

ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΜΜΩΝΙΑΣ

Το σύστημα υπερπλήρωσης με αμμωνία εφαρμόζεται από πολύ παλιά, οι τεχνικές του είναι ευρέως γνωστές και η ενεργειακή του απόδοση μάλλον κορυφαία. Σε συνδυασμό με τη διβάθμια συμπίεση εξακολουθεί να έχει την προτίμηση των μελετητών και επενδυτών σε μεγάλα συστήματα βιομηχανικής ψύξης. Το θέμα της επικινδυνότητας της αμμωνίας αντιμετωπίζεται με τα μέτρα ασφάλειας που προβλέπονται από νομικές και κανονιστικές διατάξεις κατά την κατασκευή και λειτουργία και θα συζητηθούν σε επόμενα άρθρα. Μολαταύτα, κανείς δεν μπορεί να αγνοήσει την ευρεία επιφύλαξη που υπάρχει σε μια μεγάλη ομάδα μελετητών - επενδυτών - λειτουργών, η οποία κατά παράδοση τους οδηγούσε σε επιλογή «ακίνδυνου» συνθετικού ρευστού, που συχνά είχε ισοδύναμα αποτελέσματα με την αμμωνία (περίπτωση R-22). Με την προοδευτική όμως κατάργηση των συνθετικών ρευστών, η ομάδα αυτή βρέθηκε προ αδιεξόδου. Τούτο οδήγησε στην ανάπτυξη της (ήδη υπάρχουσας) ιδέας των συστημάτων χαμηλής πλήρωσης αμμωνίας. Τούτα βασίζονται στην ιδέα της ξηρής εκτόνωσης και ενίοτε της χρήσης του CO₂ σαν συνεργαζόμενο ρευστού (υβριδικά συστήματα) που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο άρθρο. Με τα συστήματα αυτά προκύπτουν και παράπλευρα οφέλη, όπως η στιβαρότητα της εργοστασιακής κατασκευής συμπαγών μονάδων, το μικρό μήκος σωληνώσεων, η ταχύτητα κατασκευής και πιθανά οικονομία στο συνολικό κόστος. Εκείνο όμως που έχει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στα συστήματα ξηρής εκτόνωσης είναι τα ποικίλα μέτρα βελτίωσης που λαμβάνονται για να αντισταθμίσουν (ή ακόμα και να υπερκεράσουν) την έλλειψη των πλεονεκτημάτων της υπερπλήρωσης. Μερικά από αυτά είναι η υπόψυξη του υγρού τροφοδοσίας, οι βελτιωμένοι εξατμιστές, τα ευδιάλυτα λάδια στην αμμωνία, οι ηλεκτρονικές εκτονωτικές βαλβίδες, οι αισθητήρες μέτρησης ποιότητας μίγματος.

Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ

Η αμμωνία ήταν και εξακολουθεί να είναι το καθιερωμένο ρευστό στην ψυχρή αποθήκευση και τη βιομηχανία τροφίμων. Μολαταύτα, λόγω της επικινδυνότητας και ποικίλων συμβάντων, τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια συνεχής τάση πιο αυστηρών διατάξεων εφαρμογής. Τούτο βεβαίως δεν αποτρέπει το γεγονός, ότι από τεχνική και περιβαλλοντική άποψη έχει αξιόπιστα πλεονεκτήματα. Ουδεμία επίπτωση έχει στους περιβαλλοντικούς δείκτες (ODP, GWP) και τα χαρακτηριστικά θερμικής μεταφοράς είναι ίσως τα καλύτερα από όλες τις γνωστές ουσίες. Επιπρόσθετα, είναι ευρέως διαθέσιμη και φθηνή, ενώ η μακρά της εφαρμογή στην ψύξη λογικά εγγυάται καλό επίπεδο τεχνογνωσίας. Στα χέρια όμως ανεκπαίδευτων ανθρώπων και σε φτωχά συντηρημένες εγκαταστάσεις αποτελεί χημικό ψηλής επικινδυνότητας.

Η μάζα πλήρωσης του συστήματος με αμμωνία αποτελεί σημαντικό κριτήριο στάθμισης της επικινδυνότητας. Είναι λογικό, η έρευνα να έχει στραφεί στις προσπάθειες μείωσης της

ποσότητας πλήρωσης με βάση έναν αντικειμενικό δείκτη, όπως kg ρευστού ανά ψυκτικό KW (kg/KWR). Συχνά αυτή η έρευνα κινείται στο πνεύμα «back to basics», όπως για παράδειγμα η εφαρμογή στην αμμωνία του απλούστερου συστήματος παραγωγής ψύξης, που είναι η ξηρή εκτόνωση, ακόμα και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες.

