

ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΨΥΞΗ ΜΕ CO₂ - 4

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

ΑΜΙΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CO₂ TRANSCRITICAL - SUBCRITICAL ΕΜΠΟΡΙΚΗΣ ΨΥΞΗΣ

Αν ο χρήστης του συστήματος εμπορικής ψύξης επιθυμεί την αποκλειστική χρήση CO₂ σε όλα τα κυκλώματά του, πρέπει να γνωρίζει τα μειονεκτήματα της επιλογής του και να προσπαθήσει να τα αντιμετωπίζει αποτελεσματικά. Το χαρακτηριστικό μειονέκτημα του ψυκτικού κύκλου CO₂ είναι το χαμηλό του κρίσιμο σημείο. Το γεγονός αυτό οδηγεί τον κύκλο στην περιοχή transcritical, από σχετικά χαμηλά θερμοκρασιακά επίπεδα περιβάλλοντος (ambient) και πάνω. Να υπενθυμίσουμε, ότι χονδρικά σαν οριακό σημείο μετάβασης από κύκλο subcritical σε κύκλο transcritical ορίζεται η συνθήκη περιβάλλοντος (ambient) που εξαρτάται από το είδος του συμπυκνωτή / ψύκτη αερίου: Αν είναι αερόψυκτος, το σημείο αυτό είναι περίπου η θερμοκρασία *ξηρού βολβού* $28-15 = 13^{\circ} \text{C}$. Αν γίνεται χρήση εξατμιστικού συμπυκνωτή / ψύκτη αερίου, είναι περίπου η θερμοκρασία *υγρού βολβού* $28-6 = 22^{\circ} \text{C}^1$. Εφόσον ο κύκλος transcritical είναι υπαρκτή πιθανότητα, ο χρήστης πρέπει να εξασφαλίζει σε αυτή την περίπτωση την βέλτιστη πίεση κατάθλιψης (απαραίτητο στα συστήματα transcritical). Επίσης, έχοντας υπόψη ότι ο transcritical κύκλος του CO₂ έχει ενδογενή χαρακτηριστικά που "πιέζουν" προς τα κάτω το COP, πρέπει να εξαντλεί τις ποικίλες δυνατότητες βελτίωσης του κύκλου. Στα επόμενα θα εξετάσουμε δυο διαδομένες κατηγορίες που χρησιμοποιούνται στην εμπορική ψύξη, (α) τη χρήση *παράλληλων συστημάτων* (μονοβάθμιων η διβάθμιων) και (β) τη χρήση του *συστήματος booster* (διβάθμιο).

ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CO₂ ΕΜΠΟΡΙΚΗΣ ΨΥΞΗΣ

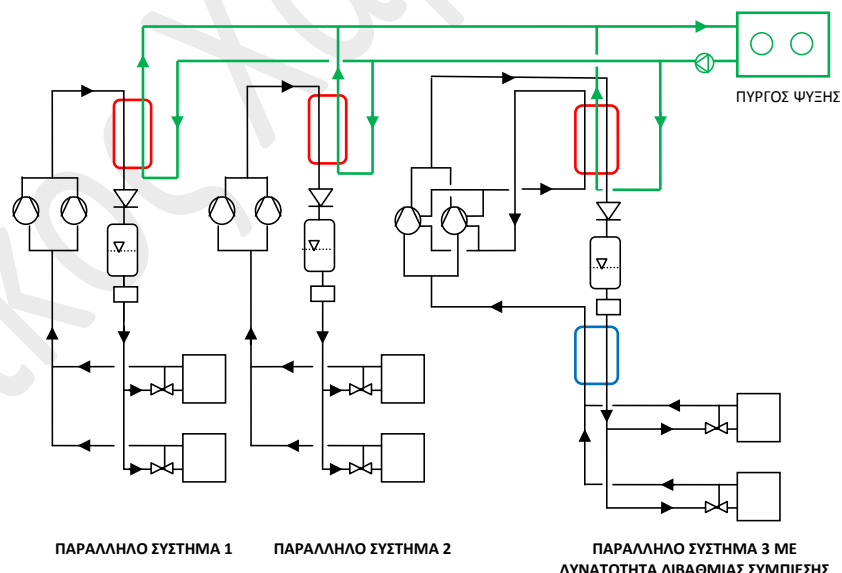
Η πιο χαρακτηριστικές εφαρμογές εμπορικής ψύξης είναι τα σούπερ μάρκετ, όπου πάντα υπάρχουν δυο χαρακτηριστικές ζώνες θερμοκρασίας: Η μεσαία (συντήρηση $0-5^{\circ} \text{C}$) και η χαμηλή (κατάψυξη $< -18^{\circ} \text{C}$). Αν είναι επιθυμητό ο σχεδιασμός να παραμείνει στο απλοϊκό επίπεδο του ψυκτικού κύκλου, η πιο απλή λύση είναι να εγκατασταθούν δυο ανεξάρτητοι (παράλληλοι) κύκλοι, ένας για τη μεσαία ζώνη και ένας για τη χαμηλή. Οι δυο κύκλοι βελτιστοποιούνται ανεξάρτητα, ανάλογα με τις δικές τους συνθήκες. Πρόκειται για δυο απλά συστήματα ξηράς εκτόνωσης. Ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες, ο ψύκτης αερίου μπορεί

