

ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΨΥΞΗ ΜΕ CO₂ - 5

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

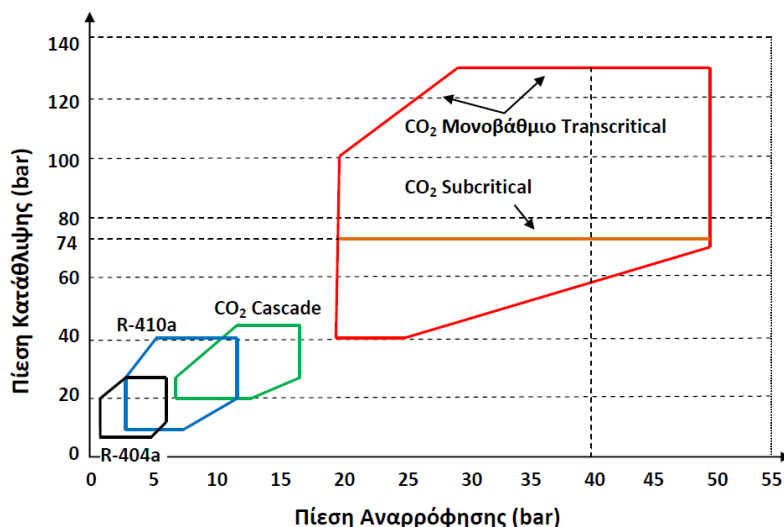
ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ CO₂

Οι ιδιαιτερότητες που διέπουν τη λειτουργία των συμπιεστών CO₂ είναι κατά βάση: (α) οι ψηλές πιέσεις λειτουργίας (6 - 140 bar), (β) η μεγάλη διαφορά πιέσεων λειτουργίας, μεταξύ πιέσεων κατάθλιψης και αναρρόφησης (μέχρι 100 bar) και (γ) η μεγαλύτερη πυκνότητα του ψυκτικού ρευστού σε σχέση με τα λοιπά ψυκτικά ρευστά που λειτουργούν σε παρόμοιες συνθήκες. Ο επόμενος πίνακας αφορά τη διαφορά πιέσεων αναρρόφησης - κατάθλιψης για σύστημα -15/+30 για διάφορα ρευστά. Η διαφορά πιέσεων είναι από 4 ως 8 φορές μεγαλύτερη στο CO₂ σε σχέση με τα συμβατικά ρευστά, ενώ ο λόγος συμπίεσης παραμένει ο χαμηλότερος. Να σημειωθεί ότι στις ως άνω συνθήκες, ο κύκλος CO₂ είναι οριακά υποκρίσιμος (κρίσιμη θερμοκρασία 31° C).

ΕΞΑΤΜΙΣΗ ΣΤΟΥΣ -15° C ΚΑΙ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ΣΤΟΥΣ 30° C				
ΨΥΚΤΙΚΟ ΡΕΥΣΤΟ	ΑΠΟΛΥΤΗ ΠΙΕΣΗ ΣΤΟΝ ΕΞΑΤΜΙΣΤΗ (bar)	ΑΠΟΛΥΤΗ ΠΙΕΣΗ ΣΤΟ ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗ (bar)	ΔΙΑΦΟΡΑ ΠΙΕΣΕΩΝ ΚΑΤΑΘΛΙΨΗΣ - ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗΣ	ΛΟΓΟΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ
R-22	3,0	11,9	8,9	4,0
R-134a	1,6	7,7	6,1	4,8
R-404a	3,6	14,1	10,5	3,9
R-410a	4,8	18,7	13,9	3,9
R-507a	3,8	14,6	10,8	3,8
R-717	2,4	11,6	9,2	4,8
R-744	22,5	71,8	49,3	3,2

Πίνακας 1: Διαφορά πιέσεων κατάθλιψης - αναρρόφησης – εξάτμιση στους -15° C και συμπύκνωση στους 30° C για ποικίλα ρευστά.

Θαυμάσια εποπτική εικόνα και συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των συμπιεστών ποικίλων ρευστών προσφέρουν τα διαγράμματα με τις περιβάλλουσες (ακραίες) συνθήκες λειτουργίας σε όρους πιέσεων αναρρόφησης και κατάθλιψης (application envelopes). Κάθε μηχανήμα έχει το δικό του διάγραμμα που προσφέρεται από τον κατασκευαστή του. Στο επόμενο σχήμα φαίνονται χαρακτηριστικά τέτοια διαγράμματα για υποκρίσιμες συνθήκες για τα R-404a, R-410a, CO₂ cascade και CO₂ μονοβάθμιο υποκρίσιμο και transcritical.



