

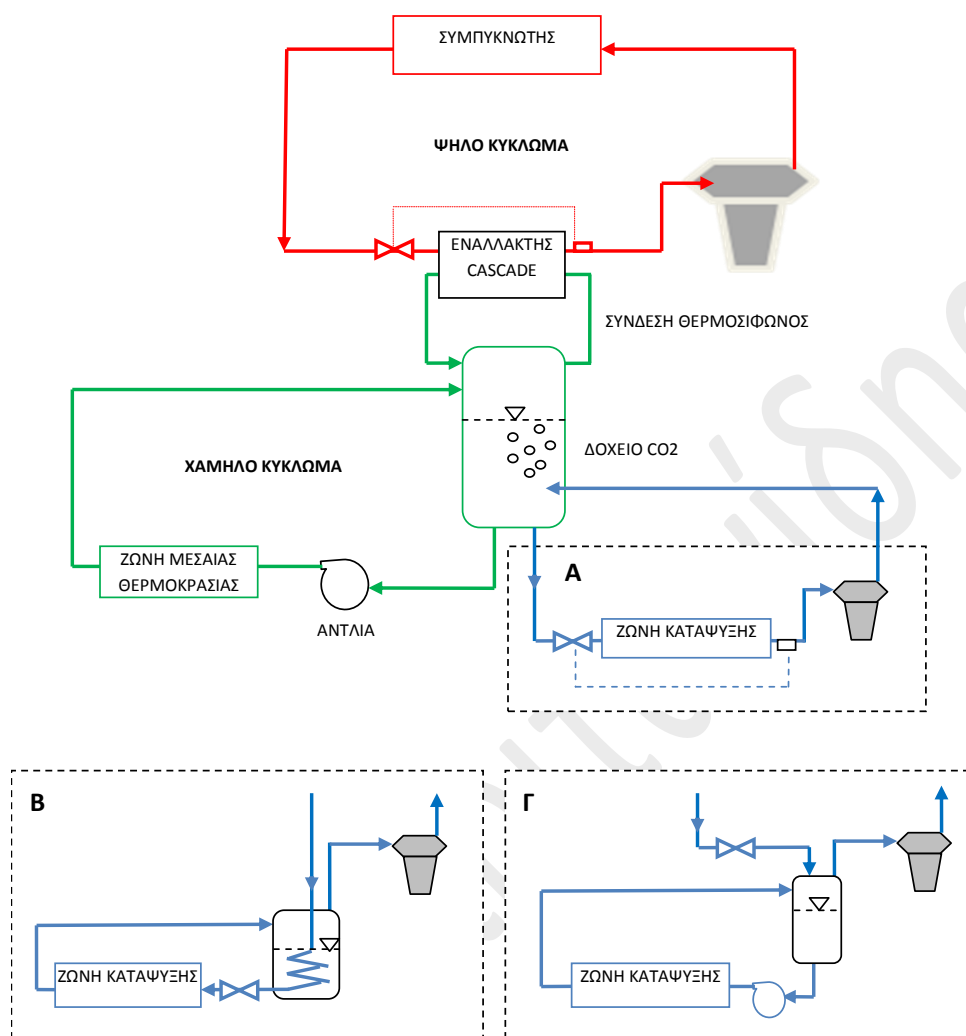
8-3-22

ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΨΥΞΗ ΜΕ CO₂ - 3

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

ΚΛΙΜΑΚΩΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΜΠΟΡΙΚΗΣ ΨΥΞΗΣ (CASCADE)