Υπάρχει έντονη και γρήγορη εξέλιξη στα συστήματα χαμηλής πλήρωσης και τα αναφερόμενα στο παρόν έχουν την αξία της επίγνωσης των βασικών αρχών μείωσης της ποσότητας πλήρωσης και όχι τις τεχνικές λεπτομέρειες των προσφερόμενων εξοπλισμών.

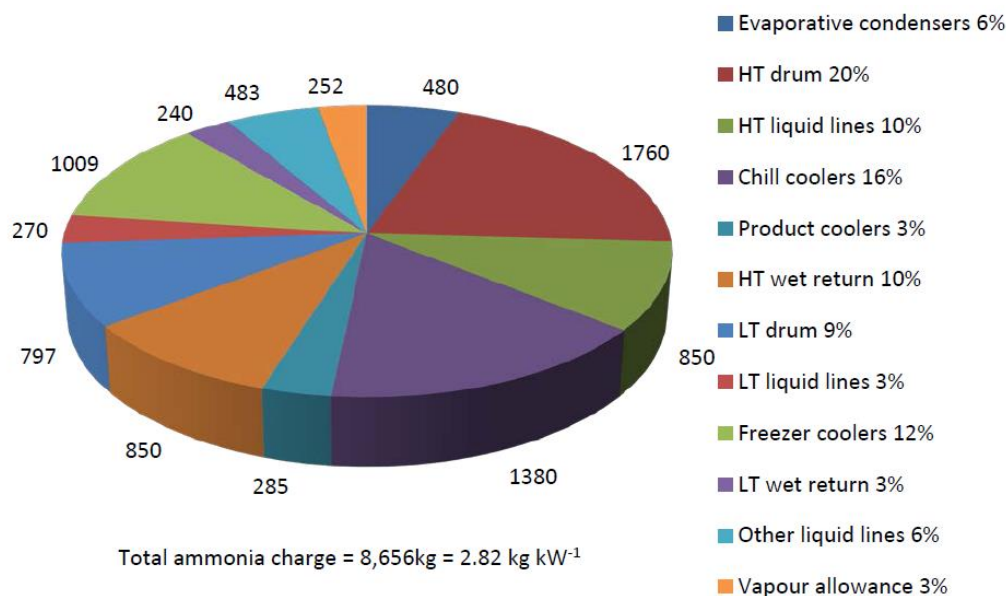
Τα φυσικά χαρακτηριστικά της αμμωνίας της προσδίδουν εγγενή ελαττώματα για χρήση στην ξηρή εκτόνωση. Τα βασικότερα είναι η πολύ μεγάλη πυκνότητα του υγρού σχετικά με το αέριο (ή ισοδύναμα ο πολύ μεγάλος ειδικός όγκος του αερίου σχετικά με του υγρού), που καταλήγει σε πολύ μικρή κατάληψη του εσωτερικού όγκου της σωλήνας του εξατμιστή από υγρό. Το αποτέλεσμα είναι το (λίγο) υγρό να δυσκολεύεται να «βρέξει» την εσωτερική επιφάνεια του εξατμιστή παραμένοντας κάτω κάτω, ενώ το «αδύνατο» αέριο αδυνατεί να «σκορπίσει» εύκολα το υγρό. Τούτο ατυχώς μειώνει το (συνολικό) συντελεστή θερμικής μεταφοράς. Άλλο βασικό μειονέκτημα είναι ότι το «αδύνατο» μίγμα αδυνατεί να παρασύρει προς τα πίσω το (αδιάλυτο στην αμμωνία¹) λάδι που διαφεύγει από το συμπιεστή, με αποτέλεσμα το τελευταίο να επικαλύπτει σταδιακά την εσωτερική επιφάνεια του εναλλάκτη, μειώνοντας περαιτέρω το συντελεστή θερμικής μεταφοράς. Στα πλαίσια της προσπάθειας μείωσης της πλήρωσης έχουν επινοηθεί τεχνικές υπερκάλυψης των ως άνω (και άλλων) προβλημάτων. Ωστόσο, όλες αυτές οι δυσλειτουργίες δεν υφίστανται στην υπερπλήρωση και ως εκ τούτου, τουλάχιστον υπό το πρίσμα των συμβατικών παραδοχών εξακολουθεί να αποτελεί την προτίμηση, ειδικά σε εφαρμογές πολύ χαμηλών θερμοκρασιών. Όπως είδαμε στο προηγούμενο άρθρο, η χρήση του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σε συνεργασία με την αμμωνία (υβριδικά συστήματα) επιτρέπει χαμηλή πλήρωση αμμωνίας, αφού η ιδέα της υπερπλήρωσης (με όλα τα πλεονεκτήματα που προσφέρει) εφαρμόζεται στο CO₂, ενώ η αμμωνία περιορίζεται στο ρόλο του μέσου συμπύκνωσης του CO₂.