¹ Σε αερόψυκτους συμπυκνωτές, η θερμοκρασία συμπύκνωσης μπορεί να επιτευχθεί σε επίπεδο περίπου 15°C πάνω από τη θερμοκρασία ξηρού βολβού του αέρα περιβάλλοντος. Με χρήση όμως εξατμιστικού συμπυκνωτή υπάρχει η δυνατότητα να γίνει συμπύκνωση σε μόλις 6°C πάνω από τη θερμοκρασία υγρού βολβού, που σε ξηρά κλίματα είναι αρκετά χαμηλότερη από του ξηρού βολβού, άρα οι πιθανότητες επίτευξης subcritical κύκλου είναι περισσότερες. Σε κάθε περίπτωση, σαν μέγιστη θερμοκρασία που μπορούμε να θεωρήσουμε ότι γίνεται "αξιοπρεπής" συμπύκνωση του CO₂ λαμβάνουμε τους 28°C .

να μεταπέσει σε συμπυκνωτή (οπότε και σταματάει η ρύθμιση της ψηλής πίεσης). Αμφότερα τα συστήματα υιοθετούν εσωτερικό εναλλάκτη στο σημείο τροφοδοσίας εξατμιστών - αναρρόφησης συμπιεστή. Το σύστημα της κατάψυξης μπορεί να είναι διβάθμιο, ώστε να μειωθεί ο λόγος συμπίεσης σε κάθε συμπιεστή και να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος. Στη κατάθλιψη του συμπιεστή χαμηλής βαθμίδας τοποθετείται εξωτερικός εναλλάκτης που προσφέρει ενδιάμεση ψύξη για τη μείωση τη υπερθέρμανσης του ατμού αναρρόφησης του συμπιεστή δεύτερης βαθμίδας.

Η διαχείριση λαδιού στα παράλληλα κυκλώματα είναι σχετικά απλή υπόθεση: Αφενός εγκαθίστανται ελαιοσυλλέκτες στις καταθλίψεις των συμπιεστών και αφετέρου γίνεται προσεκτική διαστασιολόγηση των σωλήνων αναρρόφησης, ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής ταχύτητα και να "παρασύρεται" το λάδι πίσω στο συμπιεστή.

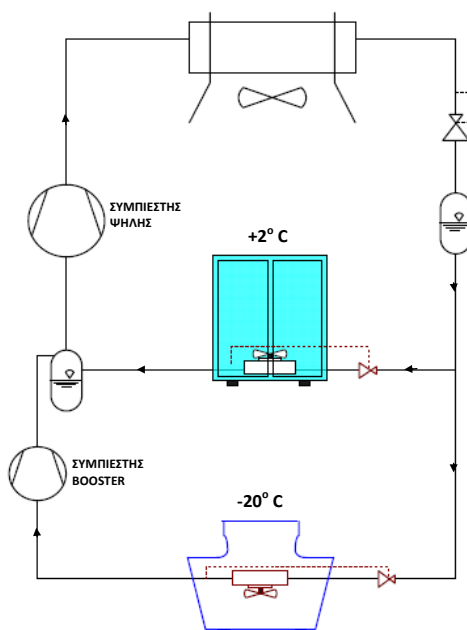
Σε παράλληλα transcritical συστήματα που όπως αναφέραμε είναι εντελώς αυτόνομα, μπορεί να γίνει χρήση κοινού πύργου ψύξης, με χρήση δευτερεύοντος κυκλώματος νερού. Το νερό ψύχεται σε ένα κεντρικό πύργο ψύξης και διοχετεύεται στους συμπυκνωτές / ψύκτες αερίου οποιουδήποτε παράλληλου κύκλωματος ή άλλου συστατικού, όπως για παράδειγμα συστήματος desuperheating για ενδιάμεση ψύξη διβαθμίου. Η λογική φαίνεται στο επόμενο σχήμα, όπου φαίνεται μια "έξυπνη" διάταξη μετάπτωσης από μονοβάθμιο σε διβάθμιο σε ένα από τα παράλληλα συστήματα.