Σχήμα 1: Application envelopes συμπιεστών ποικίλων ρευστών.

Τα όρια πιέσεων που παρουσιάζονται στο προηγούμενο σχήμα είναι ενδεικτικά και εξαρτώνται από τον εκάστοτε κατασκευαστή. Η λογική του "application envelope", με βάση την οποία το προσφέρει ο κατασκευαστής, είναι η εξής: Για συγκεκριμένο συμπιεστή και ρευστό, σε διάγραμμα με οριζόντιο άξονα την πίεση αναρρόφησης και κατακόρυφο την πίεση κατάθλιψης ορίζονται δυο κατακόρυφες που εκπροσωπούν το ελάχιστο και μέγιστο όριο πιέσεων αναρρόφησης. Μεταξύ των δυο αυτών κατακορύφων σχεδιάζονται μια άνω και μια κάτω καμπύλη που ορίζουν το ελάχιστο και μέγιστο όριο πιέσεων κατάθλιψης. Έτσι ορίζεται μια κλειστή περιοχή (περιβάλλουσα), που καθορίζει το εύρος των επιτρεπόμενων πιέσεων αναρρόφησης, καθώς και την ελάχιστη / μέγιστη πίεση κατάθλιψης που αντιστοιχεί σε κάθε (επιτρεπόμενο) επίπεδο πίεσης αναρρόφησης. Πρακτικά, σε κάθε επίπεδο πίεσης αναρρόφησης, χαράσσεται η κατακόρυφος. Εκεί που τέμνει την κάτω καμπύλη, διαβάζουμε (στον κατακόρυφο άξονα) την ελάχιστη επιτρεπόμενη πίεση κατάθλιψης, ενώ εκεί που τέμνει την άνω καμπύλη τη μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση κατάθλιψης. Για παράδειγμα, στο διάγραμμα CO₂ και σε πίεση αναρρόφησης 40 bar (5° C), αντλούμε τις εξής πληροφορίες για τον εν λόγω συμπιεστή:

- ❖ Η ελάχιστη πίεση κατάθλιψης είναι 58 bar, ο λόγος συμπίεσης $58/40 = 1,45$ και η διαφορική πίεση $58-40 = 18$ bar.
- ❖ Η μέγιστη πίεση κατάθλιψης σε κύκλο subcritical είναι 74 bar¹, ο λόγος συμπίεσης $74/40 = 1,85$ και η διαφορική πίεση $74-40 = 34$ bar.

¹ Τα 74 bar (31° C) είναι ακριβώς το κρίσιμο σημείο. Πρακτικά, για να θεωρήσουμε ένα κύκλο CO₂ subcritical, πρέπει να συμπυκνώνει το πολύ στους 28° C ήτοι 68,9 bar.

❖ Η μέγιστη πίεση κατάθλιψης σε κύκλο transcritical είναι 130 bar, ο λόγος συμπίεσης $130/40 = 3,25$ και η διαφορική πίεση $130-40 = 90$ bar.

Μια άλλη σημαντική παρατήρηση είναι ότι το διάγραμμα του CO₂ (transcritical) έχει σημαντικά μεγαλύτερο εύρος σε σχέση με τα άλλα ρευστά, τόσο στις πιέσεις αναρρόφησης, όσο και κατάθλιψης (μεγαλύτερος φάκελος) και είναι σημαντικά μετατεθειμένο προς τα δεξιά και επάνω, πράγμα που υποδηλώνει τις σχετικά μεγάλες πιέσεις λειτουργίας.