Γνωρίζουμε ότι το αδύνατο σημείο του CO₂ είναι το χαμηλό του κρίσιμο σημείο. Τούτο καθιστά τους κύκλους με συμπύκνωση σε "κανονικές" θερμοκρασίες περιβάλλοντος (ακόμα και τις σχετικά χαμηλές) μη αποδοτικούς. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην ιδέα του κλιμακωτού συστήματος: Δυο ανεξάρτητα μεταξύ τους κυκλώματα, το "χαμηλό" και το "ψηλό". Στο παρόν, το ρευστό του χαμηλού κυκλώματος θα είναι το CO₂ και του ψηλού ένα άλλο ρευστό, ιδανικά φυσικό (αμμωνία, υδρογονάνθρακας). Η μοναδική αποστολή του ψηλού κυκλώματος είναι να εξασφαλίζει χαμηλή θερμοκρασία συμπύκνωσης στο CO₂ σε σχέση με το κρίσιμο του σημείο, ώστε να καταστήσει τον κύκλο του αποδοτικό. Προς τούτο, ο εξατμιστής του ψηλού κυκλώματος έχει σαν μοναδικό προορισμό να ψύχει το συμπυκνωτή του χαμηλού κυκλώματος. Η θερμοκρασία συμπύκνωσης του CO₂ πρέπει να είναι αρκούντως χαμηλή (μακράν του κρίσιμου σημείου), για να "πιάσει" καλό COP. Μια συνηθισμένη τέτοια θερμοκρασία είναι οι -10° C. Η εξάτμιση του ρευστού του ψηλού κυκλώματος πρέπει να γίνεται τουλάχιστον 5 K χαμηλότερα, στην παραπάνω περίπτωση -15° C. Η εξάτμιση του ρευστού ψηλού κυκλώματος και η συμπύκνωση του CO₂ γίνονται ταυτόχρονα και χωρίς μεταξύ τους ανάμιξη σε έναν ενιαίο σύνθετο εναλλάκτη, που είναι γνωστός σαν *εναλλάκτης cascade*. Είναι το μοναδικό σημείο "σύζευξης" των δυο κυκλωμάτων. Το CO₂ στο χαμηλό κύκλωμα μπορεί να εξυπηρετεί ζώνες μεσαίας και χαμηλής θερμοκρασίας, με κατευθείαν τροφοδοσία ή έμμεση ψύξη, όπως θα δούμε στα επόμενα. Στο "ψηλό" κύκλωμα μπορεί να χρησιμοποιείται οποιοδήποτε συνθετικό ή φυσικό ρευστό. Είναι σαφές, ότι για βιώσιμη εγκατάσταση η επιλογή πρέπει να είναι φυσικό ρευστό (αμμωνία, υδρογονάνθρακας). Η "επικινδυνότητα" αυτού του ρευστού (π.χ. αμμωνία, προπάνιο, βουτάνιο, ισοβουτάνιο) δεν ενοχλεί, δεδομένου ότι η ποσότητα είναι μικρή και περιορίζεται στο μηχανοστάσιο. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η διάταξη ενός κλιμακωτού συστήματος με μεσαία και χαμηλή ζώνη θερμοκρασίας, αμφότερες με CO₂.



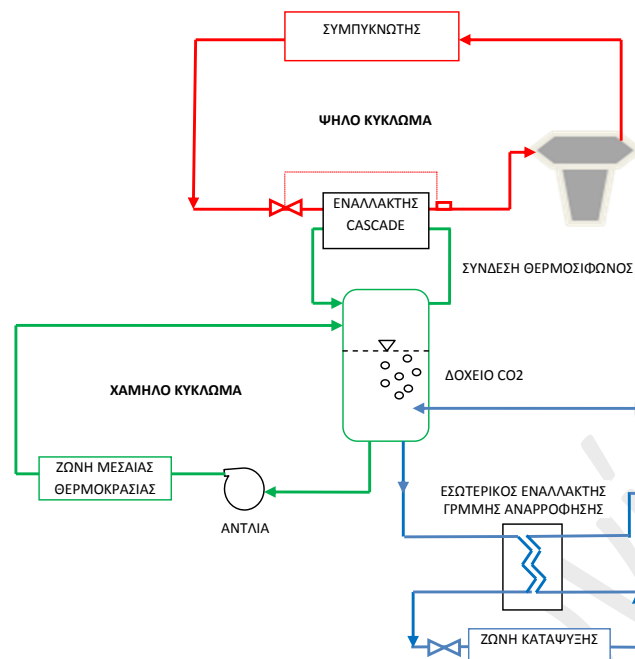
Σχήμα 1: Κλιμακωτό σύστημα με δυο θερμοκρασιακές ζώνες και εναλλακτικές τεχνικές στη ζώνη κατάψυξης.

