

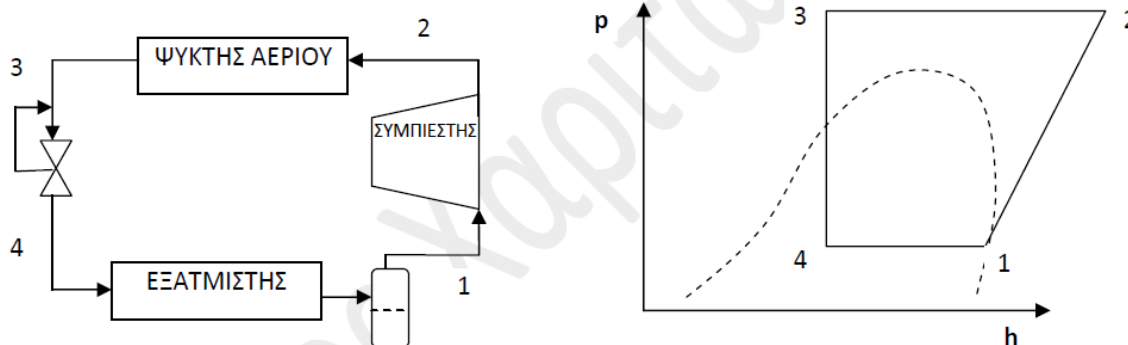
23-3-17

## ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ TRANSCRITICAL ΨΥΚΤΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ CO<sub>2</sub>

Νίκος Χαριτωνίδης (6955-067705, n.charito@cryologic.gr)

Γενικός Διευθυντής της ΨΥΓΕΙΑ ΑΛΑΣΚΑ ΑΕΒΤΕ ([www.alaskanet.gr](http://www.alaskanet.gr)) και της CRYOLOGIC ΕΕ ([www.cryologic.gr](http://www.cryologic.gr))

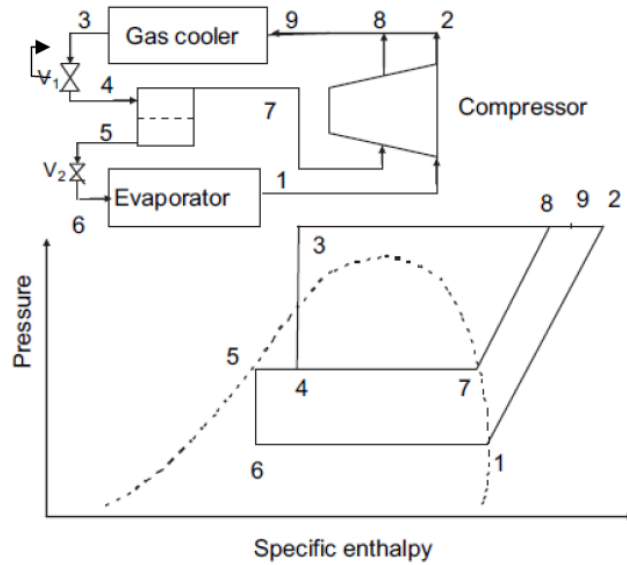
Το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) έχει πολύ χαμηλό κρίσιμο σημείο (31 C). Τούτο σημαίνει πρακτικά, ότι σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος πάνω από 22 C είναι αδύνατη η συμπύκνωσή του. Τότε ο ατμός κατάθλιψης (υπερκρίσιμο αέριο) απλά ψύχεται στον ψύκτη αερίου, στην έξοδο του οποίου το CO<sub>2</sub> εξακολουθεί να είναι υπερκρίσιμο αέριο, το οποίο οδεύει για εκτόνωση κλπ. Ο κύκλος αυτός ονομάζεται διακρίσιμος (transcritical) ή υπερκρίσιμος και παρίσταται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 1: Ο transcritical κύκλος του CO<sub>2</sub>