Σχήμα 1: Παράλληλα transcritical συστήματα με κεντρικό κύκλωμα νερού για τους ψύκτες αερίου και ενδιάμεση ψύξη.

ΣΥΣΤΗΜΑ CO₂ BOOSTER ΕΜΠΟΡΙΚΗΣ ΨΥΞΗΣ

Η ορολογία "booster" (ωθητής) προέρχεται από την πρακτική της καθιέρωσης ενός πρώτου βήματος (ώθησης) συμπίεσης (boost) από πολύ χαμηλά επίπεδα πίεσης, που συναντώνται σε εξατμιστές βαθιάς κατάψυξης. Ο πρώτος αυτός συμπιεστής έχει καθιερωθεί με την ορολογία "booster". Είναι αυτονόητο, ότι η ύπαρξη συμπιεστή booster συνεπάγεται και την ύπαρξη συμπιεστή επόμενης (ψηλής) βαθμίδας, ο οποίος παραλαμβάνει το αέριο από τον booster και το καταθλίβει στον ψύκτη αερίου/ συμπυκνωτή ή πιθανά σε επόμενο βήμα συμπίεσης. Η λογική του συστήματος booster είναι απλή: Το υγρό υψηλής πίεσης τροφοδοτείται ταυτόχρονα στους εξατμιστές συντήρησης και κατάψυξης. Ο ατμός στην έξοδο των εξατμιστών κατάψυξης παραλαμβάνεται από τον συμπιεστή booster και "ωθείται" σε ένα δοχείο, το οποίο ταυτόχρονα υποδέχεται και τον ατμό από τους εξατμιστές της συντήρησης. Το αέριο από το επάνω μέρος του δοχείου παραλαμβάνεται από τον συμπιεστή ψηλής, ο οποίος και το στέλνει στον ψύκτη αερίου. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται ένα απλό σύστημα booster.

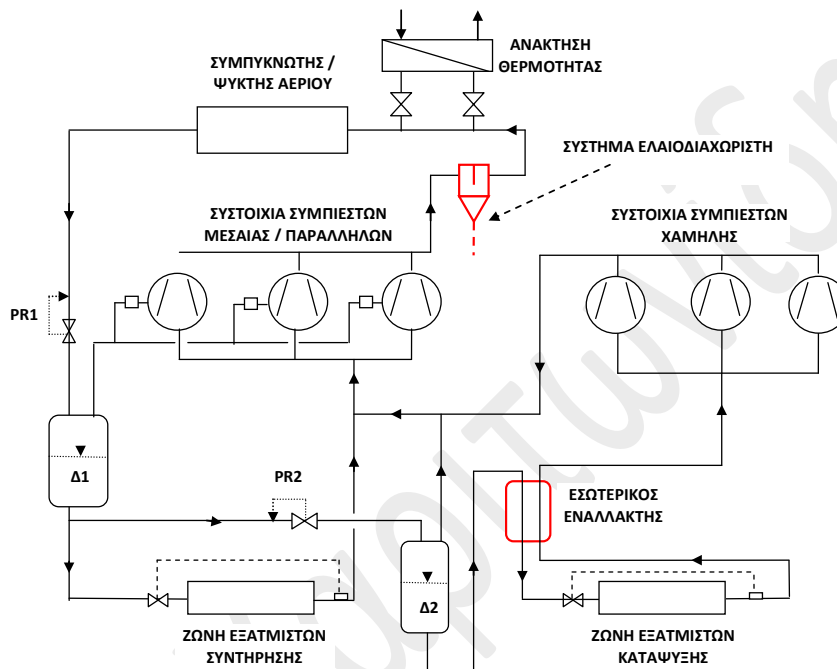


Σχήμα2: Απλό σύστημα booster με ξηρή εκτόνωση σε όλους τους εξατμιστές.

