναλλάκτες με βεβαιασμένη κυκλοφορία (με χρήση αντλίας). Ένα ποσοστό του υγρού εξατμίζεται εντός των εναλλακτών για να απορροφήσει το ψυκτικό φορτίο. Κατά την εξάτμιση αυτή δεν υπάρχει flash gas, αφού δεν υπάρχει εκτόνωση. Σε ολόκληρο τον εναλλάκτη επικρατεί θεωρητικά σταθερή πίεση, ίση με την πίεση εξάτμισης. Το flash gas της εκτόνωσης σχηματίζεται στο δοχείο και διοχετεύεται κατευθείαν στο συμπιεστή,

<sup>1</sup> Η παροχή είναι μεγαλύτερη από τον απαιτούμενο ρυθμό εξάτμισης κατά την ποσότητα του (παρασιτικού) flash gas που σχηματίζεται κατά τη δίοδο από την εκτονωτική βαλβίδα (εκτόνωση).

χωρίς να περάσει από τον εναλλάκτη. Το μίγμα υγρού – αερίου που εξέρχεται από τους εναλλάκτες συγκεντρώνεται σε μια κεντρική γραμμή αναρρόφησης (γνωστή και σαν υγρή αναρρόφηση), η οποία επιστρέφει στο δοχείο χαμηλής πίεσης, όπου διαχωρίζεται το υγρό (στο κάτω μέρος) από το αέριο (στο επάνω μέρος). Από το επάνω μέρος ξεκινάει η (ξηρή) γραμμή αναρρόφησης προς τους συμπιεστές, οι οποίοι ανεβάζουν τη πίεση του αερίου, το οποίο τελικά συμπυκνώνεται στους συμπυκνωτές κ.ο.κ. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται ένα διάγραμμα λειτουργίας ενός συστήματος υπερπλήρωσης.



### Διάγραμμα λειτουργίας ενός συστήματος υπερπλήρωσης.

Τα συστήματα υπερπλήρωσης παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα, ειδικά σε εφαρμογές πολύ χαμηλών θερμοκρασιών, όπου εφαρμόζονται σχεδόν αποκλειστικά. Τούτα είναι:

1. Η επιφάνεια του εναλλάκτη χρησιμοποιείται πιο αποδοτικά. Στα συστήματα «ξηρής» εκτόνωσης, προς το τέλος της διαδρομής στον εναλλάκτη, η επιφάνειά του τελευταίου χρησιμοποιείται για να υπερθερμάνει το (κορεσμένο) αέριο, ώστε να εξασφαλιστεί ότι δεν παρασύρονται υγρές μάζες στο συμπιεστή. Η επιφάνεια αυτή παρουσιάζει μειωμένη ικανότητα ( $Q$ ), λόγω μειωμένου συντελεστή θερμικής μεταφοράς ( $U$ ) και μειωμένης διαφοράς θερμοκρασίας  $\Delta T$  μεταξύ του ψυκτικού ρευστού και του περιβάλλοντος ρευστού (π.χ. αέρα). Αντίθετα, στους εναλλάκτες υπερπλήρωσης το ψυκτικό ρευστό παραμένει υγρό σε ένα ικανό ποσοστό ακόμα και στην έξοδο του εναλλάκτη, χωρίς ίχνος υπερθέρμανσης, με αποτέλεσμα να είναι πλήρως ενεργή η συνολική επιφάνεια του εναλλάκτη και μεγαλύτερα τα  $U$  και  $\Delta T$ , άρα μεγαλύτερη η ικανότητα  $Q$  του εναλλάκτη.