Το CO₂ είναι ένα ουδέτερο από χημική άποψη αέριο και σαν τέτοιο είναι συμβατό με όλα τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη κατασκευή συμπιεστών ψύξης. Όπως αναφέρθηκε, αυτό που ενδιαφέρει πρωτίστως, είναι τα επιλεγέντα υλικά και ο τρόπος κατασκευής να αντεπεξέρχονται στις ψηλές πιέσεις. Οι περισσότεροι κώδικες ασφάλειας απαιτούν τα χρησιμοποιούμενα υλικά στους συμπιεστές CO₂ να έχουν τη δυνατότητα αντοχής ικανού πολλαπλάσιου της πίεσης λειτουργίας. Τούτο σημαίνει ανθεκτικότερα και / ή παχύτερα υλικά, σε σχέση με τα αέρια χαμηλότερων πιέσεων. Συχνά χρησιμοποιείται είτε ελατός σίδηρος είτε χυτοσίδηρος προς ικανοποίηση αυτής της απαίτησης. Το πολύ μικρό σχετικά μέγεθος των συμπιεστών CO₂ βολεύει σε εφαρμογές περιορισμένου χώρου, όπως στα αυτοκίνητα. Πρόσθετα πλεονεκτήματα του "πυκνού" αερίου είναι ο μικρός λόγος συμπίεσης² (βλέπε και πίνακα 1), οι μικρές επιπτώσεις κατά τις πτώσεις πίεσης κατά τη διέλευση από τις βαλβίδες³ και η μικρότερες παράπλευρες απώλειες κυλίνδρων του συμπιεζόμενου αερίου. Σαν γενικό συμπέρασμα, μπορούμε να πούμε ότι οι συμπιεστές CO₂ υπερτερούν σε ογκομετρική και ισεντροπική απόδοση έναντι των ανταγωνιστών τους με συμβατικά αέρια. Οι συμπιεστές CO₂ μεταφέρουν ένα αέριο πολύ μεγάλης σχετικά πυκνότητας. Με άλλα λόγια, για δεδομένη μετατόπιση συμπιεστή παράγεται μεγαλύτερη (σχετικά με τα άλλα ρευστά) εξατμιζόμενη μάζα αερίου (βελτιωμένη ογκομετρική απόδοση). Ισοδύναμα, για δεδομένο ψυκτικό έργο απαιτείται στο CO₂ πολύ μικρότερη σχετικά μετατόπιση στο συμπιεστή. Να σημειωθεί, ότι η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του CO₂ είναι μεγαλύτερη από αυτή των αλογονανθράκων (πολύ μικρότερη όμως από της αμμωνίας). Στον επόμενο πίνακα καταδεικνύεται, ότι σε εξάτμιση -40° C, για δεδομένη ψυκτική ισχύ ο συμπιεστής CO₂ έχει μέγεθος (σε όρους ογκομετρικής μετατόπισης) το 1/10 του συμπιεστή αμμωνίας (υποθέτουμε ότι στην είσοδο του εξατμιστή έχουμε 100% υγρό όπως συμβαίνει στην υπερτροφοδότηση).

² Παρόλο που οι πιέσεις λειτουργίας των συμπιεστών CO₂ είναι πολύ μεγαλύτερες από των άλλων ρευστών, ο λόγος συμπίεσης είναι μικρότερος. Τούτο οφείλεται στη σχετικά μεγάλη απόλυτη τιμή της πίεσης αναρρόφησης.

³ Για δεδομένη πτώση πίεσης, η θερμοκρασιακή πτώση για το CO₂ είναι πολύ μικρότερη από τα συμβατικά ρευστά.

		NH ₃	CO ₂
ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΨΥΚΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ (KJ/s = KW)	(1)	100	100
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ (°C)	(2)	-40	-40
ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ (KJ/kg)	(3)	1389	322
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΑΕΡΙΟΥ (kg/m ³)	(4)	0,64	26,12
ΠΑΡΟΧΗ ΜΑΖΑΣ ΕΞΑΤΜΙΖΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ (kg/s)	(5) = (1)/(3)	0,072	0,311
ΟΓΚΟΣ ΕΞΑΤΜΙΣΘΕΝΤΟΣ ΑΕΡΙΟΥ (m ³ /s)	(6) = (5)/(4)	0,112	0,012
ΟΓΚΟΣ ΕΞΑΤΜΙΣΘΕΝΤΟΣ ΑΕΡΙΟΥ (m ³ /h)	(7) = 3600X(6)	405,0	42,8
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΟΓΚΩΝ ΑΕΡΙΟΥ (ΑΜΜΩΝΙΑ = 1)	(8)	1,0	0,1

Πίνακας 2: Σύγκριση μεγέθους συμπιεστών αμμωνίας και CO₂.

