

30-6-19

## **ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ΜΕ EJECTOR**

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 ΠΡΟΒΛΗΜΑ**

Το θέμα της βιώσιμης επιλογής ψυκτικού ρευστού δείχνει να είναι μονόδρομος. Τα συμβατικά συνθετικά ρευστά μπαίνουν σύμφωνα με τον κανονισμό 517/2014 ΕΕ σε προοδευτική κατάργηση και μάλιστα γρήγορα στα σχετικά μεγάλα συστήματα (π.χ στατικά συστήματα με ρευστό δείκτη GWP > 2500 μέχρι 1/1/2020). Σαν μοναδική βιώσιμη λύση διαγράφεται εκείνη των φυσικών ρευστών, που πρόκειται για την αμμωνία, το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και τους υδρογονάνθρακες. Από αυτά, η αμμωνία και οι υδρογονάνθρακες (π.χ. προπάνιο) δημιουργούν επιφυλάξεις λόγω επικινδυνότητας και ευφλεκτότητας. Το CO<sub>2</sub> είναι το πιο ακίνδυνο, με δυο όμως βασικά προβλήματα. Το χαμηλό κρίσιμο σημείο του (31° C) σε μέτρια και θερμά κλίματα οδηγεί σε υπερκρίσιμο κύκλο, ήτοι αδυναμία συμπύκνωσης του ατμού κατάθλιψης παρά μόνο σε ψύξη του υπερκρίσιμου ρευστού στο συστατικό που ονομάζεται "ψύκτης αερίου". Ο κύκλος αυτός είναι γνωστός σαν transcritical κύκλος CO<sub>2</sub>. Το πρώτο πρόβλημα είναι οι έντονες θερμοδυναμικές απώλειες ειδικά κατά τις διεργασίες των στραγγαλισμών, που καταλήγουν σε χαμηλή ενεργειακή απόδοση ειδικά στα θερμά κλίματα (μεγάλη θερμοκρασία υπερκρίσιμου CO<sub>2</sub> στην έξοδο του ψύκτη αερίου). Το δεύτερο πρόβλημα είναι οι ψηλές πιέσεις λειτουργίας, που συχνά φθάνουν τα 120 bar, πράγμα που οδηγεί σε δυσκολία προμήθειας και ψηλό κόστος των συστατικών. Το τελευταίο πρόβλημα λύνεται προοδευτικά με τη συστηματική παραγωγή εξειδικευμένων συστατικών για ψηλές πιέσεις (άρα και μείωση του κόστους). Όσον αφορά το πρώτο πρόβλημα, αρχικά θεωρήθηκε ότι τα συστήματα CO<sub>2</sub> είναι ασύμφορα για θερμά κλίματα. Η αναγκαιότητα όμως επιλογής φυσικών ρευστών οδήγησε σε μεγάλες έρευνες και προσπάθειες, ώστε να βελτιωθεί ο COP αυτών των συστημάτων. Μια από αυτές είναι η εγκατάσταση μιας συσκευής με την ονομασία ejector, η οποία έχει το μεγάλο πλεονέκτημα ότι είναι απλή και δεν έχει κινούμενα μέρη, ενώ προσφέρει σημαντική βελτίωση.

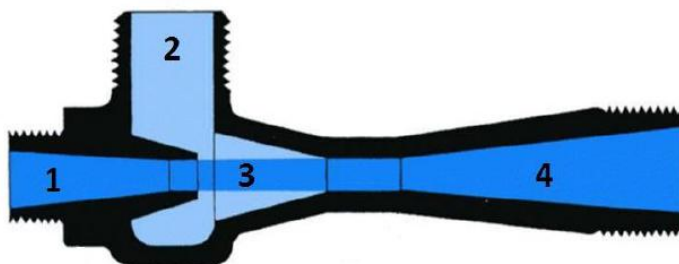
### **ΤΙ ΕΙΝΑΙ Ο EJECTOR**

Ο ejector (σύστημα εκτίναξης) επιτρέπει την ανάμιξη και συμπίεση δύο ρευμάτων την ίδια στιγμή. Το πρώτο ρεύμα είναι το υπερκρίσιμο ρευστό υψηλής πίεσης που εξέρχεται από τον ψύκτη αερίου, γνωστό και σαν κινητήριο ρεύμα (motive flow). Το δεύτερο ρεύμα είναι το υποκρίσιμο ρευστό χαμηλής πίεσης που εξέρχεται από τον εξατμιστή (αέριο ή υγρό), γνωστό

σαν ρεύμα αναρρόφησης (suction flow). Τα αντίστοιχα σημεία εισόδου στον ejector είναι γνωστά σαν ακροφύσιο ρεύματος κίνησης (motive nozzle) και ακροφύσιο ρεύματος αναρρόφησης (suction nozzle).