Όλα τα συστήματα βελτίωσης μπορούν να εφαρμοστούν και στα συστήματα booster.

ΕΝΑ ΕΞΕΛΙΓΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ BOOSTER CO₂ ΕΜΠΟΡΙΚΗΣ ΨΥΞΗΣ

Ένα εξελιγμένο σύστημα booster φέρει ποικίλες βελτιώσεις, η βασικότερη των οποίων είναι ότι η "μακρά" εκτόνωση του υπερκρίσιμου αερίου γίνεται με "ρέγουλο", ήτοι σε τέσσερα στάδια. Το σύστημα είναι διβάθμιο, έχει δυνατότητα παράλληλης συμπίεσης, διαθέτει δυο δοχεία CO₂, εσωτερικό εναλλάκτη στο κύκλωμα κατάψυξης και ανάκτηση θερμότητας. Η διάταξη φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 3: Εξελιγμένο σύστημα εμπορικής ψύξης booster με ποικίλες βελτιώσεις.

Τα σημεία που αξίζουν προσοχή στο σύστημα αυτό είναι τα εξής:

- ❖ Το σύστημα έχει τέσσερις χαρακτηριστικές πιέσεις, την (βελτιστοποιημένη) P_1 (ψύκτης αερίου), P_2 (δοχείο Δ_1 , αναρρόφηση παράλληλης συμπίεσης όταν ενεργοποιείται), P_3 (εξατμιστές συντήρησης, κατάθλιψη συμπιεστών χαμηλής / αναρρόφηση συμπιεστών υψηλής, δοχείο Δ_2) και P_4 (εξατμιστές κατάψυξης).
- ❖ Η βέλτιστη πίεση transcritical P_1 ρυθμίζεται με τη βαλβίδα PR_1 (Back Pressure Regulator).
- ❖ Όταν είναι απενεργοποιημένη η παράλληλη συμπίεση, η πίεση P_2 που επικρατεί στο δοχείο Δ_1 ρυθμίζεται από τη βαλβίδα PR_2 σε ένα επίπεδο (λίγο) πάνω από την ενδιάμεση πίεση του συστήματος (P_3) που επικρατεί στο δοχείο Δ_2 .
- ❖ Από το κάτω μέρος του δοχείου Δ_1 (υγρό CO₂) διακλαδίζονται δυο γραμμές: Μια προς τους εξατμιστές συντήρησης (εκτόνωση από P_2 προς P_3) και μια προς το δοχείο Δ_2 (εκτόνωση από P_2 προς P_3). Η τελευταία, όπως είδαμε, φέρει και τη βαλβίδα PR_2 (μέσω της οποίας γίνεται η εκτόνωση) και καταλήγει στο δοχείο χαμηλής Δ_2 .

- ❖ Από το κάτω μέρος του δοχείου Δ_2 τροφοδοτείται υγρό προς τους εξατμιστές κατάψυξης, όπου γίνεται εκτόνωση από P_3 προς P_4 .
- ❖ Μεταξύ τροφοδοσίας υγρού από Δ_2 προς εξατμιστές κατάψυξης και κεντρική αναρρόφηση συμπιεστών κατάψυξης τοποθετείται εσωτερικός εναλλάκτης.
- ❖ Στην κεντρική αναρρόφηση συμπιεστών ψηλής συγκλίνουν η κεντρική αναρρόφηση εξατμιστών συντήρησης, η κατάθλιψη των συμπιεστών χαμηλής και η εξισωτική γραμμή από δοχείο Δ_2 (όλα σε πίεση P_3).
- ❖ Η παράλληλη συμπίεση επιτυγχάνεται με παράπλευρη λήψη από τους συμπιεστές ψηλής, οπωσδήποτε σε επίπεδο πίεσης P_2 ψηλότερο από την κανονική τους αναρρόφηση P_3 ($P_2 > P_3$)². Η χρήση της παράλληλης συμπίεσης είναι προαιρετική (π.χ. μόνο τις θερμές μέρες), όπως φαίνεται στη συνδεσμολογία του σχήματος.

² Οι παλινδρομικοί συμπιεστές με τροποποίηση Voorhees έχουν τη δυνατότητα παράπλευρης λήψης σε ενδιάμεσο σημείο της διαδρομής του εμβόλου, άρα σε ενδιάμεσο επίπεδο μεταξύ πιέσεων αναρρόφησης και κατάθλιψης.