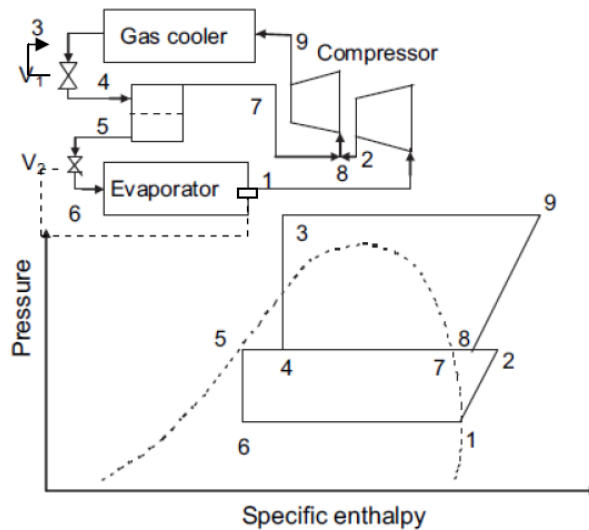
Ο transcritical κύκλος έχει ένα εγγενές μειονέκτημα: Υπάρχουν μεγάλες θερμοδυναμικές απώλειες κατά τη λιγότερο αναστρέψιμη διεργασία, που είναι η ισενθαλπική εκτόνωση από υπερκρίσιμο αέριο σε μίγμα υγρού - αερίου, οι οποίες κλιμακώνονται έντονα όσο αυξάνεται η θερμοκρασία CO<sub>2</sub> στην έξοδο του ψύκτη αερίου (μετακίνηση του σημείου 3 προς τα δεξιά). Τούτο είναι λογικό να επιφέρει σοβαρές επιφυλάξεις, κατά πόσο είναι οικονομικά βιώσιμα τα transcritical συστήματα σε θερμά κλίματα, όπως το Ελληνικό. Έχουν γίνει σοβαρές προσπάθειες για την βελτίωση του transcritical κύκλου. Στο παρόν, είναι αδύνατον να αναλυθούν αυτά τα συστήματα. Απλά θα αναφερθούν επιγραμματικά με επεξηγηματικά σχήματα, δεδομένου ότι μια εικόνα 1000 λέξεις. Τα βασικά λοιπόν συστήματα βελτίωσης είναι:

1. **Παράλληλη Συμπύεση:** Η λογική είναι να απομακρύνεται το παρασιτικό αέριο εκτόνωσης **πριν φτάσει στην εκτονωτική βαλβίδα**. Προς τούτο χρησιμοποιείται πρόσθετος συμπιεστής που απορροφάει σε ενδιάμεση πίεση ή μεσαία λήψη κοχλιωτού σε συνδυασμό με δοχείο economizer. Η μέθοδος αυξάνει το ψυκτικό αποτέλεσμα όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα (διαδρομή 6-1).



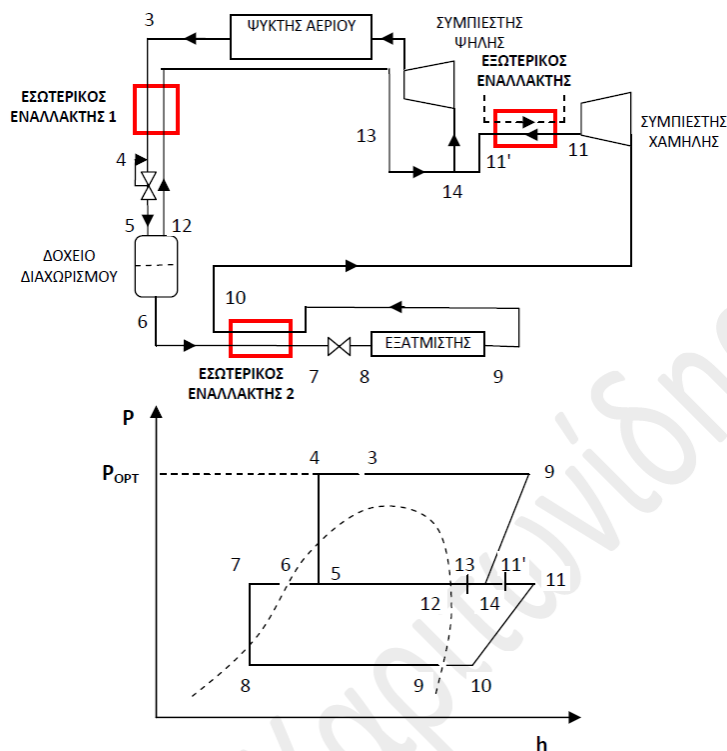
Σχήμα 2: Παράλληλη συμπίεση με δοχείο economizer.