ΧΑΜΗΛΗ ΠΛΗΡΩΣΗ - ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΜΜΩΝΙΑΣ

Το σύστημα υπερπλήρωσης αμμωνίας είναι πολύ «γενναιόδωρο» στην ποσότητα πλήρωσης. Ένα μεσαίο σύστημα, για παράδειγμα ψυκτικής ικανότητας 1500 KWR (KW Refrigeration), απαιτεί αμμωνία κοντά στα 4500 kg (3 kg/KWR). Η συντριπτική πλειοψηφία αυτής της μάζας είναι υγρό που είναι κατανομημένο στα διάφορα συστατικά, αλλού με μεγάλη συγκέντρωση και αλλού με

¹ Στα συστήματα υπερπλήρωσης αμμωνίας χρησιμοποιείται φθινό ορυκτό αδιάλυτο λάδι, το οποίο παρασύρεται εύκολα προς τα πίσω λόγω της βεβιασμένης κυκλοφορίας (ψηλό επίπεδο κινητικής ενέργειας). Μια από τις προσπάθειες βελτίωσης της ξηρής εκτόνωσης αμμωνίας είναι η χρήση ευδιάλυτων συνθετικών (ακριβότερων) λαδιών.

μικρή. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται μια τυπική κατανομή της μάζας αμμωνίας ανά συστατικό σε ένα συγκεκριμένο συγκρότημα υπερπλήρωσης² [2].



Σχήμα 1: Κατανομή μάζας αμμωνίας ανά συστατικό σε ένα μεγάλο τυπικό διβάθμιο σύστημα υπερπλήρωσης [2].

Οι εξατμιστές περιέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό μάζας (31%), το οποίο αυξάνεται σημαντικά αν προστεθούν και οι σωληνώσεις (συνολικά 57%) και τα δοχεία διαχωρισμού (συνολικά 86%). Η συνολική ψυκτική ικανότητα της εν λόγω μονάδας είναι 3100 KWR και η συνολική πλήρωση αμμωνίας 8656 kg. Τούτο καταλήγει σε δείκτη πλήρωσης 2,82 kg/KWR [2].

Έχουν γίνει αξιολογικές προσπάθειες στη κατεύθυνση μείωσης των προβλημάτων της ξηρής εκτόνωσης σε αμιγή συστήματα αμμωνίας, βασικότερες των οποίων είναι οι εξής:

- ❖ Εσωτερική διαμόρφωση της εσωτερικής επιφάνειας του εξατμιστή, ώστε ακόμα και η ελάχιστη ποσότητα υγρού να «σκαρφαλώνει» σε αυλακώσεις (τριχοειδής ανύψωση) και τελικά να διαβρέχει όλη την εσωτερική επιφάνεια. Το προφανές αποτέλεσμα είναι η αύξηση του (συνολικού) συντελεστή θερμικής μεταφοράς.
- ❖ Βελτίωση του συστήματος διανομής του μίγματος μετά την εκτόνωση στα επί μέρους στοιχεία του εξατμιστή και με ακρίβεια ποσότητας. Η διανομή αυτή κατά παράδοση γίνεται με διανομείς σαν αυτόν του επομένου σχήματος. Κατά τη διέλευση όμως του ρευστού από το

² Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει δυο κοχλιωτούς χαμηλής βαθμίδας και δοχείο χαμηλής που εξυπηρετούν 108.000 m³ κατάψυξης -29° C με έξι εξατμιστές. Τρεις συμπιεστές ψηλής βαθμίδας και δοχείο ψηλής εξυπηρετούν 134.000 m³ συντήρησης +3° C με δώδεκα εξατμιστές και 49.000 m³ χώρους παραγωγής +13° C με τέσσερεις εξατμιστές. Ο λόγος κυκλοφορίας είναι 4. Δυο εξατμιστικοί συμπυκνωτές. Οι είκοσι δύο εξατμιστές βρίσκονται στον κεντρικό επιμήκη άξονα του κτιρίου και αντίστοιχα τρέχουν οι σωληνώσεις στη στέγη.

διανομέα υπάρχει μεγάλη πτώση πίεσης, που προστίθεται σε αυτή της εκτονωτικής βαλβίδας και υπονομεύει την απόδοση. Επίσης, κατά τη διάρκεια του κύκλου απόψυξης ο διανομέας μπορεί να περιορίζει τη ροή του του θερμού αερίου.



Σχήμα 2: Παραδοσιακός διανομέας μίγματος υγρού - αερίου σε στοιχεία εξατμιστή μετά την εκτόνωση.

- ❖ Ηλεκτρονικές εκτονωτικές βαλβίδες με ακριβή μέτρηση της ποιότητας του μίγματος σε διάφορες θέσεις του εξατμιστή και μεγαλύτερη ασφάλεια έναντι διαφυγής υγρού προς τον συμπιεστή, με ταυτόχρονη μείωση έως εξαφάνιση της άχρηστης υπερθέρμανσης στην έξοδο.
- ❖ Όργανα ελέγχου με ήπιες εντολές και αρμονική μεταξύ τους συνεργασία. Για παράδειγμα μια ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα, αντί να κλείνει / ανοίγει απότομα, να έχει μια προοδευτικότητα.
- ❖ Επιλογή υλικού εξατμιστή μεγαλύτερης αγωγιμότητας από τον παραδοσιακό χάλυβα. Στην [2] δίνεται ο επόμενος πίνακας μετάλλων για χρήση αμμωνίας.

ΥΛΙΚΟ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (kg/m ³)	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (W/m.K)	ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ (KJ/kg.K)
Αλουμίνιο	2643	202	0,90
Ανοξειδ. χάλυβας 304L	8030	16	0,50
Γαλβανισμένος χάλυβας	7048	46	0,39

Πίνακας 1: Ιδιότητες υλικών κατασκευής εξατμιστών [2].

- ❖ Επιλογή μεθοδολογίας ψύξης του λαδιού κοχλιωτών συμπιεστών με γλυκόλη αντί με θερμοσιφωνική δράση αμμωνίας. Η απαλοιφή του θερμοσιφωνικού δοχείου και των σχετικών σωληνώσεων μπορεί να εξοικονομήσει μέχρι και 0,5 kg/KWR [2].

Με βάση την σημερινή εξέλιξη, μπορούμε να διαχωρίσουμε τα συστήματα χαμηλής πλήρωσης αμμωνίας σε αμιγούς αμμωνίας και σε υβριδικά (αμμωνία + CO₂). Τα υβριδικά συστήματα (κεντρικά και αυτόνομες μονάδες) αφορούν συνεργασία αμμωνίας με CO₂, που σαν φυσικό αέριο και αυτό δεν υφίσταται κανένα νομικό περιορισμό.

Πιο είναι το κριτήριο που χαρακτηρίζει ένα σύστημα αμμωνίας σαν «χαμηλής πλήρωσης»; Σύμφωνα με ένα υποκειμενικό κριτήριο που θέτει ο International Association of Refrigerated Warehouses, ένα σύστημα αμμωνίας μπορεί να χαρακτηρίζεται «χαμηλής πλήρωσης» αν περιέχει κατά μέγιστο το 50% ενός «ήπια» βελτιστοποιημένου ισοδύναμου συστήματος υπερπλήρωσης. Εφόσον για παράδειγμα το τελευταίο περιέχει αμμωνία της τάξης των 2,6 kg /KWR, σαν σύστημα χαμηλής πλήρωσης σύμφωνα με το ως άνω κριτήριο μπορεί να χαρακτηρίζεται οποιοδήποτε σύστημα έχει πλήρωση αμμωνίας < 1,3 kg/KWR.

Η βασική αρχή της μείωσης της πλήρωσης στα αμιγή συστήματα αμμωνίας είναι η πολύ προσεκτική (άκρως βελτιστοποιημένη) εφαρμογή της ξηρής εκτόνωσης. Η μείωση της ποσότητας πλήρωσης που μπορεί να επιτευχθεί είναι δραματική. Η μείωση της πλήρωσης των εξατμιστών μπορεί να είναι 96,9 - 98,5% [2]. Στον επόμενο πίνακα φαίνονται οι έντονα μειωμένες ποσότητες αμμωνίας σε καλοσχεδιασμένους εξατμιστές ξηρής εκτόνωσης, σε σχέση με τους ισοδύναμους υπερπληρωμένους εξατμιστές [2].

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ (°C)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΥΓΡΗΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ (kg/m ³)	ΜΑΖΑ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΤΩΝ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΛΗΣΗΣ (kg)	ΜΑΖΑ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΤΩΝ ΜΕ ΞΗΡΗ ΕΚΤΟΝΩΣΗ (kg)	% ΜΑΖΑΣ ΞΗΡΗΣ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΛΗΣΗΣ
-6,7	649	519	16,2	3,1%
-17,8	662	530	13,3	2,5%
-28,9	676	541	10,1	1,9%
-40,0	690	552	8,3	1,5%

Πίνακας 2: Σύγκριση ποσοτήτων πλήρωσης εξατμιστών με αμμωνία (υπερπλήρωση bottom feed - ξηρή εκτόνωση top feed) [2].

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Νίκος Χαριτωνίδης «ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΨΥΞΗΣ – ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΑΜΜΩΝΙΑ», 2020.
2. R. Lamb "Low Charge Packaged Ammonia Refrigeration Systems", 7th IIR Conference: Ammonia and CO2 Refrigeration Technologies, Ohrid, 2017.