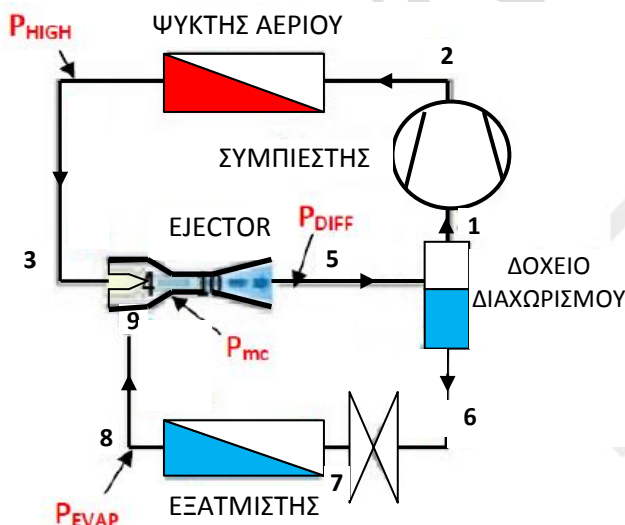
## **ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ EJECTOR**

Η αρχή λειτουργίας του ejector βασίζεται στην καταρχήν αύξηση της κινητικής ενέργειας (ταχύτητας) του κινητηρίου ρεύματος (υπερκρίσιμου), κατόπιν της ανάμιξης του με το ρεύμα αναρρόφησης χαμηλής πίεσης που προέρχεται από τον εξατμιστή και της προοδευτικής μετατροπής της κινητικής σε δυναμική ενέργεια (αύξηση πίεσης) του μίγματος, προσφέροντας έτσι μια οιονεί δωρεάν συμπίεση στο ρευστό χαμηλής πίεσης. Σε ένα αρχικό τμήμα το υπερκρίσιμο ρευστό επιταχύνεται λόγω της συνεχώς μειούμενης διατομής, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η πίεσή του. Πρόκειται για το γνωστό φαινόμενο Bernoulli, όπου όταν αυξάνεται η ταχύτητα (κινητική ενέργεια) ενός ρευστού, μειώνεται η πίεσή του (δυναμική ενέργεια), σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας. Η μείωση της πίεσης μπορεί να υποβοηθήσει την έλξη ενός άλλου ρεύματος ρευστού (κάθεται με τη διεύθυνση του κινητηρίου ρεύματος). Κατά την πτώση της πίεσης, το κινητήριο ρευστό εισέρχεται στην υποκρίσιμη περιοχή και μετατρέπεται σε μίγμα υγρού - αερίου. Η ροή αναρρόφησης εισέρχεται στον ejector από το ακροφύσιο ρεύματος αναρρόφησης (suction nozzle), υποβοηθούμενη από την "υποπίεση" που δημιουργείται από το (μεγάλης ταχύτητας) ρεύμα κίνησης (που κινείται κάθετα με το ρεύμα αναρρόφησης). Στο αρχικό τμήμα αυτού του ακροφυσίου, το ρεύμα της αναρρόφησης προεπιταχύνεται, ώστε να προσαρμοστεί πριν την ανάμιξή του με το (πολύ ψηλότερης ταχύτητας) κινητήριο ρεύμα. Το πολύ ψηλής ταχύτητας (συχνά υπερηχητικής) ρεύμα της κινητήριας ροής παρασύρει έτσι το ρεύμα αναρρόφησης και γίνεται μια προανάμιξη. Η κύρια όμως ανάμιξη των δυο ρευμάτων γίνεται στο τμήμα που ονομάζεται θάλαμος ανάμιξης (mixing chamber). Εδώ συμβαίνουν περίπλοκες διεργασίες, που χαρακτηρίζονται από κρουστικά κύματα λόγω της διαφοράς ορμής των δυο ρευμάτων. Τέλος, το ομοιογενές πλέον αέριο οδηγείται στο τελικό τμήμα του ejector, που ονομάζεται τμήμα διάχυσης (diffuser). Εδώ μειώνεται προοδευτικά η ταχύτητα και (βάσει της αρχής διατήρησης ενέργειας) αυξάνεται η πίεση. Με άλλα λόγια, μέρος της κινητικής ενέργειας μετατρέπεται σε δυναμική, έτσι ώστε το επίπεδο εσωτερικής ενέργειας στην έξοδο του τμήματος διάχυσης είναι ψηλότερο από εκείνη που υπάρχει στο (αρχικό) ρεύμα αναρρόφησης, πράγμα που αποτυπώνεται στην σχετική αύξηση της πίεσης. Η αυξημένη, σε σχέση με την πίεση εξάτμισης, πίεση στην έξοδο του τμήματος διάχυσης αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος του ejector υπό συγκριμένες συνθήκες και ονομάζεται ανύψωση πίεσης (pressure lift). Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η διάταξη των διαφόρων τμημάτων του ejector, όπως περιγράφηκε παραπάνω (αναφορά 1).