2. **Διβάθμια συμπίεση με απομάκρυνση του flash gas:** Χρησιμοποιούνται δυο συμπιεστές εν σειρά. Το ψυκτικό αποτέλεσμα αυξάνεται περισσότερο από το συνολικό έργο συμπίεσης, άρα βελτιώνεται η απόδοση του κύκλου.



Σχήμα 3: Διβάθμια συμπίεση με απομάκρυνση του flash gas.

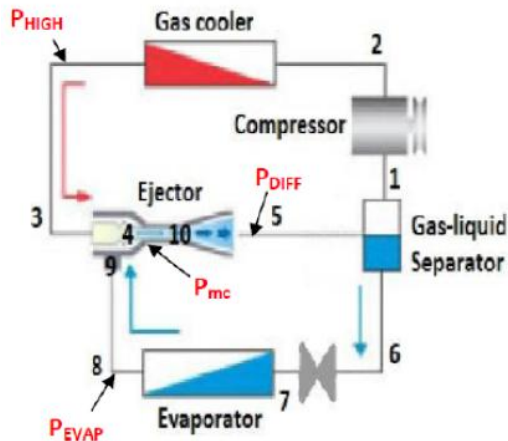
3. **Επί πλέον προσθήκη εσωτερικών / εξωτερικών εναλλακτών:** Ο κύκλος μπορεί να βελτιωθεί την πιθανή προσθήκη εναλλακτών σε τρία σημεία του κυκλώματος, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Να θυμόμαστε όμως ότι ο εσωτερικός εναλλάκτης κάπου ωφελεί και κάπου βλάπτει "εσωτερικά" την απόδοση. Για τούτο η τοποθέτησή τους πρέπει να γίνεται με σύνεση.



Σχήμα 4: Εγκατάσταση εσωτερικών εναλλακτών

4. **Εξατμηστική ψύξη του υπερκρίσιμου αερίου:** Αντί να προσάγουμε απλό αέρα στον (αερόψυκτο) ψύκτη αερίου, ο αέρας πρώτα διοχετεύεται μέσα από έναν εξατμηστικό ψύκτη. Η εξατμηση νερού εκεί μειώνει τη θερμοκρασία του αέρα και κατ' επέκταση και η θερμοκρασία του CO<sub>2</sub> στην έξοδο του ψύκτη αερίου. Ο κύκλος βελτιώνεται λόγω της προς τα αριστερά μετακίνησης του σημείου 3 στο σχήμα 1. Να σημειωθεί ότι με την εξατμηστική ψύξη είναι ακόμα πιθανό να μεταπέσει ο κύκλος από transcritical σε συμβατικό (συμπύκνωση), οπότε τα οφέλη αυξάνονται
5. **Σύστημα εκτίναξης (ejector):** Με αυτό το σύστημα μπορούμε να πετύχουμε στο συμπιεστή πίεση αναρρόφησης ψηλότερη από την αναγκαία για την επίτευξη της θερμοκρασιακής απαίτησης (εξοικονόμηση). Η συσκευή ejector βοηθάει για την πρόσθετη υποβίβαση της πίεσης μέχρι το επιθυμητό επίπεδο, **χωρίς κόστος**. Το υγρό υψηλής πίεσης εξαναγκάζεται να διέλθει από μια στενή δίοδο, όπου αυξάνεται πολύ η ταχύτητά του. Η αυξημένη ταχύτητα ροής δημιουργεί υποπίεση στα

πλαϊνά της (αρχή Bernoulli), η οποία βοηθάει στην πρόσθετη πτώση της πίεσης, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα (αναφορά 5).