Στο σχήμα μπορούμε να κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις:

- ❖ Το πρωτεύον κύκλωμα είναι ένα απλό κύκλωμα ξηρής εκτόνωσης.
- ❖ Το κύκλωμα μεσαίας θερμοκρασίας εξυπηρετείται με CO₂ με έμμεση ψύξη (κυκλοφορία με αντλία).
- ❖ Υπάρχει ένα δοχείο CO₂ υψομετρικά χαμηλότερα από τον εναλλάκτη cascade. Η κυκλοφορία του CO₂ από και προς τον εναλλάκτη cascade γίνεται με θερμοσιφωνική σύνδεση. Η λύση αυτή είναι προτιμότερη από την κατευθείαν τροφοδοσία του εναλλάκτη cascade με CO₂. Στη τελευταία περίπτωση, η λειτουργία του εναλλάκτη διαταράσσεται από απότομες εναλλαγές φορτίου. Αντίθετα, η μέθοδος "δοχείο CO₂ / θερμοσίφων" εξομαλύνει τις απότομες αυξομειώσεις, που "ξεσπάνε" στο δοχείο.

- ❖ Στο κύκλωμα χαμηλής θερμοκρασίας προτείνονται τρεις εναλλακτικές λύσεις:
1. **Η πρώτη λύση (Α)** είναι η πιο οικονομική και πρόκειται για μια απλή ξηρή εκτόνωση. Στη λύση αυτή, το υγρό CO₂ εξέρχεται από το δοχείο σε κατάσταση κορεσμού (όχι υπόψυκτο) και έχει θερμοκρασία χαμηλότερη από του περιβάλλοντος. Μέχρι να φθάσει στην εκτονωτική, θα υποστεί μια πτώση πίεσης και θα "κερδίσει" κάποια θερμότητα από το περιβάλλον. Συνεπώς θα επέλθει κάποια εξάτμιση (σχηματισμός flash gas). Το flash gas μειώνει την απόδοση της εκτονωτικής βαλβίδας. Η εκτονωτική βαλβίδα πρέπει να είναι υπερεκτιμημένη της τάξης του 30% για να "διαχειρίζεται" σωστά το flash gas. Είναι επίσης προφανές, ότι η γραμμή τροφοδοσίας προς την εκτονωτική πρέπει να είναι καλά μονωμένη.
 2. **Η δεύτερη λύση (Β)** προβλέπει την εγκατάσταση ενός δοχείου υπόψυξης (και διαχωρισμού) αμέσως πριν την εκτονωτική. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η πίεση εντός αυτού του δοχείου ταυτίζεται με την πίεση αναρρόφησης της χαμηλής. Με την υπόψυξη αποκλείεται η παρουσία flash gas στην είσοδο της εκτονωτικής και βελτιώνεται ο COP. Η ύπαρξη του δοχείου διαχωρισμού στην αναρρόφηση του συμπιεστή εξασφαλίζει την μη διείσδυση υγρού στο συμπιεστή. Συνεπώς δεν είναι απαραίτητη η υπερθέρμανση στο τέλος του εξατμιστή, άρα έχουμε και αύξηση του συνολικού συντελεστή θερμικής μεταφοράς. Προφανώς αυτή η μέθοδος κοστίζει περισσότερο.
 3. **Η τρίτη λύση (Γ)** πρόκειται για τη γνωστή μας υπερτροφοδότηση. Η εκτόνωση γίνεται μέσα σε ένα δεύτερο δοχείο (χαμηλής) CO₂, όπου διαχωρίζεται το υγρό - αέριο. Το υγρό προσάγεται σε αντλία, η οποία το καθιστά υπόψυκτο (του αυξάνει την πίεση υπό σταθερή θερμοκρασία). Ο εναλλάκτης τροφοδοτείται με πολλαπλάσια ποσότητα από την απαραίτητη προς εξάτμιση. Όπως γνωρίζουμε, η υπερτροφοδότηση αυξάνει το συνολικό συντελεστή θερμικής μεταφοράς του εναλλάκτη, άρα βελτιώνει και το COP. Από την άλλη πλευρά, υπάρχει το πρόσθετο κόστος κατανάλωσης της αντλίας, που όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο άρθρο δεν είναι σημαντικό. Προφανώς, η λύση αυτή έχει αυξημένο κόστος, για τούτο προτιμάται σε μεγάλες εγκαταστάσεις εμπορικής ψύξης ή στη βιομηχανική ψύξη.