2. Στο δοχείο χαμηλής πίεσης επικρατεί κατάσταση κορεσμού. Ο ατμός που αναχωρεί από το επάνω μέρος του προς τους συμπιεστές είναι κορεσμένος και φθάνει στην αναρρόφηση του συμπιεστή με μια ελαφρά υπερθέρμανση, που προέρχεται από την πτώση πίεσης και τη θερμότητα που «κερδίζει» κατά τη συνήθως μικρή διαδρομή μεταξύ δοχείου και συμπιεστή. Τούτο σημαίνει χαμηλή υπερθέρμανση στον ατμό αναρρόφησης, που καταλήγει σε μεγαλύτερη ψυκτική ικανότητα λόγω μεγαλύτερης πυκνότητας ατμού αναρρόφησης και χαμηλότερη θερμοκρασία του (υπέρθερμου) ατμού κατάθλιψης, που καταλήγει σε πιο «ξεκούραστο» συμπιεστή και μεγαλύτερη αντοχή στο λάδι. Το αποτέλεσμα είναι εξοικονόμηση ενέργειας και χαμηλότερη φθορά συμπιεστή.
3. Το παρασιτικό αέριο της εκτόνωσης (flash gas) σχηματίζεται στο δοχείο διαχωρισμού (όπου γίνεται και η εκτόνωση) και διοχετεύεται κατευθείαν στο συμπιεστή, παρά να διαπερνάει τον εξατμιστή. Έτσι και ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς του εξατμιστή βελτιώνεται και οι πτώσεις πίεσης εντός του εξατμιστή και στις γραμμές αναρρόφησης είναι μειωμένες λόγω μειωμένης ποσότητας αερίου.
4. Όπως είναι γνωστό, οι πτώσεις πίεσης είναι μεγαλύτερες στις γραμμές αερίων παρά στις γραμμές υγρών. Στα συστήματα υπερπλήρωσης υπάρχει μεγαλύτερο ποσοστό γραμμών υγρού (ή γραμμών μίγματος με πλήρωση υγρού σε μεγάλο ποσοστό), άρα η συνολικές πτώσεις πίεσης είναι μικρότερες στα συστήματα υπερπλήρωσης, σε σχέση με τα συστήματα «ξηρής» εκτόνωσης.
5. Στα συστήματα υπερπλήρωσης, η τροφοδοσία υγρού μέσω των βαλβίδων τροφοδοσίας των εναλλακτών γίνεται υπό σταθερή πίεση (εξαρτώμενη από τα χαρακτηριστικά της αντλίας) και είναι ανεξάρτητη από την πίεση συμπίκνωσης. Στα συστήματα «ξηρής» εκτόνωσης, η πίεση τροφοδοσίας του υγρού υψηλής πίεσης στην εκτονωτική βαλβίδα εξαρτάται από τη πίεση συμπίκνωσης, η οποία είναι υψηλή το καλοκαίρι και χαμηλή το χειμώνα. Στην τελευταία περίπτωση, αν είναι πολύ χαμηλή, είναι πιθανό να απαιτείται τεχνητή άνοδος (αύξηση ενεργειακού κόστους) για την ορθή λειτουργία της εκτονωτικής βαλβίδας.
6. Το σύστημα υπερπλήρωσης παρουσιάζει ένα σημαντικό πλεονέκτημα στη διαχείριση λαδιού, ειδικά στα συστήματα αμμωνίας: Ενώ στους εναλλάκτες ξηρής εκτόνωσης, το λάδι (που τυπικά είναι αδιάλυτο με την αμμωνία) πρέπει να συλλέγεται ατομικά σε κάθε εναλλάκτη, στα συστήματα υπερπλήρωσης το λάδι «παρασύρεται» στο δοχείο χαμηλής πίεσης, από όπου συλλέγεται κεντρικά και εύκολα.

Υπάρχουν όμως και κάποια μειονεκτήματα στα συστήματα υπερπλήρωσης, τα οποία πρέπει να σταθμίζονται κατά το σχεδιασμό. Τούτα είναι τα εξής:

1. Εν γένει μεγαλύτερες διαμέτροι σωλήνων. Το υγρό που μεταφέρεται στους εναλλάκτες είναι «πλεονάζον»: Ένα μέρος προορίζεται για εξάτμιση και ένα μέρος για ανακύκλωση. Τούτο

μεταφράζεται σε αυξημένη παροχή, άρα μεγαλύτερη διάμετρο (υπό σταθερή ταχύτητα). Επίσης, οι γραμμές επιστροφής από τους εναλλάκτες προς το δοχείο χαμηλής πίεσης φέρουν μίγμα υγρού – αερίου (υγρές αναρροφήσεις), πράγμα που οδηγεί σε επιλογή μεγαλύτερων διαμέτρων σε σχέση με τις γραμμές μεταφοράς μόνο αερίου.