**Σχήμα 1: Τμήματα του ejector: (1) ακροφύσιο ρεύματος κίνησης, (2) ακροφύσιο ρεύματος αναρρόφησης, (3) θάλαμος ανάμιξης, (4) τμήμα διάχυσης [1].**

Το ρεύμα που εξέρχεται από τον ejector κατευθύνεται σε περιοχή (π.χ. δοχείο συγκέντρωσης) που βρίσκεται στην πίεση αναρρόφησης του συμπιεστή. Το επίτευγμα του ejector ουσιαστικά είναι ότι επιτυγχάνει στον εξατμιστή μια πίεση που είναι χαμηλότερη από την πίεση αναρρόφησης του συμπιεστή και τούτο χωρίς κόστος. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η διάταξη ενός απλού τέτοιου συστήματος (από αναφορά 1).



ΠΙΕΣΗ ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ  $P_1 >$   
ΠΙΕΣΗ ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗΣ ΑΠΟ ΕΞΑΤΜΙΣΤΗ  $P_8$

**Σχήμα 2: Διάταξη απλού transcritical κύκλου CO<sub>2</sub> με ejector [1].**

Στο σύστημα αυτό επικρατούν τέσσερα επίπεδα πιέσεων:

- ❖  $P_{HIGH}$  : Πίεση στην έξοδο του ψύκτη αερίου - είσοδο στο ακροφύσιο κίνησης.
- ❖  $P_{mc}$ : Η ελάχιστη πίεση που επιτυγχάνεται στο εσωτερικό του ejector (στόμιο αναρρόφησης).

- ❖ **P<sub>EVAP</sub>**: Η πίεση στην έξοδο του εξατμιστή.
- ❖ **P<sub>DIFF</sub>**: Η πίεση στην έξοδο του ejector (ανάταση πίεσης από τον ejector, **P<sub>DIFF</sub> > P<sub>EVAP</sub>**).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η πίεση που επικρατεί στο δοχείο διαχωρισμού είναι η P<sub>DIFF</sub>, που είναι και η πίεση αναρρόφησης του συμπιεστή (P<sub>1</sub>). Η τελευταία είναι μεγαλύτερη από την πίεση εξατμίσσης P<sub>EVAP</sub> (P<sub>8</sub>), πράγμα που οδηγεί σε οικονομία στην (ηλεκτρική) ενέργεια που απορροφάει ο συμπιεστής (για κάθε 1 K άνοδο στη θερμοκρασία (κορεσμού) αναρρόφησης συμπιεστή προκύπτει εξοικονόμηση περίπου 4%). Η πίεση που επικρατεί στο στόμιο αναρρόφησης του ejector P<sub>mc</sub> (P<sub>9</sub>) είναι ακόμα *χαμηλότερη* από την P<sub>EVAP</sub> (σημείο 8) και έτσι "ρουφάει" την έξοδο του εξατμιστή. Σε τελική ανάλυση, με τον ejector πετυχαίνουμε θερμοκρασία εξατμίσσης ικανά χαμηλότερη από τη θερμοκρασία αναρρόφησης του συμπιεστή, άρα εξοικονόμηση.

Σε θερμά κλίματα η συνδυαστική εφαρμογή μέτρων ενεργειακής βελτίωσης με παράλληλη συμπίεση (έγκαιρη απομάκρυνση του flash gas) και εγκατάσταση ejector μπορεί να προσφέρει σημαντική βελτίωση του COP. Στη [2] αναφέρεται ότι η ενεργειακή βελτίωση σε σχέση με το απλό σύστημα είναι της τάξης του 25%, πράγμα που καθιστά το transcritical σύστημα CO<sub>2</sub> στα θερμά κλίματα άκρως ανταγωνιστικό με τα συστήματα υδροφθορανθράκων.

#### Αναφορές:

1. Wojciech Foit "Comparison of single and parallel ejector operation in transcritical R744 cycle", Master of Science in Engineering and ICT, Norwegian University of Science and Technology, Department of Energy and Process Engineering.
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. Νίκος Χαριτωνίδης "Παραγωγή Ψύξης - Θέρμανσης και Διοξειδίου του Άνθρακα", Cryologic ΕΕ, 2019.