Ο συμπιεστής CO₂ λειτουργεί σε μεγάλες απόλυτες πιέσεις, τόσο στην αναρρόφηση, όσο και στη κατάθλιψη, πράγμα που οδηγεί σε μικρούς λόγους συμπίεσης (παρόλη την πολύ μεγαλύτερη δοσφορά πιέσεων αναρρόφησης - κατάθλιψης σε απόλυτες τιμές όπως φαίνεται και στον πίνακα 1). Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα cascade, ο συμπιεστής CO₂ που λειτουργεί σε -40° C / -5° C έχει πιέσεις αναρρόφησης - κατάθλιψης 14,3 bar / 30,5 bar αντίστοιχα. Ο λόγος συμπίεσης είναι $30,5 / 14,3 = 2,13$, πολύ μικρός⁴. Η ογκομετρική και ισεντροπική απόδοση σε τόσο μικρούς λόγους συμπίεσης είναι βελτιωμένη και τούτο αποτελεί ένα ακόμα πλεονέκτημα των συμπιεστών CO₂. Βεβαίως, σε απόλυτες τιμές οι διαφορές πίεσης αναρρόφησης - κατάθλιψης, όπως είδαμε και στον 1, είναι σχετικά πολύ μεγάλες. Τούτο σημαίνει μεγάλες καταπονήσεις στα υλικά⁵. Για παράδειγμα, σε ένα παλινδρομικό συμπιεστή CO₂, η μεγάλη διαφορά πίεσης εκατέρωθεν της κεφαλής του εμβόλου, σημαίνει μεγάλες εφαρμοζόμενες δυνάμεις στα ωστήρια των εμβόλων και στο στρόφαλο, καθώς και μεγαλύτερη ισχύ ανά δεδομένο όγκο μετατόπισης. Τούτο αντιμετωπίζεται με επιλογή κυλίνδρων μικρότερης διαμέτρου, ώστε οι μεγάλες πιέσεις να «μεταφράζονται» σε μικρές σχετικές δυνάμεις (Δύναμη = Πίεση X Επιφάνεια). Στους κοχλιωτούς συμπιεστές, η μεγάλη διαφορά πίεσης που αναπτύσσεται κατά μήκος του κοχλία μεταφράζεται επίσης σε μεγαλύτερα φορτία στα φέροντα στοιχεία και μεγαλύτερη ισχύ ανά δεδομένο όγκο μετατόπισης. Έτσι, ο σχεδιασμός των κοχλιωτών συμπιεστών για CO₂ βασίζεται στην επιλογή κοχλία με μικρό λόγο «μήκος / διάμετρος». Τούτο μειώνει τα φέροντα φορτία και τις παραμορφώσεις σε αποδεκτά επίπεδα. Οι μεγάλες διαφορές πίεσης αρχής - τέλους του κοχλία γενικά προκαλούν απώλειες πίεσης από σπείρα σε σπείρα (διαρρέει αέριο από τα κενά μεταξύ κοχλιών και κοχλιών - περιβλήματος), με αποτέλεσμα της πτώση της ογκομετρικής απόδοσης. Τούτο όμως δεν

⁴ Στις ίδιες συνθήκες για αμμωνία ο λόγος συμπίεσης θα ήταν 4,95.

⁵ Τα κινούμενα στοιχεία του συμπιεστή, που έχουν από τη μια τους πλευρά τη πίεση κατάθλιψης και από την άλλη τη πίεση αναρρόφησης, καταπονούνται με τη διαφορά αυτών των πιέσεων (διαφορική πίεση).

αποτελεί έντονο πρόβλημα στους κοχλιωτούς συμπιεστές CO₂, λόγω της μεγάλης πυκνότητας αυτού του αερίου (το πιο πυκνό αέριο "δραπετεύει" δυσκολότερα από τα κενά).

Η μεγάλη πυκνότητα του CO₂ σε σχέση με τα λοιπά ψυκτικά αέρια έχει σαν αποτέλεσμα τις μεγαλύτερες απώλειες πίεσης, κατά μήκος των ποικίλων "δύσκολων" διόδων του αερίου μέσα στο συμπιεστή, όπως από βαλβίδες, οπές κλπ⁶. Παρόλο που στο CO₂ οι πτώσεις πίεσης δεν επηρεάζουν πολύ τις θερμοκρασίες κορεσμού (δηλαδή οι πτώσεις πίεσης σε όρους θερμοκρασίας είναι σχετικά μικρές), γίνεται προσπάθεια περιορισμού της πτώσης πίεσης στις βαλβίδες των παλινδρομικών συμπιεστών, με μεγαλύτερες επιφάνειες ροής στις βαλβίδες και μεγαλύτερες ανυψώσεις βαλβίδων. Στους κοχλιωτούς, οι δίοδοι κατάθλιψης πρέπει να είναι ευρύτερες. Οι ιδιαιτερότητες της αυξημένης πτώσης πίεσης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό των συμπιεστών, για βέλτιστη απόδοση και μακροζωία στους συμπιεστές CO₂.