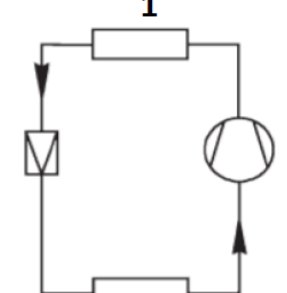
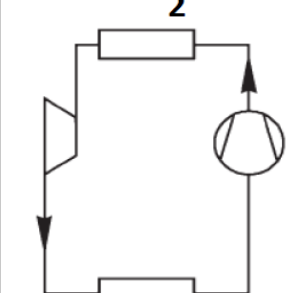
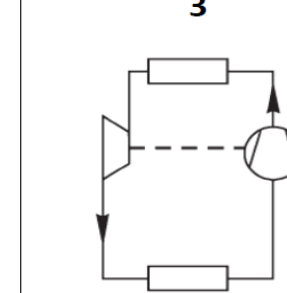
ΠΙΕΣΗ ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗΣ  
ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ  $P_1 >$  ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΗΝ  
ΕΞΟΔΟ ΤΟΥ ΕΞΑΤΜΙΣΤΗ  $P_8$

- $P_{HIGH}$  : Πίεση στην έξοδο ψύκτη αερίου - είσοδο στο ακροφύσιο κίνησης.
- $P_{mc}$  : Η ελάχιστη πίεση που επιτυγχάνεται στον ejector (τμήμα μίξης).
- $P_{EVAP}$  : Η πίεση στην έξοδο του εξατμιστή.
- $P_{DIFF}$  : Η πίεση στην έξοδο του ejector.

### Σχήμα 5: Βελτίωση με εγκατάσταση ejector.

Σύμφωνα με μια έρευνα (αναφορά 2), με τοποθέτηση πολλαπλών ejectors (multijet system) το σύστημα με όλες τις βελτιώσεις (multijet) μπορούσε να λειτουργεί με θερμοκρασία αναρρόφησης συμπιεστή  $-4^{\circ}C$  αντί των  $-10^{\circ}C$  του απλού συστήματος, για να πετύχει το ίδιο ψυκτικό έργο. Γενικά, με το σύστημα πλήρους βελτίωσης, η ενεργειακή βελτίωση σε σχέση με το απλό σύστημα σε θερμό κλίμα (νότια Ιταλία) είναι της τάξης του 25% (2), πράγμα που καθιστά το transcritical σύστημα  $CO_2$  στα θερμά κλίματα άκρως ανταγωνιστικό με τα συστήματα υδροφθορανθράκων.

**6. Σύστημα εκτονωτή (expander):** Η χρήση των συσκευών που ορίζονται σαν εκτονωτές έχει σκοπό να μειώσει τις μεγάλες θερμοδυναμικές απώλειες που συμβαίνουν κατά την (απότομη) μετάβαση από ψηλό επίπεδο πίεσης σε χαμηλό και να ανακτήσουν κάποιο μηχανικό έργο, σύμφωνα με τον θεωρητικό κύκλο του Carnot. Σε αντίθεση με τους συμβατικούς κύκλους, όπου τα οφέλη με χρήση εκτονωτών είναι αμφίβολα, στον κύκλο transcritical η χρήση αυτή είναι πλεονεκτική, λόγω της ανάκαμψης μέρους των σημαντικών θερμοδυναμικών απωλειών (exergy losses) που συμβαίνουν κατά την εκτόνωση του υπερκρίσιμου αερίου. Το όφελος είναι διπλό: (1) αυξάνεται το ψυκτικό αποτέλεσμα λόγω της προς τα αριστερά πορείας της εκτόνωσης (μείωση της ενθαλπιας) και (2) ανακτάται μηχανικό έργο εκτόνωσης. Το μηχανικό αυτό έργο προσάγεται στον άξονα του συμπιεστή και συμπληρώνει το έργο συμπίεσης, βελτιώνοντας έτσι τον COP. Σύμφωνα με την αναφορά 3, η εγκατάσταση εκτονωτή σε transcritical κύκλο  $CO_2$  μπορεί να βελτιώσει την απόδοση (COP) μέχρι 33% και να μειώσει τη βέλτιστη πίεση κατάθλιψης του συστήματος. Στην αναφορά 4 αναφέρεται μια συγκριτική μελέτη βελτίωσης του COP ενός βασικού (σκέτου) transcritical κύκλου σε σχέση με την πλήρη εκμετάλλευση εγκατάστασης ενός εκτονωτή. Το αποτέλεσμα φαίνεται συνοπτικά στο επόμενο σχήμα:

<p>Εξάτμιση <math>-10^{\circ}\text{C}</math> με μηδενική υπερθέρμανση. Αδιαβατική συμπίεση και εκτόνωση. Συντελεστής ισεντροπικής απόδοσης κατά τη συμπίεση 0,80. Συντελεστής ισεντροπικής απόδοσης κατά την εκτόνωση 0,70. Θερμοκρασία εξόδου <math>\text{CO}_2</math> από τους ψύκτες αερίου <math>31^{\circ}\text{C}</math>. Αγνοούνται οι πτώσεις πίεσης. Σε κάθε περίπτωση η πίεση κατάθλιψης είναι βελτιστοποιημένη.</p>		
<p><b>1</b></p> 	<p><b>2</b></p> 	<p><b>3</b></p> 
<p>ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ - ΑΠΛΟΣ ΚΥΚΛΟΣ Βέλτιστη πίεση κατάθλιψης 78 bar - COP = 2,52</p>	<p>ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΕΚΤΟΝΩΤΗ ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΕΡΓΟΥ Βέλτιστη πίεση κατάθλιψης 77 bar - COP = 2,71</p>	<p>ΣΥΣΤΗΜΑ 2 + ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΕΡΓΟΥ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ Βέλτιστη πίεση κατάθλιψης 77 bar - COP = 3,34</p>

**Σχήμα 6: Βελτίωση με εγκατάσταση expander.**

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Υπάρχει η αντίληψη, ότι ο transcritical κύκλος του  $\text{CO}_2$  "ταιριάζει" μόνο στα ψυχρά κλίματα, λόγω μεγάλων θερμοδυναμικών απωλειών όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος (ψύξης υπερκρίσιμου αερίου) είναι ψηλή. Τούτο είναι αληθές όταν μιλάμε για τον απλό κύκλο. Υπάρχουν όμως πολλές μεθοδολογίες βελτίωσης και συνδυασμός αυτών, που καθιστούν τον κύκλο ενεργειακά λίαν ελκυστικό, ακόμα και σε πολύ θερμά κλίματα, όπως της Ελλάδας. Σκοπός αυτού του άρθρου ήταν η πρώτου επιπέδου ενημέρωση επί αυτών των μεθοδολογιών.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Νίκος Χαριτωνίδης, Εγχειρίδιο Ψύξης και Θέρμανσης με Διοξείδιο του Άνθρακα, CRYOLOGIC EE 2016.
2. [http://www.enex-ref.com/download/Ejector\\_leaflet\\_Warm\\_climate\\_brochure.pdf](http://www.enex-ref.com/download/Ejector_leaflet_Warm_climate_brochure.pdf)
3. Monjur Morshed "Investigation on  $\text{CO}_2$  Ground-coupled Heat Pumping System with Ejector", Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2015
4. Alberto Cavallini - Claudio Zilio "Carbon dioxide as a natural refrigerant", University of Padova, 2007.
5. Wojciech Foit "Comparison of single and parallel ejector operation in transcritical R744 cycle"