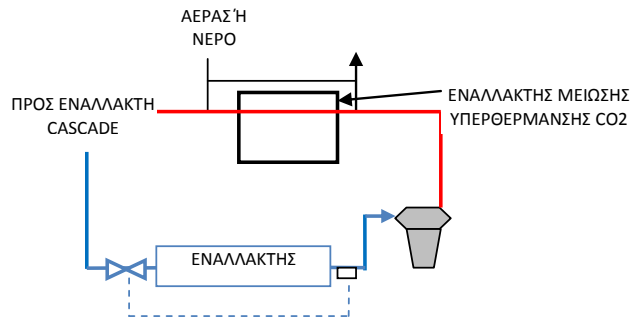
Μια παραλλαγή της λύσης Α, είναι η υπόψυξη του (κορεσμένου) υγρού τροφοδοσίας με εγκατάσταση εσωτερικού εναλλάκτη, που μεταφέρει θερμότητα από το υγρό τροφοδοσίας, στην αναρρόφηση του συμπιεστή. Στη περίπτωση αυτή, το υγρό τροφοδοσίας υποψύχεται μερικούς βαθμούς (και έτσι εξαφανίζεται ο σχηματισμός του flash gas), ενώ το CO₂ στην έξοδο του εξατμιστή που μπορεί να είναι (σχεδόν) κορεσμένο αποκτά την απαραίτητη υπερθέρμανση (έναντι ασφάλειας εισόδου υγρού στο συμπιεστή) μέσω της διέλευσης από τον εσωτερικό εναλλάκτη. Η διάταξη αυτή φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 2: Κλιμακωτό σύστημα με δυο θερμοκρασιακές ζώνες και εγκατάσταση εσωτερικού εναλλάκτη γραμμής αναρρόφησης.

Σε κάθε περίπτωση των ως άνω εναλλακτικών λύσεων, η κατάθλιψη του συμπιεστή CO₂ οδηγείται σε "λουτρό" εντός του δοχείου CO₂. Έτσι, στον εναλλάκτη cascade οδηγείται πάντα (σχεδόν) κορεσμένο αέριο (μέσω της θερμοσιφωνικής δράσης).

Τα κλιμακωτά συστήματα μπορεί να βελτιώσουν την απόδοσή τους, αν υπάρχει η δυνατότητα να μειωθεί με εύκολο και οικονομικό τρόπο η υπερθέρμανση του ατμού κατάθλιψης του συμπιεστή CO₂. Για παράδειγμα, αν υπάρχει υπερθέρμανση 7K στην είσοδο του συμπιεστή, σε συνθήκες ισεντροπικής συμπίεσης, με εξάτμιση -37° C και συμπύκνωση -4° C, ο ατμός CO₂ εξέρχεται από το συμπιεστή σε θερμοκρασία περίπου 38°. Αν ο καιρός είναι ψυχρότερος ή υπάρχει διαθέσιμη πηγή νερού, επιτυγχάνεται μείωση της υπερθέρμανσης από "δωρεάν" πηγή, πράγμα που μειώνει το ψυκτικό φορτίο της ψηλής βαθμίδας. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται διαγραμματικά η λύση της μείωσης υπερθέρμανσης (desuperheating).



Σχήμα 3: Βελτίωση της απόδοσης κλιμακωτού συστήματος με μείωση της υπερθέρμανσης ατμού κατάθλιψης από "δωρεάν" πηγή (desuperheater).