Όσον αφορά το είδος του συμπιεστή, όπως π.χ. στον προβληματισμό παλινδρομικός ή κοχλιωτός, είναι γνωστό, ότι οι παλινδρομικοί συμπιεστές, συμπεριφέρονται μάλλον καλύτερα (δηλαδή έχουν καλύτερη απόδοση) σε συστήματα που έχουν μεγάλες πιέσεις αναρρόφησης και μικρούς λόγους συμπίεσης. Τα συστήματα CO₂ έχουν και τα δυο αυτά χαρακτηριστικά, άρα «ταιριάζουν» με τους παλινδρομικούς συμπιεστές. Όμως, η μεγάλη διαφορά πιέσεων (σε απόλυτη τιμή) κατάθλιψης – αναρρόφησης θέτει σοβαρά προβλήματα αντοχής στα υλικά των συμπιεστών και ο σχεδιασμός τους συνεχώς βελτιώνεται. Από την άλλη πλευρά, σημαντική πρόοδος έχει γίνει και στο σχεδιασμό των κοχλιωτών συμπιεστών, οι οποίοι σχεδιάζονται κατάλληλα, για την αντιμετώπιση του μεγάλου φορτίου που προκύπτει από τη μεγάλη διαφορά πιέσεων: Όπως αναφέρθηκε, η γενική αρχή είναι «βραχύτεροι» κοχλίες (δηλαδή με μεγάλο λόγο «διάμετρος / μήκος»). Σαν γενική κατεύθυνση, μπορούμε να πούμε, ότι για συστήματα κάτω των 350 ψυκτικών KW (KWR), οι παλινδρομικοί συμπιεστές έχουν ελαφρώς καλύτερη απόδοση σε σχέση με τους κοχλιωτούς.

Όσον αφορά τη λίπανση των συμπιεστών CO₂, στα πλαίσια των φυσικών ιδιοτήτων του CO₂ κρίνεται απαραίτητο να εξεταστεί η συμπεριφορά του σε σχέση με τα λιπαντικά που κυκλοφορούν στην αγορά. Το χρησιμοποιούμενο λιπαντικό μπορεί να είναι διαλυτό (miscible) ή αδιάλυτο (immiscible) στο CO₂. Σε κάθε περίπτωση, η αλληλεπίδραση του λιπαντικού με το CO₂ επηρεάζει την απόδοση του συγκροτήματος και πρέπει να λαμβάνονται κάποια μέτρα. Τα λιπαντικά συμπιεστών CO₂ μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- ❖ Κατηγορία Polyol Ester (POE), τα οποία είναι διαλυτά στο CO₂ και υγροσκοπικά.
- ❖ Κατηγορία Polyalkyl Glycol (PAG), τα οποία επίσης είναι διαλυτά στο CO₂ και υγροσκοπικά.

⁶ Σύμφωνα με τον τύπο των Darcy - Weisbach, η πτώση πίεσης ενός ρευστού που ρέει σε αγωγό κυκλικής διατομής είναι ανάλογη με το συντελεστή τριβής, το μήκος, το τετράγωνο της ταχύτητας ροής και την πυκνότητα του ρευστού και αντιστρόφως ανάλογη με τη διάμετρο.

- ❖ Κατηγορία polyalfaolefin (PAO), τα οποία είναι μη διαλυτά στο CO₂ και πρακτικά μη υγροσκοπικά.

Η κατηγορία PAO προτιμάται στα μεγάλα συστήματα cascade με αμμωνία, λόγω της μη σοβαρής επίπτωσης αν χρησιμοποιηθεί κατά λάθος στην αμμωνία. Το λάθος αυτό είναι μοιραίο, αν η κατηγορία που χρησιμοποιείται στο CO₂ είναι της κατηγορίας POE, λόγω της αντίδρασης με την αμμωνία και του σχηματισμού ενός στερεού αφρού. Επίσης, ενώ η κατηγορία PAO είναι κατάλληλη για κοχλιωτούς συμπιεστές, δεν συνιστάται για παλινδρομικούς συμπιεστές, διότι κατά την παύση τείνει να "στεγνώνει" από τις επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή και κατά το (στεγνό) ξεκίνημα υφίστανται επιταχυνόμενες φθορές μέχρι να αποκατασταθεί η κανονική ροή.