2. Οι γραμμές τροφοδοσίας προς τους εναλλάκτες μεταφέρουν «παγωμένο» - υπόψυκτο ψυκτικό υγρό, που σημαίνει ότι πρέπει να μονώνονται. Αυτό δεν ισχύει τουλάχιστον στα απλά συστήματα «ξηρής» εκτόνωσης, όπου οι γραμμές τροφοδοσίας μεταφέρουν «ζεστό» υγρό ψηλής πίεσης (εκτός αν υποψύχεται σε εσωτερικό εναλλάκτη).
3. Απαιτείται εγκατάσταση αντλίας(ών) (κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας).
4. Η ποσότητα του ψυκτικού ρευστού είναι πολύ μεγαλύτερη. Τούτο αποτελεί πρόβλημα, τόσο στην αμμωνία (θέματα ασφάλειας), όσο και στους αλογονάνθρακες, όπου η αυστηρότητα της νομοθεσίας κλιμακώνεται ανάλογα με το βάρος του περιεχομένου ρευστού. Δεν υφίσταται βεβαίως τέτοιο θέμα στα συστήματα CO<sub>2</sub>, όπου δεν υπάρχουν περιορισμοί στις ποσότητες ρευστού. Σε κάθε περίπτωση πάντως, οι μεγάλες ποσότητες πλήρωσης ρευστού «ενοχλούν».

Γενικά, υπάρχουν ενδείξεις ότι σε τυπικές εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών και μεγάλου πλήθους εξατμιστών τα πλεονεκτήματα υπερτερούν έναντι των μειονεκτημάτων. Η λύση της υπερπλήρωσης προσφέρει αποδοτικότερη λειτουργία των συμπιεστών, δεδομένου του χαμηλού βαθμού υπερθέρμανσης στην αναρρόφηση του συμπιεστή και της βελτιωμένης ικανότητας των εξατμιστών που δίνει περιθώρια για ανύψωση της πίεσης αναρρόφησης.

Μια συνήθης πρακτική σε ανάμικτες εφαρμογές χαμηλών – μέσω θερμοκρασιών, είναι οι χαμηλές θερμοκρασίες (καταψύξεις) να εξυπηρετούνται με υπερπλήρωση και οι μεσαίες θερμοκρασίες (συντηρήσεις) με κατευθείαν εκτόνωση του υγρού ψηλής πίεσης ή με χρήση δευτερεύοντος ρευστού. Ένα παραδοσιακό κριτήριο, είναι σε απλές εγκαταστάσεις (λίγοι εναλλάκτες) να γίνεται χρήση «ξηρής» εκτόνωσης, ενώ σε πιο σύνθετες να χρησιμοποιείται το σύστημα της υπερπλήρωσης. Ένας παραδοσιακός πρόχειρος κανόνας, είναι να επιλέγεται υπερπλήρωση σε συστήματα που ο αριθμός των εναλλακτών υπερβαίνει τους 3 – 5. Προϊδεάζουμε πάντως, όπως θα δούμε και σε επόμενο άρθρο, ότι η τεχνολογία βελτιστοποίησης των συστημάτων ξηρής εκτόνωσης αμμωνίας έχει προχωρήσει χάριν μείωσης της ποσότητας πλήρωσης και σήμερα υπάρχουν πολύ μεγάλα συγκροτήματα βιομηχανικής ψύξης αμμωνίας με ξηρή εκτόνωση.

## **ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

Νίκος Χαριτωνίδης «ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΨΥΞΗΣ – ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΑΜΜΩΝΙΑ», 2020.