



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ
ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ**



Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»

Υγρό ήλιο και εφαρμογές - Σύγχρονες προκλήσεις

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του Τζίφα Μιχαήλ

Ερευνητικός Επιβλέπων:	Ακαδημαϊκός Επιβλέπων:
Ιωάννης Σανάκης Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας, Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος»	Απόστολος Κυρίτσης Τομέας Φυσικής, ΣΕΜΦΕ, Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος, 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

Υγρό ήλιο και εφαρμογές – Σύγχρονες προκλήσεις

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΤΖΙΦΑ ΜΙΧΑΗΛ

Επιβλέπων : Σανάκης Ιωάννης
Ερευνητής Α, Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 7 Μαρτίου 2016.

(Υπογραφή)

.....

Σανάκης Ιωάννης
Ερευνητής Α
Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

(Υπογραφή)

.....

Κουσουρής Κωνσταντίνος
Επίκουρος Καθηγητής
ΣΕΜΦΕ

(Υπογραφή)

.....

Κυρίτσης Απόστολος
Επίκουρος Καθηγητής
ΣΕΜΦΕ

Αθήνα, Μάρτιος 2016

(Υπογραφή)

.....

Τζίφας Μιχαήλ

Πτυχιούχος Φυσικός, Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν μελέτη των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του υγρού ηλίου και η χρησιμότητά του σε κρυογονικές εφαρμογές. Το υγρό ήλιο είναι το μοναδικό υγρό που φτάνει σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες σε ατμοσφαιρική πίεση κάτι που το κάνει μέχρι τώρα αναντικατάστατο σε κρυογονικά συστήματα, τα οποία μπορεί να έχουν άμεσες και καθημερινές πρακτικές εφαρμογές όπως οι μαγνητικοί τομογράφοι σε νοσοκομεία και διαγνωστικά κέντρα.

Στα πλαίσια της διπλωματικής μελετήθηκε η υγροποίηση του ηλίου θεωρητικά αλλά και πρακτικά. Γίνεται αναλυτική περιγραφή της μοναδικής εγκατάστασης ανακύκλωσης και υγροποίησης ηλίου στην Ελλάδα που υπάρχει από το 1986. Με βάση τα στοιχεία του εργαστηρίου υγροποίησης, έγινε οικονομοτεχνική μελέτη της εγκατάστασης αυτής για τα τελευταία 7 χρόνια.

Τέλος αναφέρεται η αναγκαιότητα δημιουργίας εθνικού αποθέματος αερίου ηλίου και περιγράφεται η προσπάθεια γενίκευσης της ανακύκλωσης μέσω πρότυπης μονάδας ανάκτησης του ηλίου που δημιουργήθηκε στο εργαστήριο High Resolution NMR του ερευνητικού κέντρου «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ». Τα δεδομένα και η γνώση από τη λειτουργία της μονάδας αυτής μπορούν να χρησιμοποιηθούν γενικευμένα σε μαγνητικούς τομογράφους σε όλη τη χώρα, με σκοπό την ανάκτηση αυτού του πολύτιμου αερίου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	σελ
Εισαγωγή	5
Κεφάλαιο 1	
Το ήλιο ως κλασικό υγρό	
1.1 Εισαγωγή	7
1.2 Το διάγραμμα φάσης του ηλίου	7
1.3 Το αέριο ήλιο	9
1.4 Μοριακές αλληλεπιδράσεις	11
1.5 Επέκταση Virial	13
1.6 Εμπειρικές εξισώσεις	13
1.7 He I – θερμοδυναμικές ιδιότητες	15
1.7.1 Πυκνότητα κορεσμού	15
1.7.2 Εντροπία- ειδική θερμότητα- λανθάνουσα θερμότητα	17
1.7.3 Τάση ατμών	19
Κεφάλαιο 2	
Μηχανική συστημάτων ροής ηλίου	
2.1 Εισαγωγή	21
2.2 Υγροποίηση και συστήματα ψύξης	22
2.3 Ιδανική υγροποίηση	24
Κεφάλαιο 3	
Εφαρμογές του υγρού ηλίου- Έλλειψη και ανακύκλωση	
3.1 Εισαγωγή	31
3.2 Έλλειψη ηλίου	33
3.3 Χρήση στην έρευνα και στην τεχνολογία στην Ελλάδα	35
3.4 Υγροποίηση ηλίου στην Ελλάδα	36
3.4.1 Περιγραφή αναβαθμισμένης εγκατάστασης ηλίου	36
3.4.2 Οικονομοτεχνική μελέτη της ανακύκλωσης του ηλίου για το ερευνητικό κέντρο «Δημόκριτος»	44
3.4.3 Προσπάθειες γενίκευσης της ανακύκλωσης του ηλίου στην Ελλάδα	47
Παράρτημα 1	57
Παράρτημα 2	59
Παράρτημα 3	60
Παράρτημα 4	63

Εισαγωγή

Η κρυογονική ασχολείται με την επίτευξη θερμοκρασιών κάτω από $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (123 K) έως το απόλυτο μηδέν (-273 C ή 0 K), που είναι η θερμοκρασία στην οποία τα μόρια θεωρητικά τείνουν στην ακινησία.

Η εφαρμογή της κρυογονικής χωρίζεται χονδρικά σε πέντε κύριες περιοχές:

- i) Στην υγροποίηση και διαχωρισμό των αερίων
- ii) Στην αποθήκευση και μεταφορά των αερίων
- iii) Στην αλλοίωση των υλικών και τις ιδιότητες των ρευστών σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες
- iv) Σε βιολογικές και ιατρικές εφαρμογές
- v) Στην υπεραγωγιμότητα

Από την πρώτη υγροποίηση του ηλίου από τον Heike Kammerlingh Onnes το 1908, η κρυογονική έχει εξελιχθεί σε επιστήμη της μηχανικής που συνδυάζει διαφορετικές τεχνολογίες για να επιτευχθεί ένας συγκεκριμένος στόχος. Μόνο υγρά που έχουν τριπλό σημείο (το σημείο όπου τέμνονται οι τρεις καμπύλες ισορροπίας αέριο–υγρό, υγρό–στερεό και αέριο–στερεό) κάτω από 100 K θεωρούνται «κρυογονικά», δηλαδή είναι ακόμα σε υγρή ή αέρια μορφή κάτω από αυτήν τη θερμοκρασία. Ο παρακάτω πίνακας δείχνει κάποιες ιδιότητες των κρυογονικών ρευστών. Η κρίσιμη θερμοκρασία είναι το ανώτερο όριο στο οποίο μπορεί να εμφανιστεί το ρευστό σε υγρή φάση.

Fluid		^4He	H_2	Ne	N_2	O_2
Normal boiling point	[K]	4.22	20.4	27.2	77.4	90.2
Critical temperature	[K]	5.20	33.2	44.4	126.	155.
Critical pressure	[MPa]	0.23	1.32	2.72	3.39	5.08
Triple point temperature	[K]	2.18*	14.0	24.6	63.1	54.4
Triple point pressure	[kPa]	5.04*	7.20	43.2	12.8	0.15
Liquid density at ambient pressure	[kg/m ³]	125.	70.8	1204.	808	1140
Vapour density at ambient pressure	[kg/m ³]	16.7	1.33	9.46	4.59	4.75
Normal density	[kg/m ³]	0.18	0.09	0.90	1.25	1.43

* Σημείο λ. Το ήλιο δεν έχει τριπλό σημείο. Στο σημείο λ έχουμε τη μετάβαση από κανονικό σε υπέρρευστο υγρό

Πίνακας 1: Ιδιότητες κρυογονικών ρευστών

Το υδρογόνο χρησιμοποιείται ελάχιστα ως ψυκτικό υγρό ψύξης και το οξυγόνο δεν χρησιμοποιείται ποτέ λόγω των σοβαρών κινδύνων που συνεπάγεται η χρήση τους. Το νέον αν και είναι ένα αδρανές αέριο, είναι πολύ δαπανηρό στη χρήση του και ως εκ τούτου δεν έχει χρησιμοποιηθεί μέχρι τώρα. Κατά συνέπεια, τα μόνα υγρά που χρησιμοποιούνται είναι το ήλιο και το άζωτο. Η εμφάνιση των υψηλότερης κρίσιμης θερμοκρασίας σε υπεραγώγιμα υλικά έχει ανοίξει το δρόμο για τη χρήση αζώτου ως ψυκτικό υγρό. Δεδομένου ότι το εύρος της εφαρμογής του αζώτου περιορίζεται από το τριπλό του σημείο, ακόμα και σήμερα το επικρατέστερο ψυκτικό μέσο είναι το ήλιο.

Κεφάλαιο 1

Το Ήλιο ως κλασικό υγρό

1.1 Εισαγωγή

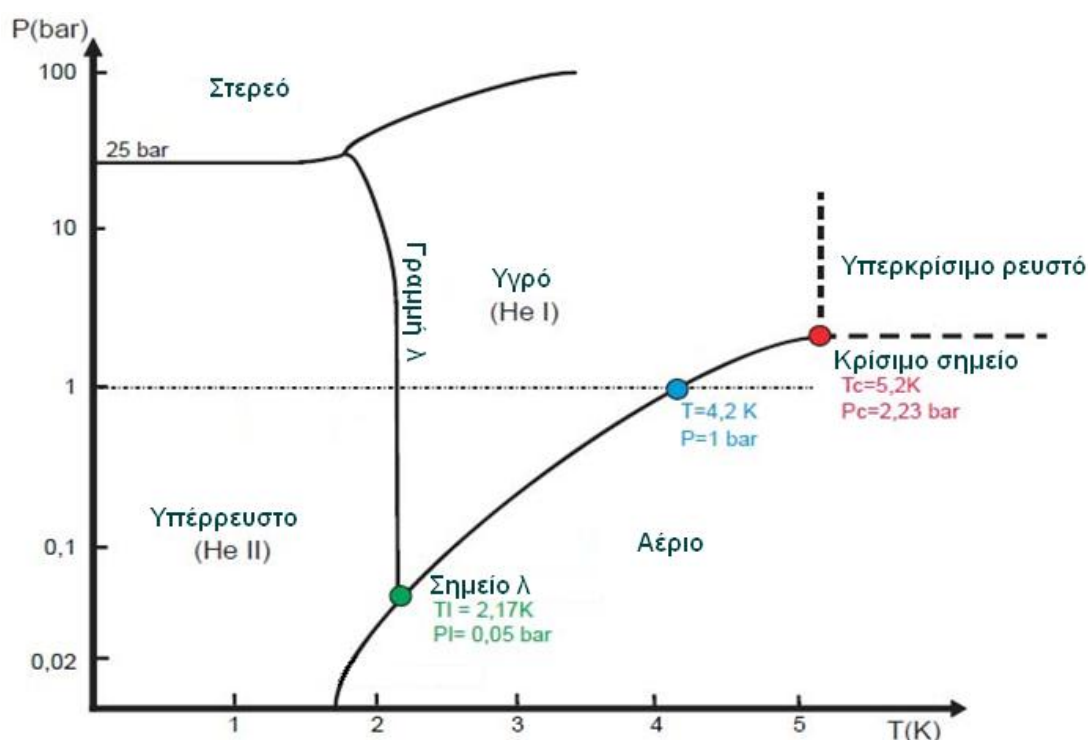
Από το σύνολο των ρευστών σε κρυογονική κατάσταση, το ήλιο επιδεικνύει συμπεριφορά που προσεγγίζει εκείνη ενός ιδανικού υγρού. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στις ασθενείς δυνάμεις μεταξύ των μορίων του. Ως αποτέλεσμα αυτής της εγγύτητας στην ιδανικότητα, μεγάλο μέρος της συμπεριφοράς του αερίου αλλά ακόμα και του υγρού ηλίου πάνω από την υπέρρευστη κατάσταση (κατάσταση όπου το υγρό έχει μηδενικό ιξώδες και ρέει χωρίς αντίσταση), μπορεί να αντιμετωπιστεί από τα κλασικά μοντέλα. Αυτό δεν σημαίνει ότι τα κβαντικά φαινόμενα δεν συμβάλλουν στην συμπεριφορά του, όμως ορισμένα χαρακτηριστικά του ηλίου σε αυτό το εύρος θερμοκρασίας και πίεσης ελέγχονται από ένα συνδυασμό φυσικών φαινομένων, τα οποία μπορεί ποιοτικά αν όχι και ποσοτικά να περιγραφούν υπό όρους από τα κλασικά μοντέλα φυσικής. Αντιστρόφως, ορισμένα χαρακτηριστικά του ηλίου, ιδίως στην υγρή κατάσταση κάτω από την υπέρρευστη μετάβαση, αλλά και τη στερεά κατάσταση, έχουν ιδιότητες οι οποίες είναι τόσο καθορισμένες από την κβαντική μηχανική που η κλασική φυσική δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να ερμηνεύσει με ουσιαστικό τρόπο τη συμπεριφορά τους. Το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται σε εκείνες τις ιδιότητες του ^4He που είναι τουλάχιστον ημικλασικές.

1.2 Το διάγραμμα φάσης του ηλίου

Ως σημείο εκκίνησης για την περιγραφή του υγρού και αερίου ηλίου, είναι χρήσιμο να αναφερθούμε στο διάγραμμα φάσης P-T, (σχήμα 1.1). Το διάγραμμα φάσης είναι ένα διάγραμμα πίεσης- θερμοκρασίας, όπου οι καμπύλες μας δείχνουν τις συνθήκες κάτω από τις οποίες συνυπάρχουν δύο, ή ακόμα και τρεις φάσεις (δε συμβαίνει στο ήλιο). Μεταξύ των καμπύλων το στοιχείο βρίσκεται στην υγρή, στην υπέρρευστη, στην αέρια, στη στερεή ή στην κατάσταση του υπερκρίσιμου υγρού στην οποία αναφερθήκαμε παραπάνω. Η καμπύλη φάσης είναι αυτή που υποδεικνύει τις συνθήκες κάτω από τις οποίες μπορεί να συνυπάρξει ένα υγρό με τους ατμούς του και τελειώνει σε ένα τελικό σημείο σε κάποια κρίσιμη θερμοκρασία T_c και σε

κάποια κρίσιμη πίεση P_c . Αυτό είναι το κρίσιμο σημείο. Λόγω των ασθενών ενδομοριακών δυνάμεων το ${}^4\text{He}$ έχει το χαμηλότερο κρίσιμο σημείο όλων των υγρών, $T_c=5.195\text{K}$, $P_c= 2.27\text{bar}$ και $\rho_c= 69.7\text{Kg/m}^3$. Το κρίσιμο σημείο είναι το τελικό σημείο σε μια καμπύλη φάσης υγρού αερίου. Μετά το κρίσιμο σημείο περνάμε στη φάση του υπερκρίσιμου ρευστού, το οποίο δεν είναι αμιγώς αέριο ή υγρό, οι δύο φάσεις έχουν διαλυθεί η μία μέσα στην άλλη.

Εκτός από τα συμβατικά χαρακτηριστικά όπως το κρίσιμο σημείο και η συνύπαρξη δύο φάσεων, υπάρχουν πολλά μοναδικά χαρακτηριστικά σε αυτό το διάγραμμα φάσεων τα οποία θα πρέπει να σημειωθούν.



Σχήμα 1.1: Το διάγραμμα φάσης του ηλίου

Πρώτον, σε αντίθεση με όλες τις άλλες ουσίες, η στερεά κατάσταση του ηλίου δεν μπορεί να ληφθεί σε οποιαδήποτε θερμοκρασία εάν δεν εφαρμόζεται μια εξωτερική πίεση μεγαλύτερη από 25bar. Αυτό το χαρακτηριστικό του ηλίου οφείλεται στη μεγάλη ενέργεια μηδενικού σημείου του μορίου του ηλίου, της ελάχιστης δηλαδή ενέργειας που κατέχει ένα σύστημα σε κβαντικό επίπεδο. Έτσι, η χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση του ηλίου είναι αυτή του υπέρρευστου υγρού ηλίου στην κατάσταση II.

Το ήλιο έχει επίσης την ιδιαιτερότητα να έχει δύο υγρές φάσεις. Στην περιοχή I είναι κανονικό υγρό με χαρακτηριστικά τα οποία είναι τυπικά των κλασικών υγρών. Στην περιοχή αυτή, το ήλιο συμπεριφέρεται ως ασθενώς αλληλεπιδρόν αέριο, εξαιτίας της ασθενούς ενδομοριακής αλληλεπίδρασης και του χαμηλού ιξώδους. Το ιξώδες του He I είναι συγκρίσιμο με εκείνο του αέρα σε θερμοκρασία δωματίου.

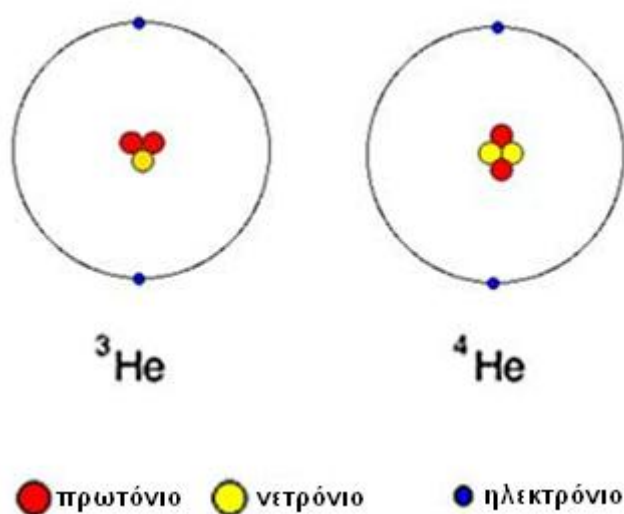
Το He II, ή υπέρρευστο ήλιο, έχει ιδιαίτερα φυσικά χαρακτηριστικά. Το πιο αξιοσημείωτο από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι οι μεταφορικές ιδιότητες, με ένα πολύ μικρό ιξώδες και μία φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από υγρά ή στερεά ακόμη και υψηλής αγωγιμότητας. Η καμπύλη που χωρίζει τα δύο υγρά στο διάγραμμα φάσης ονομάζεται λ -line. Ο χαρακτηρισμός δόθηκε διότι η ειδική θερμότητα κοντά στη μετάβαση έχει το σχήμα του ελληνικού γράμματος λ . Η θερμοκρασία της μετάβασης λ είναι 2.178K σε πίεση κορεσμένων ατμών και μειώνεται σταδιακά με αυξανόμενη πίεση μέχρι να συναντήσει το όριο με τη στερεή συνύπαρξη στο $T=1,763\text{K}$, $P=29.74\text{bar}$.

Το διάγραμμα φάσεως του ηλίου είναι επίσης μοναδικό στο ότι στερείται ενός τριπλού σημείου, δηλαδή της συνύπαρξης μεταξύ υγρού, ατμών και στερεού, επειδή η στερεά κατάσταση μπορεί να υπάρξει μόνο υπό μια εξωτερική πίεση. Το σημείο τομής της γραμμής λ με τη συνύπαρξη των δύο περιοχών του υγρού και του ατμού ή του στερεού και των υγρών δεν είναι ένα τριπλό σημείο. Η μετάβαση λ είναι μια μεταβατική φάση δεύτερης τάξης, πράγμα που σημαίνει ότι έχει μια ασυνεχή κλίση στην θερμοκρασιακή εξάρτηση της εντροπίας. Δεν υπάρχει λανθάνουσα θερμότητα σχηματισμού της κατάστασης II και η συνύπαρξη He I και He II υπό συνθήκες ισορροπίας δεν είναι δυνατή.

1.3 Το αέριο ήλιο

Το ήλιο έχει ατομικό αριθμό 2 και ατομική μάζα 4,002602 amu (το ^4He). Το ισότοπό του ^3He έχει ατομική μάζα 3.0160293 amu, αλλά υπάρχει στη φύση σε ελάχιστο ποσοστό του φυσικού He (0.000137%). Είναι άχρωμο, άοσμο, άγευστο, μη τοξικό, ιδανικό, μονοατομικό αέριο, που είναι επικεφαλής των ευγενών αερίων του περιοδικού πίνακα. Το ήλιο σε θερμοκρασίες πάνω από το κανονικό σημείο ζέσεως του συμπεριφέρεται περισσότερο σαν ένα ιδανικό αέριο από οποιαδήποτε άλλο γνωστό ρευστό. Το γεγονός αυτό είναι το αποτέλεσμα του

Ισότοπα του ηλίου



Σχήμα 1.2: Τα φυσικά ισότοπα του ηλίου

ασθενούς διατομικού δυναμικού και της σφαιρικά συμμετρικής μοριακής διαμόρφωσης. Φυσικά σε κάποιο σημείο το αέριο ήλιο πρέπει να αποκλίνει από το ιδεατό, αλλιώς φυσικά φαινόμενα όπως το φαινόμενο Joule Thomson (παράρτημα 1) και η υγροποίηση δεν θα συμβούν. Ωστόσο, λόγω της ομοιότητάς του με ένα ιδανικό αέριο, είναι συχνά πιο εύκολο να εξετάσει κανείς τις ιδιότητες του αερίου ηλίου με το μοντέλο του ιδανικού αερίου.

Από πειραματική άποψη, οι πιο κοινές μετρήσεις είναι αυτές της ειδικής θερμότητας, C_P και C_V , και οι καταστατικές ιδιότητες της πίεσης, της θερμοκρασίας, και του ειδικού όγκου. Οι τελευταίες μετρήσεις οδηγούν στην καταστατική εξίσωση του αερίου, η οποία στην πλήρη μορφή της μπορεί να συνδυαστεί με τις αρχές της θερμοδυναμικής για τον προσδιορισμό των σχετικών καταστατικών εξισώσεων συμπεριλαμβανομένης της εντροπίας και της ενθαλπίας. Η καταστατική εξίσωση, η οποία είναι μια σχέση μεταξύ των P , V και T , δεν μπορεί να προσδιοριστεί επακριβώς για ένα συγκεκριμένο πραγματικό αέριο. Ωστόσο, υπάρχει ένας αριθμός προσεγγιστικών σχέσεων που δίνουν σημαντική φυσική διορατικότητα στις διαδικασίες που εμπλέκονται. Η πιο αξιοσημείωτη προσέγγιση για την καταστατική εξίσωση είναι η εξίσωση virial, η οποία περιλαμβάνει τις ενδομοριακές αλληλεπιδράσεις. Επιπλέον, για την περιγραφή των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των μορίων του αερίου ηλίου, ιδιαίτερα κοντά στο κρίσιμο σημείο $T_c=5.2\text{K}$, είναι απαραίτητη η γνώση κβαντομηχανικής. Το πιο κοινό ισότοπο του ηλίου, το ${}^4\text{He}$,

υπακούει στη στατιστική Bose-Einstein, η οποία πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για την πλήρη περιγραφή του αερίου.

1.4 Μοριακές αλληλεπιδράσεις

Κάθε μικροσκοπικό μοντέλο για τη συμπεριφορά του ηλίου έχει ως βάση του την κατανόηση του διαμοριακού δυναμικού. Αυτή η αλληλεπίδραση είναι ακριβώς αυτό που αγνοείται στο μοντέλο του ιδανικού αερίου. Το ενδομοριακό δυναμικό περιλαμβάνει τις δυνάμεις μεταξύ των μεμονωμένων μορίων που προκαλούνται από το πεπερασμένο μέγεθος τους και την αμοιβαία έλξη. Εάν το μόριο ηλίου υπάκουε στην κλασική μηχανική και το ενδομοριακό δυναμικό ήταν γνωστό, τότε θα ήταν δυνατό να υπολογιστούν οι καταστατικές του ιδιότητες απ'ευθείας. Ωστόσο, σε κάθε πραγματικό δείγμα του φυσικού αερίου, υπάρχουν πάρα πολλά μόρια ($\sim 10^{26} / \text{m}^3$) για την ρεαλιστική πραγματοποίηση αυτού του υπολογισμού. Ως αποτέλεσμα, η κανονική προσέγγιση είναι η χρήση εμπειρικών δυναμικών τα οποία περιγράφουν τη μέση μοριακή αλληλεπίδραση. Για να μοντελοποιήσουμε σωστά το πρόβλημα, αυτά τα δυναμικά πρέπει να περιέχουν τη φυσική της μοριακής αλληλεπίδρασης, η οποία αποτελείται κυρίως από δύο όρους:

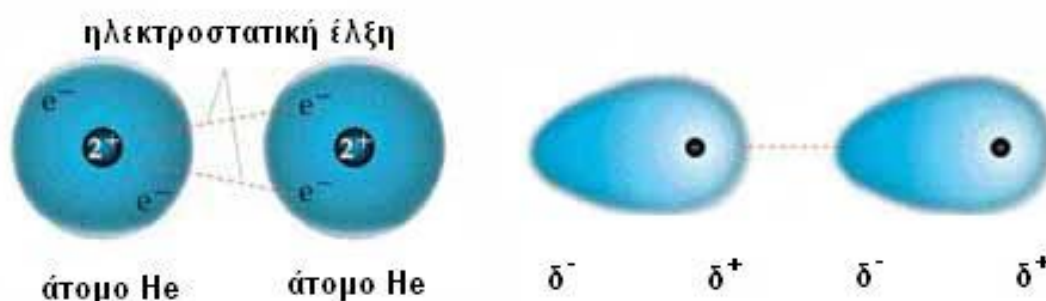
(1) Την απωστική αλληλεπίδραση του πυρήνα και

(2) Την ασθενέστερη ελκυστική αλληλεπίδραση που οφείλεται σε αυτό που ονομάζεται ο μηχανισμός της διασποράς του London (παράρτημα 2).

Η απωστική αλληλεπίδραση του πυρήνα μπορεί να γίνει κατανοητή με αρκετά απλό τρόπο. Τα μόρια καταλαμβάνουν όγκο και ως εκ τούτου συγκρούονται μεταξύ τους, κάτι που είναι γνωστό ως διατομή σκέδασης και μία μέση ελεύθερη διαδρομή μεταξύ των συγκρούσεων. Οι λεπτομέρειες αυτής της σύγκρουσης, περιέχονται στην κλίση του απωστικού δυναμικού. Η αλληλεπίδραση του πυρήνα θα προκαλέσει αποκλίσεις από τη συμπεριφορά του ιδανικού αερίου, επειδή το μοντέλο υποθέτει ότι τα μόρια είναι σημειακά μη αλληλεπιδρώντα σωματίδια. Η διόρθωση της καταστατικής εξίσωσης είναι μεγαλύτερη σε υψηλή πυκνότητα και θερμοκρασία.

Για να εξηγήσουμε το μηχανισμό των ασθενών ελκυστικών αλληλεπιδράσεων της διασποράς του London θα χρησιμοποιήσουμε ένα μοντέλο ατόμων ηλίου (2 ηλεκτρόνια). Η μέση κατανομή των ηλεκτρονίων γύρω από κάθε πυρήνα είναι σφαιρικά συμμετρική. Τα άτομα είναι μη πολωμένα και δεν διαθέτουν διπολική ροπή. Η στιγμιαία κατανομή των ηλεκτρονίων γύρω από ένα άτομο, μπορεί όμως να μην

είναι απόλυτα συμμετρική. Αμφότερα τα ηλεκτρόνια μπορεί να είναι στην μία πλευρά του πυρήνα. Το άτομο θα έχει μια φαινομενικά διπολική ροπή εκείνη τη στιγμή (δηλαδή ένα στιγμιαίο δίπολο). Ένα γειτονικό άτομο θα επηρεαστούν από αυτό το δίπολο και τα ηλεκτρόνια του θα κινηθούν μακριά από την αρνητική περιοχή του στιγμιαίου διπόλου. Άρα λόγω της ηλεκτρονιακής άπωσης, ένα στιγμιαίο δίπολο για ένα άτομο μπορεί να προκαλέσει ένα παρόμοιο δίπολο σε ένα γειτονικό άτομο. Αυτό θα προκαλέσει στιγμιαία έλξη στα γειτονικά άτομα. Αυτό ονομάζεται η δύναμη διασποράς του London και έχει σημαντικό ρόλο μόνο όταν τα άτομα βρίσκονται κοντά μεταξύ τους.



Σχήμα 1.3: Δυνάμεις διασποράς London για το μόριο του ηλίου

Στο ήλιο ακόμη και αυτές οι δυνάμεις λόγω των στιγμιαίων διπόλων δεν είναι πολύ μεγάλες, εξαιτίας του μικρού μεγέθους του μορίου του. Μεγαλύτερα μόρια τείνουν να έχουν μεγαλύτερη δυνατότητα πόλωσης, αφού τα ηλεκτρόνια τους είναι πιο μακριά από τον πυρήνα (κάθε ασύμμετρη κατανομή παράγει ένα μεγαλύτερο δίπολο λόγω του μεγαλύτερου διαχωρισμού του φορτίου) και ο αριθμός των ηλεκτρονίων έχει μεγαλύτερη πιθανότητα για ασύμμετρη κατανομή.

1.5 Επέκταση Virial

Μια επέκταση της καταστατικής εξίσωσης που ενσωματώνει τις ενδομοριακές δυνάμεις είναι η επέκταση Virial.

$$pv = RT\left(1 + \frac{B}{v} + \frac{C}{v^2} + \frac{D}{v^3} + \dots\right) \quad (1.1)$$

Οι ποσότητες B, C, D,... καλούνται ο δεύτερος, ο τρίτος, ο τέταρτος και ούτω καθεξής, συντελεστής virial. Στην παραπάνω μορφή της επέκτασης virial κάθε συντελεστής περιγράφει ένα συγκεκριμένο τύπο αλληλεπίδρασης. Έτσι, ο δεύτερος συντελεστής virial B περιλαμβάνει διορθώσεις λόγω των αλληλεπιδράσεων δύο σωμάτων. Ο τρίτος συντελεστής C ενσωματώνει τις διορθώσεις που οφείλονται σε αλληλεπιδράσεις τριών σωμάτων, και οι όροι υψηλότερης τάξης ακολουθούν την ίδια σειρά.

Η επέκταση virial γίνεται ακόμη πιο δύσκολο να αξιολογηθεί κατά τη μελέτη του αερίου ηλίου σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες εξαιτίας της ανάγκης να συμπεριληφθούν κβαντομηχανικά φαινόμενα στην ανάλυση.

1.6 Εμπειρικές εξισώσεις

Η ανάπτυξη της θεωρίας της κβαντικής επέκτασης virial είναι χρήσιμη για την κατανόηση της πολυπλοκότητας του αερίου ηλίου σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο, η παραπάνω μορφή είναι πολύ δύσχρηστη για εφαρμογές που χρειάζονται γρήγορους υπολογισμούς. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί οι εμπειρικές εξισώσεις που χωρίς να επιλύουν πλήρως το πρόβλημα, παρέχουν ένα εργαλείο για υπολογισμούς. Με μια λύση κλειστής μορφής για την καταστατική εξίσωση, είναι μια μάλλον απλή διαδικασία να αποκομίσουμε τις άλλες σημαντικές θερμοδυναμικές ιδιότητες. Η απλούστερη εμπειρική καταστατική εξίσωση λαμβάνει υπόψη τις αποκλίσεις από την ιδανική συμπεριφορά σε σχέση με τον παράγοντα συμπίεσης z. Ο παράγοντας συμπίεσης ορίζεται ως:

$$Z = \frac{pv}{RT} \quad (1.2)$$

και προφανώς είναι ίσος με τη μονάδα για ένα ιδανικό αέριο. Ιστορικά, η τιμή του Z είναι δεδομένη εμπειρικά είτε γραφικά είτε σε μορφή πίνακα. Για το ήλιο φαίνεται γραφικά στα διαγράμματα του σχήματος 1.4.

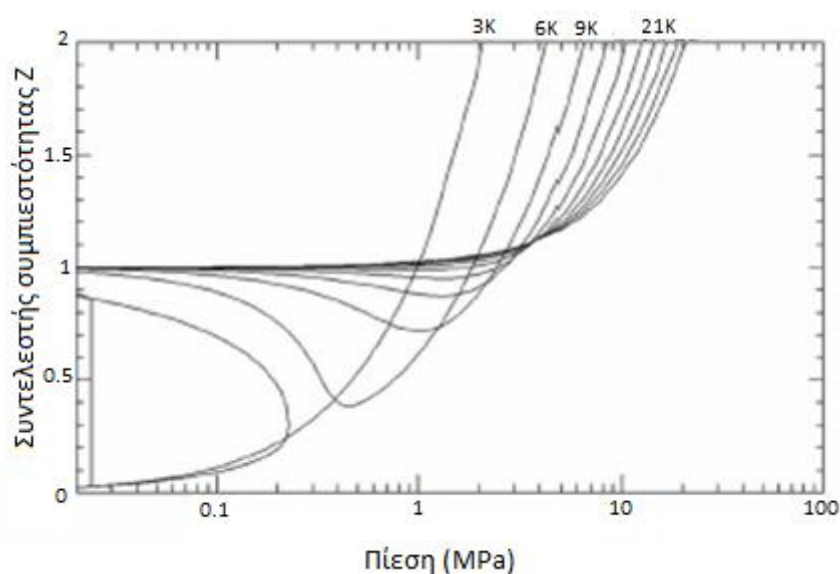
Για το ιδανικό αέριο ισχύει $Z = 1$

Πραγματικά αέρια:

$Z > 1$: κυριαρχούν οι απωστικές δυνάμεις μεταξύ των μορίων

$Z < 1$: κυριαρχούν οι ελκτικές δυνάμεις

Όταν $p \rightarrow 0$, $Z \rightarrow 1$



Σχήμα 1.4: Συντελεστής συμπίεστικότητας του He σε συνάρτηση με την πίεση, για διαφορετικές θερμοκρασίες

Η πιο κοινή κλασική καταστατική εξίσωση ενός πραγματικού αερίου είναι η εξίσωση van der Waals:

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \quad (1.3)$$

Εδώ οι σταθερές a και b υπολογίζονται πειραματικά και εξαρτώνται από το συγκεκριμένο αέριο και είναι ανεξάρτητοι από τη θερμοκρασία. Η εξίσωση van der Waals είναι μια προσεγγιστική εξίσωση η οποία λαμβάνει υπ' όψη της την ύπαρξη

απωστικών και ελκτικών δυνάμεων μεταξύ των μορίων. Η σταθερά b είναι συναφής με το δυναμικό του σκληρού πυρήνα, έτσι ώστε ακόμη και σε $T=0$, το ρευστό καταλαμβάνει ένα πεπερασμένο όγκο. Η σταθερά a είναι μια φαινόμενη μείωση της πίεσης που οφείλεται στις ενδομοριακές έλξεις. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι συντελεστές της καταστατικής εξίσωσης van der Waals στο κρίσιμο σημείο για διάφορα κρυογονικά αέρια:

Fluid	T_c (K)	p_c (MPa)	a ($m^6kPa/kmol^2$)	b ($m^3/kmol$)	T_{Bo} (K)
He	5.195	0.2275	3.46	0.0237	17.6
H ₂	33.19	1.315	24.4	0.0262	112
Ne	44.49	2.678	21.5	0.0173	149
Air	133.0	3.867	133	0.0357	448
N ₂	126.2	3.396	137	0.0386	427
Ar	150.7	4.863	136	0.0322	508
O ₂	154.6	5.043	138	0.0318	522

Σχήμα 1.5: Συντελεστές της εξίσωσης van der Waals για διάφορα αέρια

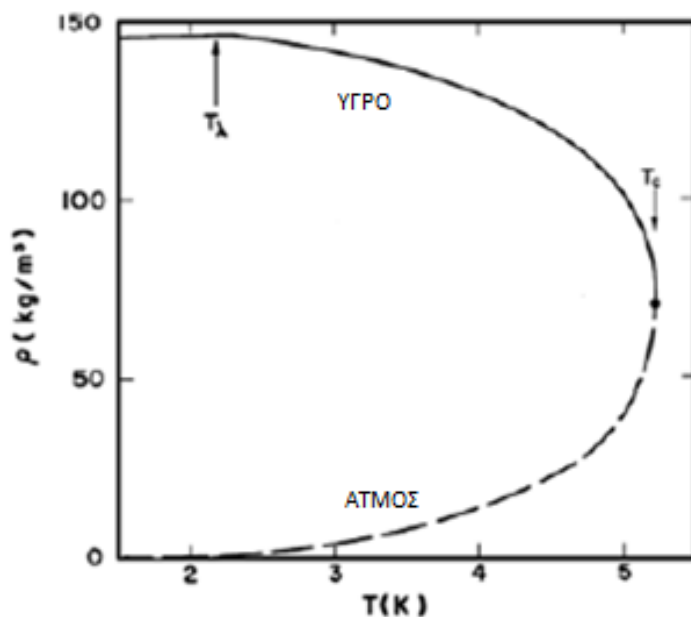
1.7 He I- Θερμοδυναμικές ιδιότητες

Το ήλιο έχει πολύ ασθενείς ενδομοριακές αλληλεπιδράσεις και υγροποιείται μόνο σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Το κανονικό σημείο ζέσεως του υγρού ηλίου είναι 4.2 K. Στην υγρή του μορφή έχει μια σχετικά χαμηλή πυκνότητα. Το ειδικό βάρος του υγρού ηλίου σε πίεση κορεσμένων ατμών είναι μεταξύ 0.145 Kg/m³ και 0.0675 Kg/m³ στην θερμοκρασία κρίσιμου σημείου T_c , κάτι που το καθιστά, μαζί με το υδρογόνο, το υγρό με την πιο χαμηλή πυκνότητα. Στο παράρτημα 3 αναγράφονται κάποιες θερμοδυναμικές ιδιότητες του ηλίου σε πίεση κορεσμένων ατμών.

1.7.1 Πυκνότητα κορεσμού

Όταν υγρό και ατμός συνυπάρχουν σε ένα δοχείο και εμφανίζεται ισορροπία θερμοκρασίας και πίεσης, η κατάσταση ονομάζεται κορεσμένη. Το υγρό λέγεται κορεσμένο υγρό και ο ατμός κορεσμένος ατμός. Η πυκνότητα κορεσμένου υγρού ρ είναι μια από τις πιο σημαντικές θερμοδυναμικές ιδιότητες του He I, επειδή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή της καταστατικής εξίσωσης του υγρού. Στο He I, η πυκνότητα αυξάνεται συνεχώς από 67.5kg/m³ στους T_c έως 145kg/m³ ακριβώς πάνω την T_λ . Στο παρακάτω σχήμα παριστάνεται γραφικά η πυκνότητα του κορεσμένου

υγρού ηλίου από T_c έως T_λ , καθώς και η πυκνότητα του κορεσμένου ατμού για τις αντίστοιχες θερμοκρασίες (διακεκομμένη γραμμή).

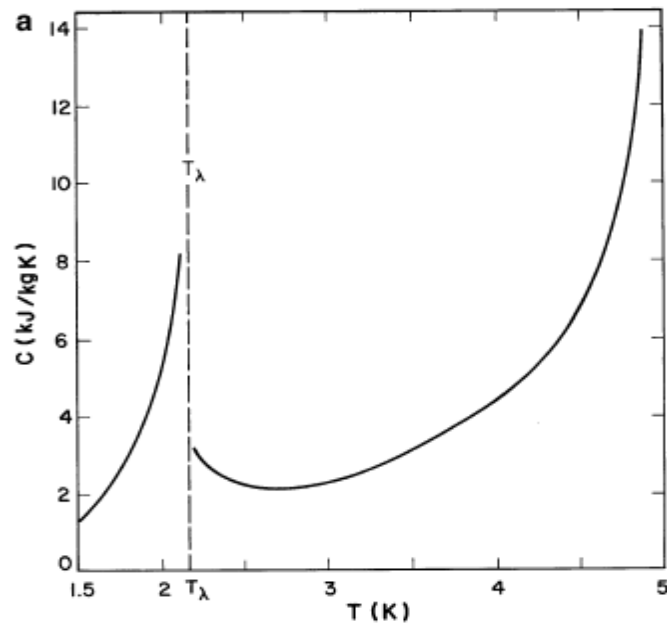


Σχήμα 1.6: Πυκνότητα υγρού ηλίου σε πίεση κορεσμένων ατμών

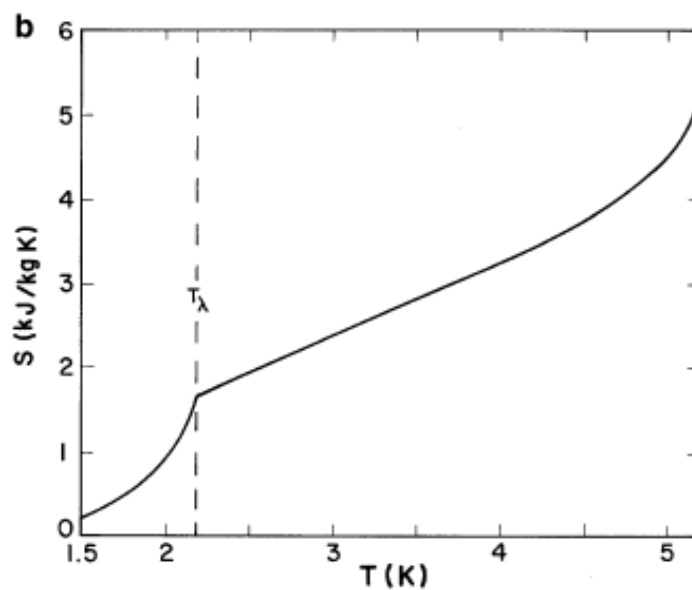
Αξίζει να σημειωθεί ότι το κορεσμένο υγρό είναι περίπου 7.4 φορές πιο πυκνό από τον ατμό του στο κανονικό σημείο ζέσεως 4.2K. Αυτή η γνώση είναι απαραίτητη σε πολλές περιπτώσεις, που η μάζα του ατμού του ηλίου συμβάλλει σημαντικά στη συνολική μάζα του υγρού σε ένα σύστημα. Πιο χαμηλά από την T_λ η πυκνότητα του υγρού εξαρτάται πολύ λιγότερο από τη θερμοκρασία και μειώνεται ελαφρώς, πριν γίνει ουσιαστικά σταθερή για $T \lesssim 2.0\text{K}$.

1.7.2 Εντροπία- ειδική θερμότητα- λανθάνουσα θερμότητα

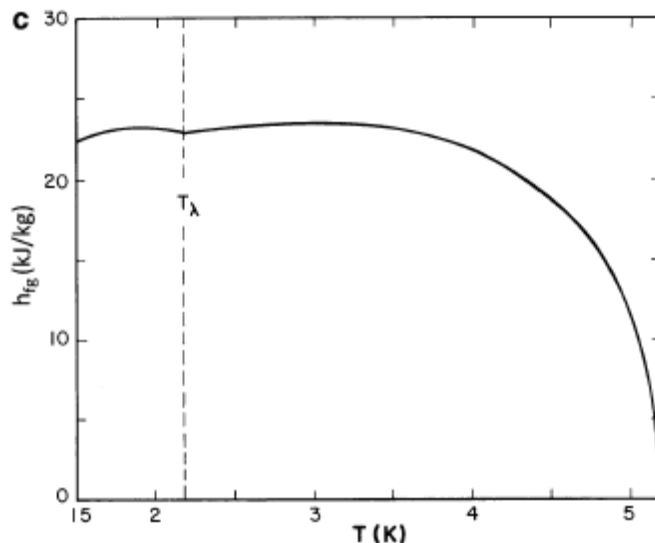
Από τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του υγρού ηλίου, η εντροπία, η ειδική θερμότητα και η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης έχουν ιδιαίτερη συμπεριφορά. Στα παρακάτω σχήματα εμφανίζονται αυτές οι τρεις ποσότητες, όπως καθορίζονται κατά μήκος της καμπύλης πίεσης του κορεσμένου ατμού. Οι πλέον έντονες αλλαγές στη συμπεριφορά των θερμικών ιδιοτήτων συμβαίνουν κάτω από την T_λ .



Σχήμα 1.7: Ειδική θερμότητα του υγρού ηλίου σε πίεση κορεσμένων ατμών



Σχήμα 1.8: Εντροπία υγρού ηλίου σε πίεση κορεσμένων ατμών



Σχήμα 1.9: Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του υγρού ηλίου

Οι τιμές της ειδικής θερμότητας, της εντροπίας και της λανθάνουσας θερμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας παρατίθενται και στο παράρτημα 3. Η εντροπία και η ειδική θερμότητα πάνω από το T_λ δεν αναμένεται να έχουν έντονες διαφορές στη θερμική συμπεριφορά από εκείνες του αερίου. Για παράδειγμα, η ειδική θερμότητα ενός ιδανικού μονοατομικού αερίου υπό σταθερό όγκο είναι $C_V = 3/2 R$ και υπό σταθερή πίεση είναι $C_P = 5/2 R$. Ένα ιδανικό αέριο μάζας 4 θα είχε, επομένως, $C_V = 3.12 \text{ kJ/kg K}$ και $C_P = 5.19 \text{ kJ/kg K}$, αντίστοιχα. Όπως φαίνεται από το σχήμα 1.7, η ειδική θερμότητα του υγρού ηλίου υπό πίεση κορεσμένων ατμών, C_{sat} κυμαίνεται από 2.3 kJ/kg K ακριβώς πάνω από το T_λ , μέχρι 5.2 kJ/kg K στους 4.2 K . Σε θερμοκρασίες πολύ χαμηλότερες του T_c , η διαστολή του όγκου έχει μικρή συνεισφορά, κάνοντας τη C_{sat} να πλησιάζει τη C_V . Ωστόσο, κοντά στο T_c η διαστολή του όγκου συμβάλλει ουσιαστικά και οι τιμές των κορεσμένων ατμών είναι παρόμοιες με εκείνες σε σταθερή πίεση, δηλαδή $C_{\text{sat}} \approx C_V$.

Η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, h_{fg} υγρού ηλίου εμφανίζεται στο Σχ. 1.9. Αυτή η ποσότητα, η οποία ορίζεται μόνο στην καμπύλη τάσεως κορεσμένων ατμών δίνεται από την εξίσωση Clausius-Clapeyron,

$$\left(\frac{dp}{dT}\right)_{\text{sat}} = \frac{h_{fg}}{T(v_g - v_l)} \quad (1.4)$$

όπου v_g και v_l είναι οι ειδικοί όγκοι του αερίου και υγρού, αντίστοιχα.

Η θερμότητα της εξάτμισης αντιπροσωπεύει την ενέργεια που απαιτείται να λάβει μια μονάδα μάζας ηλίου για τη μετατροπή της από την υγρή στην αέρια κατάσταση. Κατά συνέπεια, είναι ένα έμμεσο μέτρο της αντοχής των διαμοριακών δεσμών που σχετίζονται με το σχηματισμό της υγρής κατάστασης. Είναι δυνατόν να υπολογίσουμε τη h_{fg} από διαμοριακά εμπειρικά δυναμικά. Στο πειραματικό μέρος υπάρχει μια κάπως χρήσιμη σχέση μεταξύ της θερμότητας εξάτμισης και του κανονικού σημείου ζέσεως πολλών υγρών. Ο κανόνας του Trouton (παράρτημα 4) δείχνει ότι η αναλογία της h_{fg} προς την θερμοκρασία βρασμού T_b θα πρέπει να είναι περίπου σταθερή

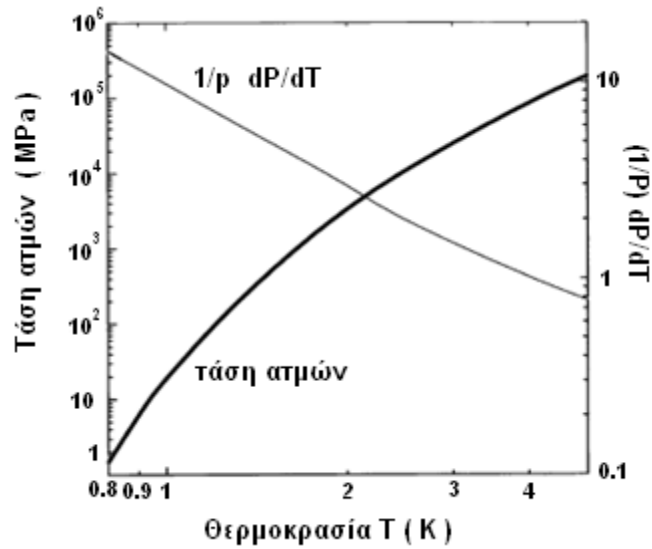
$$\frac{h_{fg}}{T_b} \approx \text{σταθερά} \quad (1.5)$$

όπου η σταθερά έχει μια τιμή περίπου 75 J/mol K. Στο νόμο αυτό, ο οποίος βασίζεται κυρίως σε πειραματικές αποδείξεις, υπακούουν με απόκλιση 20% τα περισσότερα κοινά υγρά. Ωστόσο, δεν συμβαίνει το ίδιο και για κρυογονικά υγρά. Η μεγαλύτερη απόκλιση από τον κανόνα του Trouton συμβαίνει για ήλιο, όπου ο λόγος h_{fg}/T_b είναι περίπου 20 J/molK.

1.3.2 Τάση ατμών

Η τάση ατμών είναι μία σημαντική παράμετρος, δεδομένου ότι σχετίζεται άμεσα με τη θερμοκρασία του υγρού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα απόλυτο πρότυπο της θερμοκρασίας καθώς μία μέθοδος μείωσης της θερμοκρασίας ενός υγρού είναι με άντληση των συνυπαρχόντων ατμών του. Η τάση ατμών σχετίζεται με τη θερμότητα εξάτμισης μέσω της σχέσης 1.4. Το παρακάτω σχήμα είναι ένα

διάγραμμα της τάσης ατμών και της ποσότητας $\frac{1}{p} \frac{dp}{dT}$ σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για το υγρό ήλιο.



Σχήμα 1.10: Σύγκριση τάσης ατμών και θερμότητας εξάτμισης σε σχέση με τη θερμοκρασία

Αν θεωρήσουμε ότι ο όγκος των ατμών είναι πολύ μεγαλύτερος από τον όγκο του υγρού, $v_g \gg v_l$ τότε η 1.4 γράφεται:

$$\left(\frac{dp}{dT}\right)_{sat} = \frac{h_{fg}}{T(v_g - v_l)} \approx \frac{h_{fg}}{Tv_g} \quad (1.5)$$

Δεδομένου ότι $v_g = \frac{RT}{Mp}$, έχουμε ότι:

$$h_{fg} = \frac{RT^2}{Mp} \frac{dp}{dT} \quad (1.6)$$

Κεφάλαιο 2

Μηχανική συστημάτων ροής ηλίου

2.1 Εισαγωγή

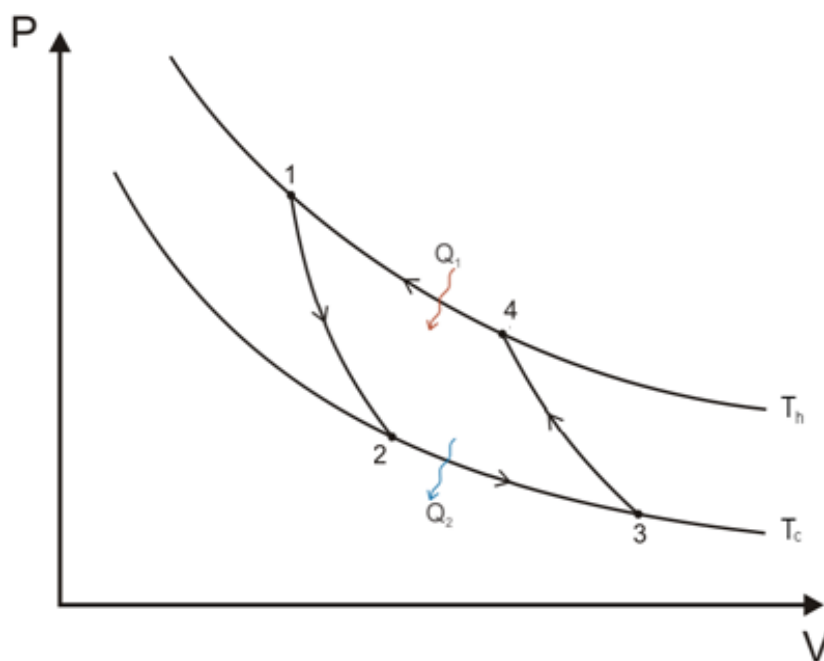
Σε πολλές εφαρμογές της κρυογονικής, η ψύξη επιτυγχάνεται καλύτερα μέσω του περιορισμού του ψυκτικού σε ένα σωλήνα ή αγωγό που κυκλοφορεί μέσω του συστήματος σε ένα κλειστό βρόχο. Στην διαμόρφωση αυτή, το υγρό που κυκλοφορεί μέσα από το σύστημα μπορεί να είναι στην υγρή ή στην αέρια φάση, ή ως μείγμα υγρού-αερίου, που προφανώς θα βρίσκεται σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία. Οι κύριες μεταβλητές σε ένα σύστημα μονής φάσης είναι η *πίεση*, η *θερμοκρασία* και ο *ρυθμός ροής της μάζας*. Σε ροή των δύο φάσεων, χρειάζονται πρόσθετες μεταβλητές για το χαρακτηρισμό της κατάστασης και τη δυναμικής. Από μηχανική άποψη, η κύρια ποσότητα που μας ενδιαφέρει είναι η πτώση της πίεσης που προκαλείται από το ρέον ρευστό. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα όπου η ροή ηλίου χαμηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται ως ψυκτικό. Μερικές από αυτές :

1. Η ροή του ηλίου σε σωληνώσεις ψύξης και εναλλάκτες θερμότητας. Ψυκτικά συστήματα που χρησιμοποιούν ήλιο περιλαμβάνουν συμβατικούς κύκλους ^4He καθώς και ειδικές συσκευές, όπως τα ψυγεία αραίωσης ^3He - ^4He για έρευνα σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Στην πρώτη περίπτωση, το ήλιο είναι συνήθως αρκετά πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία και συνεπώς είναι απλής φάσης. Η κύρια σκέψη σε αυτή την εφαρμογή είναι η βελτιστοποίηση της σχέσης μεταξύ της μεταφοράς θερμότητας και πτώσης της πίεσης στο κύκλωμα ροής.
2. Η ροή του υγρού ηλίου σε σωληνώσεις μεταφοράς είναι επίσης μια κοινή εφαρμογή. Αυτό συμβαίνει όταν το υγρό παραδίδεται από ένα σύστημα αποθήκευσης ή διανομής σε ένα άλλο.
3. Η χρήση της αναγκαστικής ροής ηλίου ως ψυκτικό για συστήματα υπεραγωγίων μαγνητών είναι επίσης μια αρκετά κοινή εφαρμογή. Η γενική προσέγγιση εδώ είναι να αναγκάσει το ήλιο μέσω ενός αγωγού που περιέχουν ή συνδέονται με τον υπεραγωγό.

2.2 Υγροποίηση και συστήματα ψύξης

Παρακάτω θα ασχοληθούμε με τις διάφορες μεθόδους απόκτησης ηλίου χαμηλής θερμοκρασίας. Τέτοιες μέθοδοι που βασίζονται σταθερά στη μηχανική θερμοδυναμική και βασίζονται κυρίως σε συνδυασμό των διαδικασιών που συνθέτουν ένα θερμοδυναμικό κύκλο. Σε ένα θερμοδυναμικό κύκλο κλειστού κυκλώματος, το ήλιο συμπιέζεται και εκτονώνεται και η θερμότητα εναλλάσσεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να επιτευχθεί ψύξη.

Ο θερμοδυναμικά ιδανικότερος κύκλος είναι ο κύκλος Carnot ο οποίος αποτελείται από ένα συνδυασμό ισόθερων και αδιαβατικών διαδικασιών. Ο κύκλος Carnot, που εικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα P-V, είναι μια κυκλική αντιστρεπτή μεταβολή που αποτελείται από δύο ισόθερες και δύο αδιαβατικές μεταβολές.



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα μεταβολών P-V κύκλου Carnot

Μια θερμική μηχανή που λειτουργεί μεταξύ μιας θερμής δεξαμενής με θερμοκρασία T_h και μιας ψυχρής δεξαμενής με θερμοκρασία T_c , έχει μέγιστη απόδοση αν ακολουθεί τον κύκλο Carnot. Η απόδοση του κύκλου Carnot δίνεται από τη σχέση:

$$e = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (2.1)$$

Εντούτοις, ο κύκλος Carnot είναι δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να επιτευχθεί σε ένα πρακτικό σύστημα. Τα πρακτικά συστήματα ψύξης και υγροποίησης αποτελούνται από παρόμοιες διαδικασίες και συνήθως οι επιδόσεις τους συγκρίνονται με εκείνη του ιδανικού κύκλου Carnot.

Στους περισσότερους κύκλους ψύξης αερίων, η ψύξη επιτυγχάνεται με μία διαδικασία διαστολής από υψηλή σε χαμηλή πίεση. Υπάρχουν κυρίως δύο είδη εκτόνωσης του αερίου που θα εξετάσουμε. Η ισεντροπική εκτόνωση είναι η διαδικασία κατά την οποία το υγρό παράγει έργο και εκτονώνεται αργά και αναστρέψιμα ούτως ώστε η εντροπία του να παραμένει σταθερή ($\Delta S = 0$). Αυτή είναι η καλύτερη μέθοδος εκτόνωσης επειδή δεν υπάρχει παραγωγή εντροπίας και συνεπώς έχουμε τη μεγαλύτερη μεταβολή θερμοκρασίας για μια δεδομένη μεταβολή της πίεσης. Η άλλη κοινή διαδικασία διαστολής είναι η ισοενθαλπική εκτόνωση, όπου το ρευστό υποβάλλεται σε μεταβολή της πίεσης χωρίς μεταφορά θερμότητας ($\Delta Q = 0$), αλλά δεν παράγεται έργο και η διαδικασία είναι μη αντιστρεπτή. Η ισοενθαλπική εκτόνωση είναι κοινή σε πρακτικά συστήματα ψύξης λόγω της ευκολίας στη χρήση της. Ωστόσο, είναι χαμηλότερης θερμοδυναμικής απόδοσης επειδή είναι μη αναστρεπτή διαδικασία με αποτέλεσμα την αύξηση της εντροπίας ($\Delta S > 0$). Μια περαιτέρω διάκριση μεταξύ των διαφόρων κύκλων ψύξης έχει να κάνει με το αν ο κύκλος περιλαμβάνει μόνιμες ροές ή ροές ταλάντωσης. Στην πρώτη περίπτωση, η ροή που ξεκινά στο υψηλό σημείο πίεσης στην έξοδο του συμπιεστή ρέει συνεχώς μέσω ενός κλειστού κυκλώματος που αποτελείται από εναλλάκτες θερμότητας και μηχανισμούς εκτόνωσης με έκλυση του φορτίου θερμότητας και τελικά επιστρέφει στην είσοδο του συμπιεστή για ένα νέο κύκλο. Η άλλη κατηγορία των κύκλων ψύξης περιλαμβάνει ροές ταλάντωσης που εκτονώνουν και συμπιέζουν το αέριο περιοδικά με ανταλλαγή θερμότητας με μια θερμική δεξαμενή. Σε αυτούς τους κύκλους μια ποσότητα ρευστού κινείται εμπρός και πίσω μεταξύ των περιοχών υψηλής και χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας ανταλλάσσοντας θερμότητα.

2.3 Ιδανική υγροποίηση

Οι θερμοδυναμικοί περιορισμοί της διαδικασίας υγροποίησης μπορεί να αποδειχθούν καλύτερα από την εξέταση ενός ιδανικού συστήματος, δηλαδή, ενός κύκλου με την απόδοση του κύκλου Carnot που αποτελείται από αντιστρεπτές ισοθερμικές και ισεντροπικές διαδικασίες. Ο σκοπός αυτού του κύκλου είναι να ψύξει το ρευστό από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι το κανονικό σημείο βρασμού του και στη συνέχεια να συμπυκνωθεί σε υγρό.

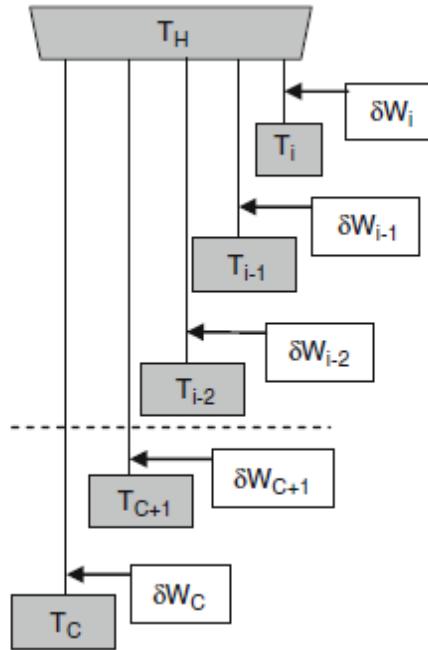
Θα εξετάσουμε πρώτα ένα ψυγείο Carnot που παράγει ψύξη σε μια δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας. Επιπλέον, υποθέτουμε ότι το ψυγείο αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κύκλων, που ο καθένας παράγει μια στοιχειώδη μείωση της θερμοκρασίας του ρευστού. Αυτή η διαδικασία θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί από ένα μεγάλο αριθμό δεξαμενών που λειτουργούν σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες T_i , όπως στο σχήμα 2.2. Ο συνολικός κύκλος είναι τότε το άθροισμα όλων αυτών των κύκλων, η συνεχής εκδοχή του οποίου είναι το ολοκλήρωμα μεταξύ των θερμοκρασιών έναρξης T_H και τελικής ψύξης T_C .

Ως εκ τούτου, ένα ιδανικό ψυγείο Carnot επιτυγχάνει ένα ορισμένο ποσό της ψύξης σε T_C εκτελώντας μια συνεχή διαδικασία. Το έργο για τη διεξαγωγή αυτής της διαδικασίας μπορεί να προσεγγιστεί με το ολοκλήρωμα,

$$W = - \int_{T_H}^{T_C} \frac{dQ}{T} (T_H - T) \quad (2.2)$$

όπου κάθε αύξηση της ψύξης λειτουργεί μεταξύ T_H και T . Για να επιτευχθεί υγροποίηση σε ένα σύστημα υγρού-αερίου, υπάρχουν δύο συνεισφορές στο έργο που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη:

1. W_g είναι το έργο που απαιτείται για την ψύξη μιας μονάδας μάζας αερίου από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος έως το σημείο βρασμού του, T_{bp} .
2. W_l είναι το έργο που απαιτείται τη μετατροπή μονάδας μάζας αερίου στο σημείο βρασμού του, T_{bp} , σε μονάδα μάζας υγρού.



Σχήμα 2.2: Μια σειρά από απειροελάχιστα ψυγεία Carnot

Ο δεύτερος όρος, ο οποίος είναι το έργο υγροποίησης, λειτουργεί πάντα μεταξύ T_{bp} και T_H . Για αυτόν τον όρο, $dQ = T\Delta s = h_{fg}$, η λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα μάζας του υγροποιημένου αερίου. Το ολοκλήρωμα (2.2) στην περίπτωση αυτή μας αποδίδει τη δεύτερη συνεισφορά στο έργο και γράφεται ως εξής:

$$w_l = h_{fg} \left(\frac{T_H}{T_{bp}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

Είναι προφανές ότι στην παραπάνω ισότητα ο όρος στην παρένθεση παριστά το συντελεστή απόδοσης ενός ψυγείου Carnot που λειτουργεί μεταξύ T_{bp} και T_H .

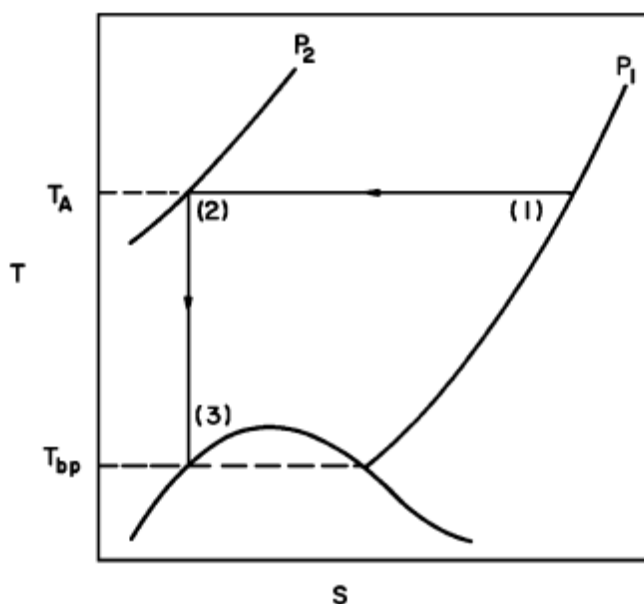
Το συνολικό έργο w_T για να υγροποιηθεί μια μονάδα μάζας αερίου είναι το άθροισμα των δύο παραπάνω όρων.

$$w_T = T_H \left(\int_{T_{bp}}^{T_H} \frac{C_p}{T} dT + \frac{h_{fg}}{T_{bp}} \right) - \left(\int_{T_{bp}}^{T_H} C_p dT + h_{fg} \right) \quad (2.4)$$

Με αυτόν τον τρόπο, το συνολικό έργο μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο ποσότητες. Η πρώτη αντιπροσωπεύει τη διαφορά εντροπίας μεταξύ του

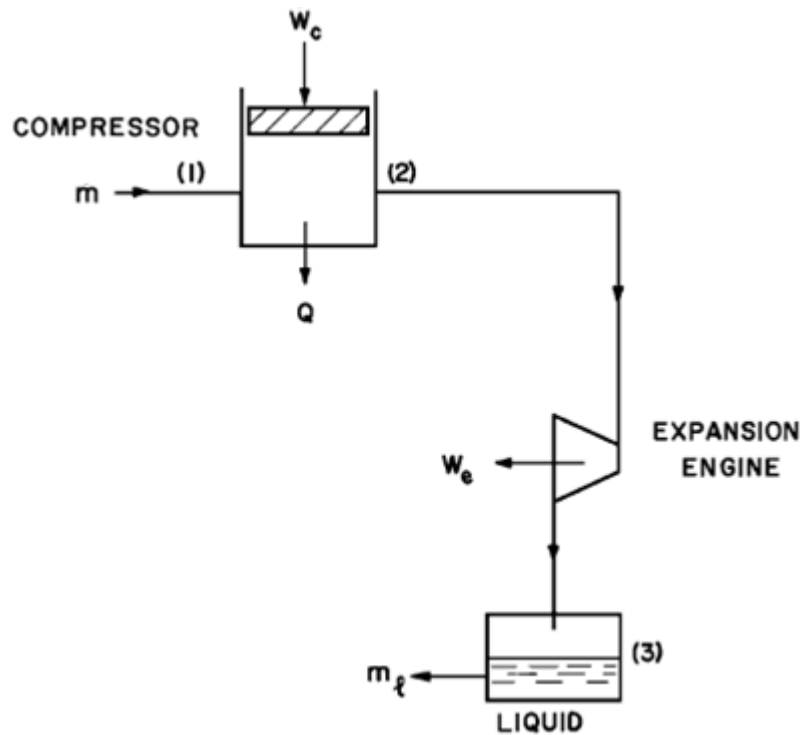
αερίου σε θερμοκρασία δωματίου και του υγρού στο T_{bp} . Ο δεύτερος όρος είναι η διαφορά θερμότητας ή ενθαλπίας μεταξύ του αερίου σε θερμοκρασία δωματίου και του υγρού στο T_{bp} . Η ποσότητα αυτή εισέρχεται ως αρνητική επειδή είναι θερμοδυναμικά ανακτήσιμη. Οι παραπάνω ορισμοί μπορούν να τοποθετηθούν σε πιο σαφή βάση από την εξέταση του διαγράμματος T-S για ένα πραγματικό ρευστό. Ένα εξιδανικευμένο παράδειγμα ενός τέτοιου διαγράμματος φαίνεται στο σχήμα 2.3.

Η επίτευξη της υγροποίησης, όπως περιγράφηκε παραπάνω, μπορεί να αναγνωριστεί σε αυτό το διάγραμμα στην πορεία 1-2-3. Εδώ, το στάδιο 1-2 είναι μία ισοθερμική διαδικασία, η οποία ακολουθείται από το στάδιο 2-3 η οποία είναι μια ισεντροπική διαστολή του ρευστού προς το κανονικό σημείο ζέσεως T_{bp} .



Σχήμα 2.3: T-S διάγραμμα ιδανικής υγροποίησης

Με πρακτικούς όρους, το κύκλωμα ροής που χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί αυτή η διαδικασία φαίνεται στο σχήμα 2.4



Σχήμα 2.4: Ροή ιδανικής υγροποίησης εκτόνωσης

Εδώ υπάρχουν δύο κύριες συνιστώσες. Ένας συμπιεστής φέρνει το ρευστό σε υψηλή πίεση P_2 , στο σημείο εκείνο όπου η εντροπία είναι η ίδια με του υγρού στο κανονικό σημείο ζέσεως. Η ισεντροπική μηχανή εκτόνωσης τότε μειώνει τη θερμοκρασία του ρευστού μέχρις ότου μετατραπεί σε ένα υγρό. Το συνολικό έργο ανά μονάδα μάζας του ρευστού (2.4) κατά συνέπεια δίνεται από τη διαφορά των καταστατικών εξισώσεων

$$w_T = T_H(S_1 - S_3) - (h_1 - h_3) \quad (2.5)$$

Συνήθως, για πραγματικά ρευστά, οι ποσότητες ΔS και Δh υπάρχουν σε πίνακα, ώστε να γίνεται γρήγορα ο παραπάνω υπολογισμός. Ωστόσο για το ήλιο, το οποίο είναι σχεδόν ένα ιδανικό αέριο, αυτές μπορούν επίσης να υπολογιστούν με σχετική ακρίβεια από τη (2.4). Οι δύο συνεισφορές στην διαδικασία υγροποίησης του ηλίου είναι η ενθαλπία και η εντροπία. Η ενθαλπία είναι:

$$\Delta h = \int_{T_{bp}}^{T_H} C_p dT + h_{fg} \quad (2.6)$$

Δεδομένου ότι το ήλιο προσεγγίζει ένα ιδανικό μονοατομικό αέριο, έχουμε αντικαταστήσει με μία σταθερή τιμή τη θερμοχωρητικότητα, $C_p \approx 5/2R = 20.8 \text{ J/molK}$. Η λανθάνουσα θερμότητα του ηλίου δίνεται σε πίνακα και είναι μια ποσότητα εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία, αλλά στο κανονικό του σημείο ζέσεως 4.2 K , $h_{fg} = 84 \text{ J/mol}$. Ο συνδυασμός αυτών των δύο εισφορών στην (2.5) δίνει:

$$\Delta h = 20.8 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} (300 - 4.2) \text{K} + 84 \frac{\text{J}}{\text{mol}} = 6237 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

όπου η υψηλή θερμοκρασία έχει οριστεί αυθαίρετα σε 300 K . Σημειώστε ότι το ήλιο έχει μια πολύ μικρή λανθάνουσα θερμότητα σε σύγκριση με άλλα κοινά υγρά, γεγονός που οφείλεται σε ασθενείς διαμοριακές συνδέσεις. Έτσι, η συντριπτική πλειοψηφία των έργων για να υγροποιηθεί ήλιο πηγαίνει στην ψύξη του αερίου στη θερμοκρασία υγροποίησης. Αυτό δεν ισχύει απαραίτητως στην υγροποίηση των άλλων κρυογονικών ρευστών. Η συνεισφορά της εντροπίας για την υγροποίηση του ηλίου μπορεί να υπολογιστεί ομοίως:

$$\Delta S = \int_{T_{bp}}^{T_H} \frac{C_p}{T} dT + \frac{h_{fg}}{T_{bp}} \quad (2.7)$$

η οποία για το ήλιο, ως ένα σχεδόν ιδανικό αέριο, μπορεί επίσης να αξιολογηθεί απευθείας μεταξύ της θερμοκρασία περιβάλλοντος και του κανονικού σημείου ζέσεως:

$$\Delta S \approx 20.8 \frac{\text{J}}{\text{molK}} \ln \left(\frac{300}{4.2} \right) + \frac{84}{4.2} \frac{\text{J}}{\text{molK}} = \frac{109 \text{ J}}{\text{molK}}$$

Στον παρακάτω πίνακα αναγράφεται το ιδανικό έργο υγροποίησης ανα παραγόμενο Kg ή L για διάφορα κρυογονικά αέρια.

Υγρό	T_{bp} (K)	W_T (kJ/kg)	W_T (kWh/L)
O ₂	90	634	0.202
Ar	87	476	0.188
Air	80	722	0.176
N ₂	77	761	0.171
H ₂	20.4	11,890	0.231
He	4.2	6,850	0.236

Σχήμα 2.5: Ιδανικό έργο υγροποίησης κρυογονικών υγρών

Πρέπει να σημειωθεί ότι η συμβολή της λανθάνουσας θερμότητας είναι σημαντική, αντιπροσωπεύοντας το 20% περίπου της διαφοράς εντροπίας. Συνδυάζοντας την ενθαλπία και την εντροπία, υπολογίζουμε ότι το ιδανικό έργο για την υγροποίηση μιας μονάδας του ηλίου ως 26463 J/mol ή 6615 kJ/kg. Σε πυκνότητα κορεσμένων ατμών αυτό το έργο ανά μονάδα όγκου του υγρού είναι 0.236 kWh/L.

Έτσι φαίνεται ότι, για ένα ιδανικό υγροποιητή το κόστος της υγροποίησης από την άποψη της ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι ένας σημαντικός παράγοντας. Ωστόσο οι πραγματικές μονάδες υγροποίησης του ηλίου απέχουν πολύ από το ιδανικό και συνήθως λειτουργούν με απόδοση μεταξύ 2% έως 25% της απόδοσης του κύκλου Carnot.

Κεφάλαιο 3

Εφαρμογές του υγρού ηλίου – Έλλειψη και ανακύκλωση

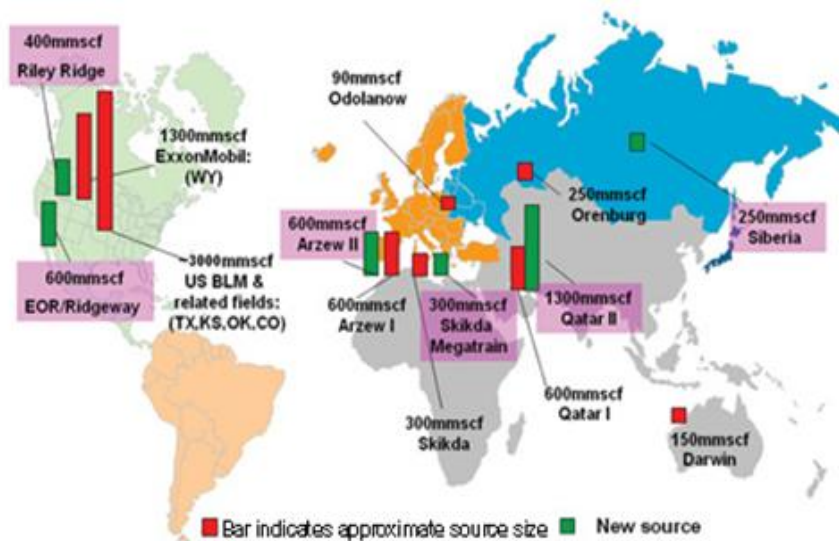
3.1 Εισαγωγή

Το χρησιμοποιείται ως αέριο για την ανύψωση αερόπλοιων και μετεωρολογικών μπαλονιών, για τη δημιουργία «καθαρών χώρων», για τον έλεγχο διαρροών λόγω της μεγάλης διεισδυτικότητάς του, ως συστατικό σε μείγματα αερίων για συγκολλήσεις ή για φιάλες καταδύσεων, αλλά και σε άλλες εφαρμογές. Ως υγρό όμως έχει πολύ μεγαλύτερη χρησιμότητα, λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων του. Το υγρό ήλιο έχει το χαμηλότερο σημείο υγροποίησης από όλα τα αέρια (4.2 K) και είναι το μόνο στοιχείο στην φύση το οποίο παραμένει υγρό σε θερμοκρασίες που προσεγγίζουν το απόλυτο μηδέν. Λόγω αυτής της ιδιότητάς του χρησιμοποιείται σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές. όπως είναι η λειτουργία των μαγνητών στις κλινικές διατάξεις μαγνητικής τομογραφίας (οι μαγνήτες αυτοί ευρίσκονται υπό ψύξη στους 4.2K για να λειτουργήσουν οι υπεραγώγιμες περιελίξεις των πηνίων), καθώς και σε ερευνητικά εργαστήρια για την έρευνα νέων υλικών υπό ψύξη σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, κοντά στο απόλυτο μηδέν.

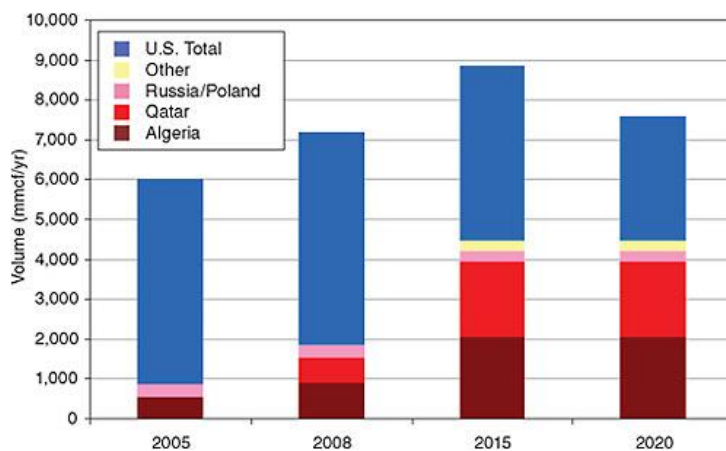


Σχήμα 3.1: Εφαρμογές υγρού ηλίου. Φασματοσκοπία Πυρηνικού Μαγνητικού συντονισμού και η αντίστοιχη «πρακτική» εφαρμογή της, ένας μαγνητικός τομογράφος διαγνωστικού κέντρου

Το ήλιο, αν και είναι το δεύτερο πιο άφθονο στοιχείο στο σύμπαν (μετά το υδρογόνο), είναι αρκετά δυσεύρετο αέριο στη Γη. Στην ατμόσφαιρα της Γης υπάρχει σε περιεκτικότητα 5 ppm κατ'όγκο . Το περισσότερο ήλιο στη Γη προέρχεται από ραδιενεργές διασπάσεις στο εσωτερικό της και αυτό το ραδιογενές ήλιο παγιδεύεται στο φυσικό αέριο σε συγκεντρώσεις από μερικά ppm έως 7% κατ'όγκο. Είναι παραπροϊόν της εξόρυξης του φυσικού αερίου και εξορύσσεται σε συγκεκριμένες περιοχές του κόσμου. Κύριος παραγωγός είναι οι ΗΠΑ (πάνω από το 70% της παγκόσμιας παραγωγής) και μικρότεροι παραγωγοί είναι η Αλγερία, η Ρωσία, η Πολωνία και το Κατάρ.



Σχήμα 3.2: Παγκόσμια παραγωγή αερίου για το έτος 2015. Οι πράσινες στήλες σημειώνουν την δυνητική παραγωγή από νέες πηγές



Σχήμα 3.3: Παραγωγή και αποθεματικά ήλιου

3.2 Έλλειψη ηλίου

Το ήλιο χρησιμοποιείται σε πολύ περισσότερες εφαρμογές από τα μπαλόνια. Το ήλιο είναι απαραίτητο συστατικό και αναντικατάστατο στην κρυογονική. Όμως η αυξανόμενη χρήση του τα τελευταία χρόνια μας έχει οδηγήσει σε μια έλλειψη και κατά συνέπεια στην αύξηση της τιμής του σε όλο τον κόσμο. Ένα από τα πιο άφθονα στοιχεία στο σύμπαν κινδυνεύει να εκλείψει από τη Γη.

Παρά το γεγονός ότι το ήλιο είναι το δεύτερο πιο άφθονο στοιχείο στο σύμπαν, το μεγαλύτερο μέρος του στην ατμόσφαιρα της Γης διαφεύγει μακριά στο διάστημα. Το ήλιο χρησιμοποιείται για βιομηχανικούς σκοπούς είναι ένα υποπροϊόν της παραγωγής φυσικού αερίου, και το Panhandle στο Texas είναι η πρωτεύουσα του ηλίου των Ηνωμένων Πολιτειών. Στα κοιτάσματα φυσικού αερίου κοντά στο Amarillo, η κυβέρνηση των ΗΠΑ διατηρεί τη μεγαλύτερη αποθήκη ηλίου της χώρας. Η αποθήκη αυτή δημιουργήθηκε το 1925, επειδή το φυσικό αέριο που παράγεται στα κοιτάσματα φυσικού αερίου μεταξύ Amarillo και Hugoton, έχει μια πολύ υψηλή συγκέντρωση ηλίου έως 1,9%.

Σήμερα, οι ΗΠΑ και μόνο παράγουν το 75% του παγκόσμιου ηλίου. Σχεδόν το μισό από το σύνολο αυτό, ή περίπου το 30% της προμήθειας ηλίου στον κόσμο, προέρχεται από την αμερικανική τράπεζα αποθέματος ηλίου. Το απόθεμα κρατιέται στην τεράστια φυσική υπόγεια δεξαμενή κοντά στο Amarillo που ονομάζεται Bush Dome. Ο θόλος είναι συνδεδεμένος με έναν αγωγό που συνδέει το αποθηκευμένο ήλιο με κοντινές εγκαταστάσεις παραγωγής καθαρού και υγρού ηλίου.

Ωστόσο το αμερικάνικο απόθεμα βρίσκεται σε κίνδυνο. Με τους σημερινούς ρυθμούς παραγωγής των περίπου 2 δις κυβικά πόδια ανά έτος, η δεξαμενή θα μπορούσε να συνεχίσει να παρέχει ήλιο για πέντε έως έξι ακόμα χρόνια. Επίσης η μοντελοποίηση με υπολογιστή που προβλέπει το ποσό του ηλίου που η δεξαμενή θα είναι σε θέση να παράγει, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο ρυθμός παραγωγής της δεξαμενής θα μειωθεί σε περίπου 1 δισεκατομμύριο κυβικά πόδια ανά έτος μετά το 2015. Ως αποτέλεσμα η ζωή της δεξαμενής θα ολοκληρωθεί το 2018 ή το πολύ έως το 2020.

Το 1996 το Κογκρέσο αποφάσισε να ιδιωτικοποιήσει το ομοσπονδιακό πρόγραμμα αποθέματος ηλίου και απαιτήθηκε όλες οι προμήθειες ηλίου της

κυβέρνησης να πωληθούν μέχρι το 2015. Η ελπίδα ήταν μέχρι το 2015, από τη στιγμή που το αποθεματικό πωλήθηκε, ότι οι νέες πηγές του ηλίου θα είναι σε απευθείας σύνδεση και θα αναλάμβαναν τη ζήτηση. Ωστόσο, αυτό δεν έχει συμβεί ακόμα. Αν και οι νέες ιδιωτικές εγκαταστάσεις παραγωγής ηλίου πρόκειται να έρθουν σε απευθείας σύνδεση τα επόμενα χρόνια, ο ιδιωτικός τομέας δεν ενδιαφέρεται τόσο για την παραγωγή ηλίου. Μέχρι περισσότερες εταιρείες να αρχίζουν να παράγουν ήλιο από μόνες τους, οι καταναλωτές θα μένουν με τις αιχμηρές τιμές και με τον περιορισμό της παροχής.

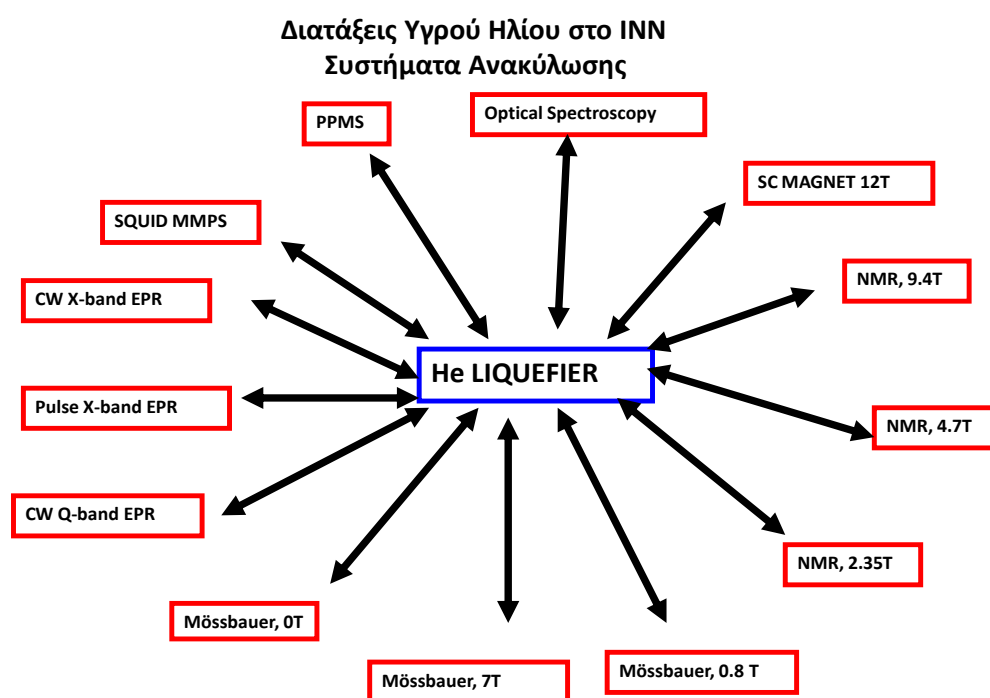
Όταν Ήλιο στερεύει

Όπως μειώνονται τα αποθεματικά ηλίου ο μεγαλύτερος αντίκτυπος θα μπορούσε να είναι στον τομέα της υγείας και σε μικρότερη κλίμακα στην επιστημονική έρευνα. Για παράδειγμα, η έλλειψη θα μπορούσε να περιορίσει τη δυνατότητα απόκτησης ενός μαγνητικού τομογράφου, αφού το υγρό ήλιο είναι απαραίτητο για να διατηρηθεί.

Το ήλιο είναι απολύτως απαραίτητο για την παραγωγή μαγνητικών τομογράφων. Το πιο σημαντικό συστατικό ενός συστήματος ιατρικού μαγνητικού τομογράφου είναι ένας μεγάλος μαγνήτης που περιέχει υπεραγώγιμο σύρμα που ψύχεται στους 4.2 βαθμούς Κέλβιν. Το ήλιο είναι σήμερα το μόνο στοιχείο στη Γη που μπορεί να κρατήσει αποτελεσματικά το μαγνήτη σε αυτή τη θερμοκρασία και κατά συνέπεια επιτρέπει την υψηλή ένταση πεδίου, με σταθερά και ενιαία μαγνητικά πεδία που χρειάζονται τα σύγχρονα συστήματα μαγνητικής τομογραφίας. Αν και οι εταιρείες προσπαθούν να χρησιμοποιούν όσο το δυνατόν λιγότερο ήλιο κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παραγωγής, οι νέοι μαγνητικοί τομογράφοι που μπαίνουν σε λειτουργία χρειάζονται πολύ από αυτό: μέχρι 10.000L υγρού ηλίου (περίπου 7000m³ αντίστοιχο αέριο), με μια ποσότητα έως 2000L να παραμένει σε ένα σφραγισμένο σύστημα κενού γύρω από το μαγνήτη. Εάν ο περιορισμός του εφοδιασμού σε ήλιο συνεχίζεται αμείωτα, θα μπορούσε να είναι πολύ επιβλαβής στην περίθαλψη των ασθενών. Αν δεν υπήρχε ήλιο για να εξυπηρετήσει σωστά ένα μαγνητικό τομογράφο, ένα quench, ή ξαφνική εξάτμιση θα μπορούσε να συμβεί. Αν και δεν υπάρχει άμεσος κίνδυνος για την ασφάλεια των ασθενών, ένας μαγνήτης θα μπορούσε να πάθει μόνιμη βλάβη και μπορεί να χρειαστεί να αντικατασταθεί, μια ακριβή και χρονοβόρα διαδικασία."

3.3 Χρήση στην έρευνα και στην τεχνολογία στην Ελλάδα

Στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ» το υγρό ήλιο χρησιμοποιείται ευρέως σε αρκετά όργανα φασματοσκοπίας μαγνητικού συντονισμού όπως ο Πυρηνικός Μαγνητικός Συντονισμός (NMR), ο Ηλεκτρονικός Παραμαγνητικός Συντονισμός (EPR), η φασματοσκοπία Mossbauer, κλπ. Στα παραπάνω όργανα το ήλιο χρησιμοποιείται τόσο για την υπεραγωγιμότητα των πηνίων των μαγνητών και κατά συνέπεια την δημιουργία των υψηλών μαγνητικών πεδίων που απαιτούνται, όσο και για την επίτευξη πολύ χαμηλών θερμοκρασιών οι οποίες είναι απαραίτητες σε κάποια πειράματα. Η θερμοκρασία του υγρού ηλίου είναι 4.2K σε πίεση 1atm, όμως στα εργαστήρια επιτυγχάνονται και χαμηλότερες θερμοκρασίες (έως και 2K) με άντληση των ατμών του ηλίου, δηλαδή με μείωση της πίεσης των ατμών του.



Σχήμα 3.4: Χρήστες υγρού ηλίου Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης Νανοτεχνολογίας του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

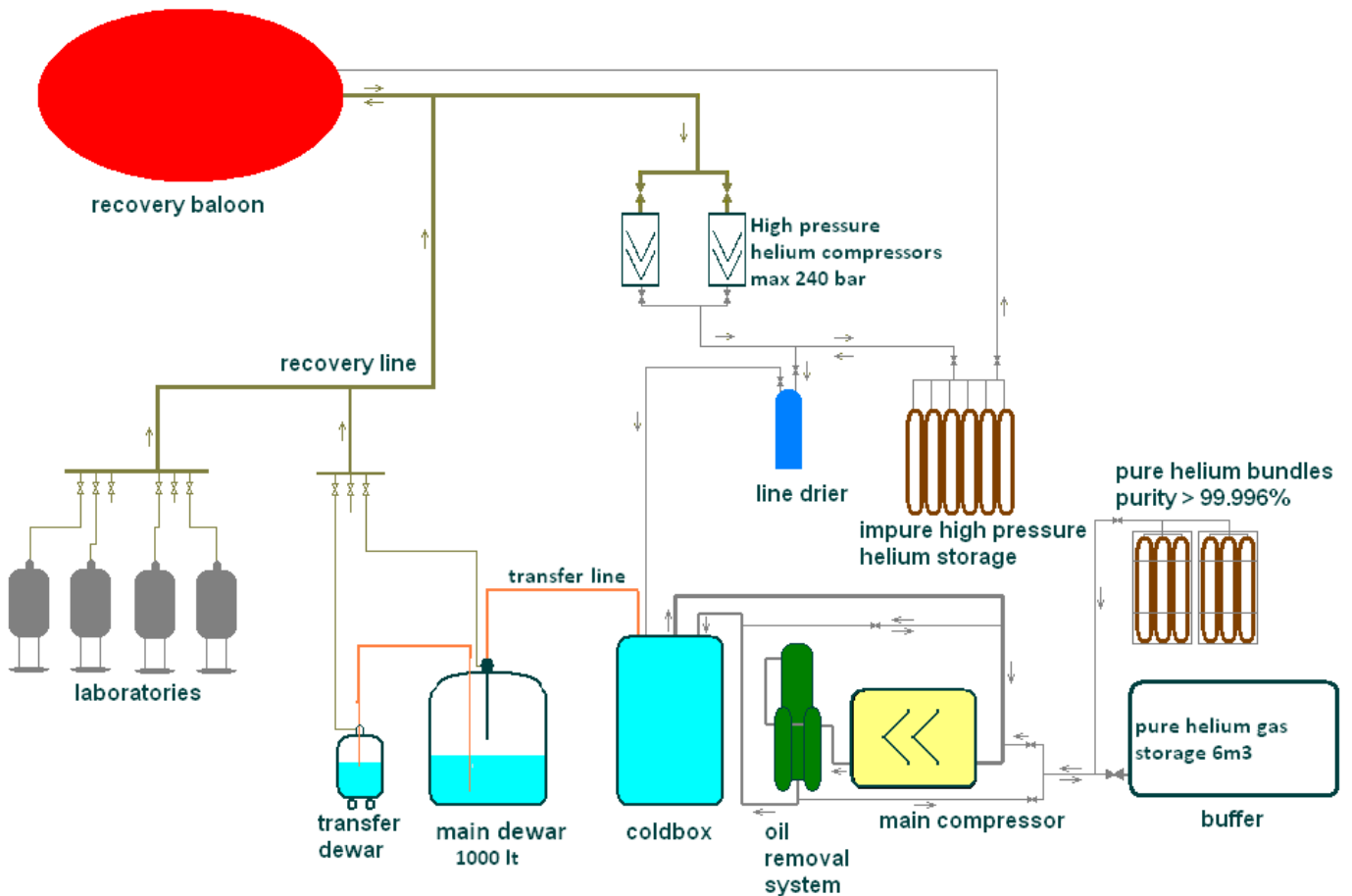
3.4 Υγροποίηση ηλίου στην Ελλάδα

Λόγω της ύπαρξης πολλών ερευνητικών οργάνων που απαιτούν υγρό ήλιο για τη λειτουργία τους, στο «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟ» λειτουργεί από το 1986 μονάδα εγκατάστασης ανακύκλωσης και υγροποίησης του χρησιμοποιούμενου από τα εργαστήρια αερίου ηλίου. Η ανάγκη εγκατάστασης αυτής της μονάδας οφείλεται τόσο στην αυξημένη τιμή του υγρού ηλίου, όσο και στην απαραίτητα αδιάκοπη παροχή του υγρού σε κάποια επιστημονικά όργανα (NMR, SQUID, PPMS κ.α.). Το παρεχόμενο στα εργαστήρια ήλιο που αεριοποιείται επιστρέφει μέσω ενός δικτύου σωληνώσεων συλλέγεται σε ένα μπαλόνι που βρίσκεται στο χώρο της μονάδας υγροποίησης και κατόπιν καθαρίζεται από διάφορες προσμίξεις και υγροποιείται. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι χρήστες υγρού ηλίου του ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ» που συνδέονται με το κύκλωμα ανακύκλωσης του ηλίου.

3.4.1 Περιγραφή αναβαθμισμένης εγκατάστασης υγρού ηλίου

Τη μονάδα υγροποίησης ηλίου του ερευνητικού κέντρου «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ» αποτελούν:

1. Ο κεντρικός συμπιεστής
2. Ο κρυοστάτης (**coldbox**)
3. Η μονάδα κεντρικού ελέγχου (**Main Box**)
4. Η μονάδα διαχείρισης αερίου και αφαίρεσης λαδιού (**GMP/ORS**)
5. Το δοχείο υγροποίησης (**Dewar 1000 L**)
6. Η αποθήκη καθαρού αερίου (**Buffer**)
7. Ο σάκος συλλογής αερίου
8. Οι συμπιεστές περισυλλογής
9. Η αποθήκη ακάθαρτου αερίου
10. Οι συλλέκτες καθαρού αερίου



Σχήμα 3.4: Σχηματική παράσταση εγκατάστασης ανακύκλωσης και υγροποίησης ηλίου

Το καθαρό αέριο συμπιέζεται από τον **κεντρικό συμπιεστή** και αφού περάσει από κάποια **φίλτρα λαδιού (GMP/ORS)**, εισέρχεται στο **Coldbox** με πίεση 13bara όπου ακολουθεί δύο διαδρομές. Στη μία διαδρομή εκτονώνεται αδιαβατικά σε δυο στροβίλους και μέσω κάποιων εναλλακτών θερμότητας ψύχει το αέριο που ακολουθεί τη δεύτερη διαδρομή, η οποία καταλήγει σε μία βαλβίδα πριν το **δοχείο υγροποίησης** και η οποία ελέγχει την ελεύθερη εκτόνωση και περαιτέρω ψύξη του αερίου, με αποτέλεσμα ένα μίγμα από αέριο και υγρό να εισέρχεται στο δοχείο υγροποίησης.

Το υγρό συλλέγεται στο δοχείο, ενώ το αέριο θα ενωθεί με το αέριο που επιστρέφει από τους στροβίλους και θα βγει από το **Coldbox** με μικρή πίεση για να ξανασυμπιεστεί από τον κεντρικό συμπιεστή. Το αέριο που έγινε υγρό αντικαθίσταται συνεχώς από την **Αποθήκη Καθαρού Αερίου**.



Εικόνες 3.1 και 3.2: Το σύστημα αφαίρεσης λαδιού (ORS) και ο κεντρικός συμπιεστής

Η **Αποθήκη Καθαρού Αερίου (BUFFER)** είναι ένας μεταλλικός κύλινδρος χωρητικότητας $6,5\text{m}^3$, μέγιστης πίεσης 13bar και συμπληρώνεται με αέριο με δύο τρόπους. Είτε γεμίζει με καθαρό αέριο που προέρχεται από **φιάλες**, είτε γεμίζει με



Εικόνα 3.3: Η αποθήκη καθαρού αερίου (Buffer)

καθαρό αέριο που δημιουργεί η ίδια η μηχανή, καθαρίζοντας το ακάθαρτο αέριο που υπάρχει στην **Αποθήκη Ακάθαρτου Αερίου**. Τις φιάλες με καθαρό αέριο τις παρέχει

ο εξωτερικός πελάτης που θα παραγγείλει υγρό σε αναλογία 1 φιάλη για κάθε 10L υγρό. Οι φιάλες αυτές είναι χωρητικότητας περίπου **50L** η κάθε μία και όταν έρχονται έχουν πίεση **200bar**. Το αέριο που περιέχουν μέσω των συλλεκτών καθαρού αερίου διοχετεύεται με ένα μειωτήρα στο **Buffer**.

Το αέριο που προέρχεται από τα εργαστήρια και μπορεί να περιέχει αέριες προσμίξεις ή ακόμη και υγρασία, με ένα δίκτυο σωληνώσεων επιστρέφει στο χώρο του υγροποιητή και συλλέγεται σε ένα μεγάλο **Λαστιχένιο σάκο** (σάκος συλλογής αερίου), από το οποίο το παίρνουν οι **συμπιεστές συλλογής** και το συμπιέζουν σε μεγαλύτερη πίεση στις φιάλες της αποθήκης ακάθαρτου αερίου.



Εικόνες 3.3 και 3.4: Ο σάκος συλλογής αερίου και οι δύο συμπιεστές υψηλής πίεσης

Η **Αποθήκη Ακάθαρτου Αερίου** αποτελείται από **τρεις συστοιχίες** με συνολικά **98 φιάλες**. Οι φιάλες αυτές είναι χωρητικότητας περίπου **50L** η κάθε μία και αντέχουν σε υδραυλική πίεση 300bar. Η μέγιστη πίεση που χρησιμοποιούνται είναι 200Bar. Στις φιάλες αυτές το αέριο ήλιο συμπιέζεται από δύο **συμπιεστές συλλογής**, οι οποίοι χρησιμοποιούνται εναλλάξ. Το ακάθαρτο αέριο προέρχεται είτε από τα εργαστήρια του ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΥ, είτε από μετάγχιση υγρού από το κεντρικό δοχείο σε άλλο μικρότερο, για να διοχετευτεί το υγρό στα εργαστήρια ή σε εξωτερικό πελάτη.



Εικόνα 3.5: Οι 98 φιάλες της αποθήκης ακαθάρτου αερίου



Εικόνα 3.6: Το σύστημα αφαίρεσης υγρασίας (Line drier)

Το συμπιεσμένο ακάθαρτο αέριο με μειωμένη πίεση (30bar) αφού περάσει από ένα **σύστημα αφαίρεσης της υγρασίας (Line Drier)** εισέρχεται στη μηχανή όπου του αφαιρούνται όλες οι προσμίξεις άλλων αερίων και διοχετεύεται στο **Buffer** για να υγροποιηθεί.

Η υγροποίηση γίνεται στο **Coldbox**, με τη διαδικασία που προαναφέραμε. Το coldbox είναι στην ουσία ένας μεγάλος μεταλλικός κύλινδρος με στιβαρά τοιχώματα αφού στο εσωτερικό του υπάρχει κενό. Οι στρόβιλοι στους οποίους γίνεται η ψύξη του αερίου, καθώς και οι εναλλάκτες θερμότητας, βρίσκονται σε περιβάλλον κενού, ώστε η ψύξη να μην επηρεάζεται σχεδόν καθόλου από τη θερμοκρασία εκτός κυλίνδρου. Γι' αυτό το λόγο όλα τα όργανα που συμμετέχουν στην ψύξη του αερίου βρίσκονται όχι μόνο σε περιβάλλον κενού, ώστε να αποφεύγεται η αγωγή θερμότητας, αλλά είναι τυλιγμένα και με πολύ λεπτά φύλλα αλουμινίου για προστασία και από τη θερμική ακτινοβολήση. Το υγροποιημένο αέριο ήλιο συλλέγεται σε ένα δοχείο 1000L και από εκεί μεταγγίζεται σε μικρότερα δοχεία τα οποία διοχετεύονται στα εργαστήρια.

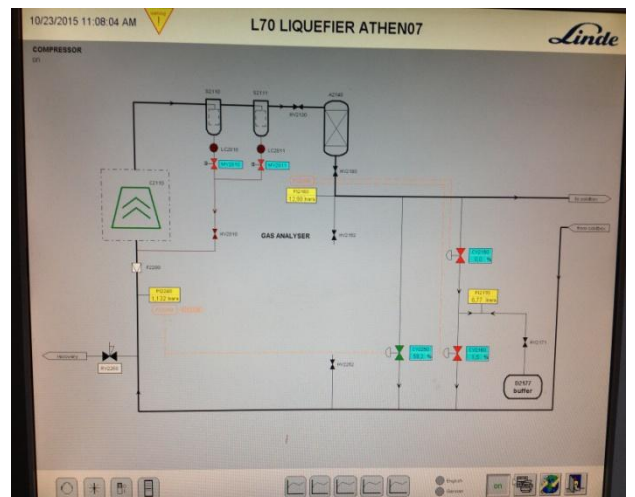
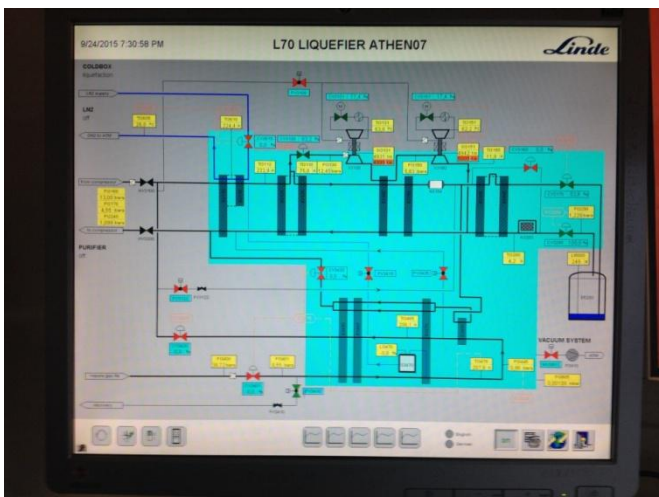


Εικόνες 3.7 και 3.8 :Το Coldbox και το κεντρικό δοχείο όπου συλλέγεται το υγροποιημένο ήλιο. Δεξιά διακρίνεται και ένα μικρότερο δοχείο όπου μεταγγίζεται υγρό από το κεντρικό δοχείο. Η ποσότητα του μεταγγιζόμενου υγρού ελέγχεται μέσω μίας ζυγαριάς ακριβείας, η οποία διακρίνεται πάνω από το μικρό δοχείο.

Η όλη διαδικασία ελέγχεται από μια **κεντρική μονάδα SIEMATIC της Siemens (main box)** που περιλαμβάνει ένα PLC μέσω του οποίου ελέγχονται όλες οι λειτουργίες της μηχανής. Ο καλύτερος έλεγχος, η εποπτεία και ο γρηγορότερος χειρισμός της μηχανής γίνονται και από έναν υπολογιστή που συνδέεται με το main box.

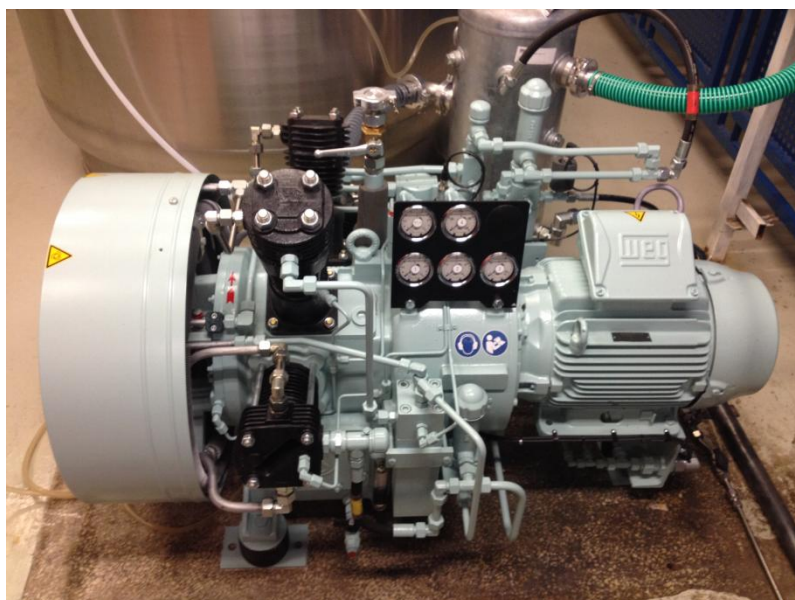


Εικόνες 3.9 και 3.10: Το SIEMENS SIEMATIC και το Control room με τον υπολογιστή ελέγχου της μηχανής



Εικόνες 3.11 και 3.12: Δύο από τις συνολικά εννέα οθόνες του υπολογιστή όπου απεικονίζονται οι βάνες, οι πιέσεις, οι θερμοκρασίες του Coldbox, του συμπιεστή αλλά και του ORS

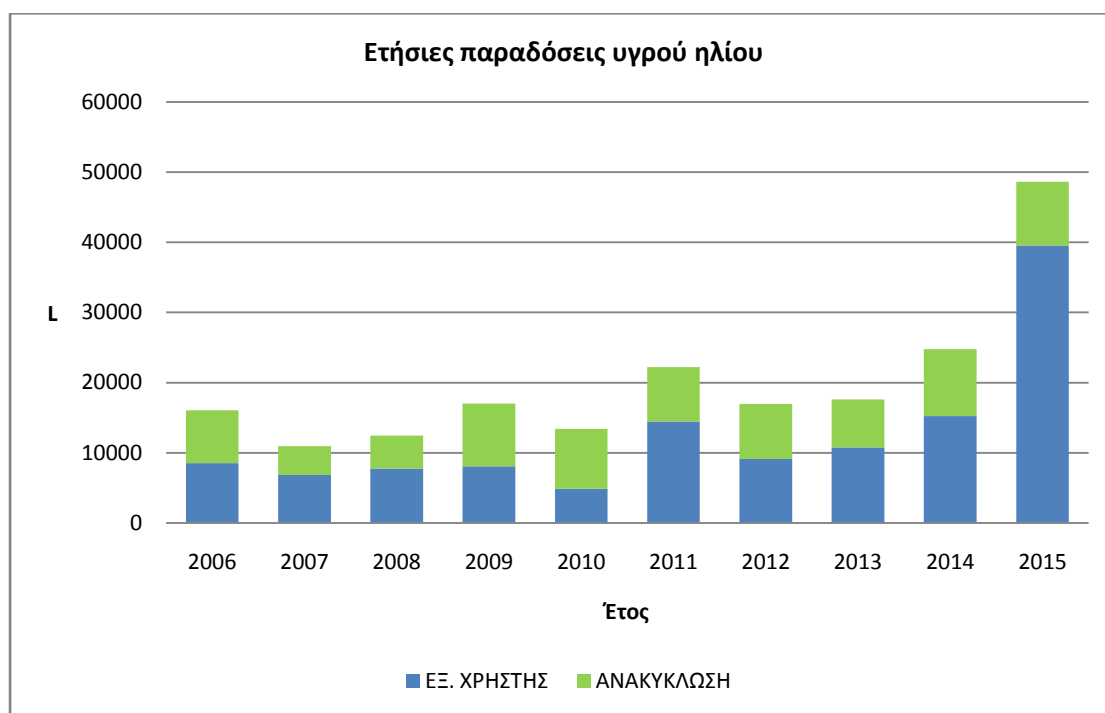
Αυτή είναι η διαδικασία της ανακύκλωσης του ηλίου στο ερευνητικό κέντρο «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ». Κατά τη διάρκεια της ανακύκλωσης υπάρχουν δυστυχώς και απώλειες αερίου, κάτι που οφείλεται στη φύση του αερίου και στην ικανότητά του να διαφεύγει εύκολα ακόμη και από τριχοειδής ρωγμές. Έτσι το ήλιο διαφεύγει σε μικρό ποσοστό, αφού η πίεση εκεί είναι μικρή, από τις σωληνώσεις που το επιστρέφουν ως αέριο στο μπαλόνι συλλογής. Διαφεύγει σε λίγο μεγαλύτερο ποσοστό από τα κλείστρα των φιαλών υψηλής πίεσης της αποθήκης ακάθαρτου αερίου. Απώλειες όμως έχουμε και από ανθρώπινα λάθη κατά τη διαδικασία της μετάγχισης. Οι απώλειες τα προηγούμενα χρόνια αθροιστικά κυμάνθηκαν στο 6-7%, ένα ποσοστό που είναι αποδεκτό σε οποιοδήποτε εργαστήριο, αλλά ελπίζουμε ότι θα μειωθεί σημαντικά με την τοποθέτηση του νέου συμπιεστή ανακύκλωσης του αερίου.



Εικόνα 3.13: Ο νέος συμπιεστής υψηλής πίεσης

3.4.2 Οικονομοτεχνική μελέτη της ανακύκλωσης του ηλίου για το ΔΗΜΟΚΡΙΤΟ

Δεν υπάρχει άλλη ολοκληρωμένη μονάδα υγροποίησης/ανακύκλωσης ηλίου στην Ελλάδα εκτός απ' αυτήν του Δημοκρίτου. Η τεχνοοικονομική μελέτη στηρίχθηκε επομένως κατ' ανάγκην στην εμπειρία του Δημοκρίτου. Παρ' ότι το ήλιο που διακινείται στον Δημόκριτο αποτελεί μικρό ποσοστό του διακινουμένου ετησίως ηλίου στην Ελλάδα, τα δεδομένα, όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα και στους παρατιθέμενους πίνακες, είναι ενδεικτικά και ιδιαίτερα χρήσιμα.



Σχήμα 3.5: Παραγωγή υγρού ηλίου στο ΔΗΜΟΚΡΙΤΟ από 1/1/2006- 31/12/2015

Παραπάνω βλέπουμε το ετήσιο διάγραμμα, που αφορά παραδόσεις υγρού ηλίου, τόσο στο ΔΗΜΟΚΡΙΤΟ το οποίο και ανακυκλώνεται, όσο και σε εξωτερικούς συνεργάτες. Παρατηρούμε την αύξηση της ζήτησης του υγροποιημένου ηλίου από τους εξωτερικούς συνεργάτες. Το χρησιμοποιούμενο υγρό ήλιο στο ερευνητικό κέντρο «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ» ανέρχεται στα 8000 L ετησίως. Το εργαστήριο υγροποίησης όμως συνεργάζεται εδώ και πολλά χρόνια με εξωτερικούς χρήστες, κυρίως μεγάλες εταιρείες (Linde, AirLiquide, Messer, Αεροσκόπιο) υγροποιώντας έναντι αμοιβής αέριο ήλιο που αυτές προσκομίζουν. Στους παρακάτω πίνακες υπολογίζεται το κόστος αλλά και το κέρδος χρήσης της μονάδας υγροποίησης ηλίου

(Α) Κόστος παραγωγής υγρού ηλίου στον Δημόκριτο

Έτος	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015 (έως31/10)	σύνολο
Εξωτερικός χρήστης L	8060,00	4890,00	14441,08	9104,03	10747,31	15248,37	35751,10	98241,89
Ανακύκλωση L	8940,00	8505,00	7767,00	7872,00	6865,00	9536,00	7834,00	57319,00
σύνολο παραδιδόμενου υγρού L	17000,00	13395,00	22208,08	16976,03	17612,31	24784,37	43585,10	155560,89
ώρες λειτουργίας μηχανής υγροποίησης h	850,00	669,75	1110,40	848,80	880,62	1239,22	2179,26	7778,04
ώρες λειτουργίας συμπιεστή ανακύκλωσης €	659,50	592,69	665,95	605,80	563,40	786,60	936,51	4810,46
κόστος ρεύματος μηχανής υγροποίησης €	9520,00	7501,20	12436,52	9506,58	9862,89	13879,25	24407,66	87114,10
κόστος ρεύματος συμπιεστή ανακύκλωσης €	692,48	622,32	699,25	636,09	591,57	825,93	983,34	5050,98

σύνολο παραδιδόμενου υγρού L	155560,89	
σύνολο κόστους ρεύματος €	92165,08	Έχει υπολογιστεί βάσει των Kw της μηχανής υγροποίησης και του συμπιεστή συλλογής, με τιμή Kwh 0.14 €
σύνολο κόστους συντήρησης εγκατάστασης υγροποίησης €	23874,87	
σύνολο κόστους τεχνικού υγροποίησης €	120960,00	
κόστος αγοράς αερίου €	32670,00	Κάποιες χρονιές έγινε αγορά αερίου με σκοπό την αύξηση του αποθεματικού. Από το 2014 και ύστερα αυτό είναι περιττό αφού λόγω της αυξημένης συναλλαγής με τις εταιρείες έχει αυξηθεί κατακόρυφα το αποθεματικό αερίου ηλίου
κόστος απόσβεση εγκατάστασης υγροποίησης €	239120,00	Η εγκατάσταση υγροποίησης κοστολογείται περίπου 860000 €. Αν υποθέσουμε ότι η εγκατάσταση έχει χρόνο ζωής 25 έτη υπολογίζουμε την απόσβεση ανά έτος
σύνολο κόστους €	508789,95	

Πίνακας 3.1: Κόστος χρήσης εγκατάστασης υγροποίησης και ανακύκλωσης ηλίου στο Δημόκριτο ανά έτος

(B) Κέρδος παραγωγής και ανακύκλωσης υγρού ηλίου στο Δημόκριτο

χρηματικό κέρδος από την υγροποίηση €	273288,99	Ποσό που εισπράχθηκε από συνεργαζόμενες εταιρείες για τη μετατροπή προσκομισθέντος αερίου σε υγρό.
χρηματικό κέρδος από την πώληση υγρού €	42204,75	Ποσό που εισπράχθηκε από πώληση υγρού κυρίως σε εργαστήρια του ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΥ που δεν έχουν μπει στο σύστημα ανακύκλωσης
όφελος σε φιάλες αερίου	895	βάση σύμβασης οι συνεργαζόμενες εταιρείες προσκομίζουν μεγαλύτερη ποσότητα προς υγροποίηση από την απαιτούμενη, έτσι ώστε το εργαστήριο υγροποίησης έχει όφελος όχι μόνο χρηματικό αλλά και σε αέριο.
αξία αποθηκευμένου αερίου €	120825,00	η κάθε φιάλη κοστολογείται 135€
σύνολο κέρδους €	437213,74	

απολογισμός χρήσης μονάδας υγροποίησης € για τα έτη 2009-2015	-71576,21	Σύνολο κέρδους - σύνολο κόστους
αξία ανακυκλούμενου υγρού €	1060401,50	το ποσό αυτό θα πλήρωνε ο ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ για την αγορά του ανακυκλούμενου υγρού ηλίου αν δεν υπήρχε η εγκατάσταση ανακύκλωσης
όφελος από την ύπαρξη της μονάδας υγροποίησης €	988825,29	
μέσο όφελος ανά έτος €	142962,69	

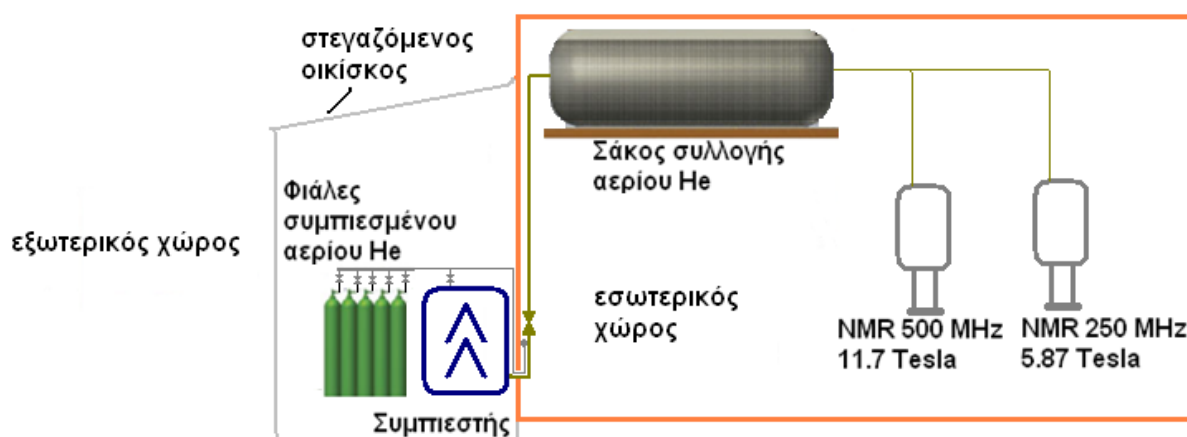
Πίνακας 3.2: Όφελος από την χρήση εγκατάστασης υγροποίησης και ανακύκλωσης ηλίου στο Δημόκριτο ανά έτος

Παρατηρούμε ότι το ετήσιο οικονομικό όφελος της μονάδας υγροποίησης είναι αρκετά μεγάλο. Σε σχέση με το κόστος η συνολική αξία του υγρού είναι πολλαπλάσια. Στην πράξη η αξία αντιστοιχεί στο ποσό που θα έπρεπε να συνεισφέρουν οι χρήστες στην περίπτωση που δεν υπήρχε η μονάδα υγροποίησης. Το πιο σημαντικό όφελος για το «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟ» όμως είναι η απρόσκοπτη παροχή υγρού ηλίου στα εργαστήρια ακόμη και σε περιόδους έλλειψης.

3.4.3 Προσπάθειες γενίκευσης της ανακύκλωσης ηλίου στην Ελλάδα

Συνεργασία με εταιρείες διακίνησης αερίων

Στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες το υγρό ήλιο που χρησιμοποιείται στους μαγνητικούς τομογράφους κυρίως αλλά και σε άλλες δραστηριότητες να συλλέγεται και να υδροποιείται πάλι. Έτσι δημιουργήθηκε το πρόγραμμα “HeRe to HeRe” (**H**elium **R**ecovery **t**o create a national **H**elium **R**esource), που αφορά τη συνεργασία φορέων και εταιρειών για τη δημιουργία εθνικού αποθέματος αερίου ηλίου στην Ελλάδα και στο οποίο συμμετέχουν το εργαστήριο υδροποίησης ηλίου του «Δημόκριτου», παρέχοντας τεχνογνωσία στον τομέα της ανακύκλωσης και υδροποίησης και το εργαστήριο *high resolution NMR* το οποίο βρίσκεται στο χώρο του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Αρχικός στόχος του προγράμματος ήταν η δημιουργία πρότυπης μονάδας συλλογής αερίου στο χώρο του εργαστηρίου High Resolution NMR, ώστε το υγρό ήλιο που εξαερώνεται από τους 2 μαγνήτες να συλλέγεται από ένα μπαλόνι και να συμπιέζεται σε φιάλες μέσω ενός συμπιεστή υψηλής πίεσης. Κατόπιν το αέριο αυτό θα διοχετευόταν στην εγκατάσταση υδροποίησης για τον καθαρισμό και την υδροποίηση του ηλίου. Παρακάτω φαίνεται η διάταξη που δημιουργήθηκε σε στεγασμένο εξωτερικό χώρο, ακριβώς έξω από τον τοίχο του εργαστηρίου NMR. Το μπαλόνι συλλογής του αερίου ηλίου, χωρητικότητας 1m^3 περίπου τοποθετήθηκε στον εσωτερικό χώρο.



Σχήμα 3.6: Σχηματική παράσταση εγκατάστασης συλλογής και συμπίεσης αερίου ηλίου στο χώρο του εργαστηρίου High Resolution NMR

Οι μεγάλες εταιρείες εισαγωγής υγρού ήλιου στην Ελλάδα είτε εισάγουν το υγρό ήλιο σε μεγάλα βυτία (20000L) και κατόπιν το μεταγγίζουν σε μικρότερα, είτε εισάγουν απευθείας μικρότερα δοχεία (100L, 250L ή 500L), κατά παραγγελία των πελατών τους. Η εισαγωγή αερίου προς υγροποίηση πλέον δε συνηθίζεται λόγω του αυξημένου κόστους των μεταφορικών.

Η συνεργαζόμενη εταιρεία συνήθως εισάγουν ένα μεγάλο βυτίο υγρού ήλιου των 20000L και μεταγγίζει από αυτό το υγρό σε μικρότερα δοχεία, τα οποία διοχετεύει σε όλη την Ελλάδα. Κατά τη διάρκεια της μετάγγισης ένα μεγάλο μέρος, περίπου 30-40 % του υγρού αεριοποιείται και συλλέγεται σε ένα μεγάλο σάκο, από τον οποίο το αναρροφούν συμπιεστές και το συμπιέζουν σε μεμονωμένες φιάλες ή σε συστοιχίες των 12 φιαλών. Το αέριο αυτό είτε διοχετεύεται στην αγορά είτε προσκομίζεται στη μονάδα υγροποίησης του «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΥ» προς υγροποίηση. Το υγροποιημένο αέριο μεταγγίζεται στις εγκαταστάσεις του «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΥ» σε δοχεία των εταιρειών και κατόπιν διοχετεύεται σε πελάτες όπως διαγνωστικά κέντρα και νοσοκομεία της χώρας. Όλο το ήλιο που διοχετεύουν οι εταιρείες χάνεται στην ατμόσφαιρα, οπότε ακόμη και αυτό που συλλέγουν κατά τη διάρκεια των μεταγγίσεων στις εγκαταστάσεις τους λογίζεται ως μη ανακυκλούμενο αέριο. Ο παρακάτω πίνακας παραθέτει αναλυτικά για το μη ανακυκλούμενο ήλιο που υγροποιήθηκε από τη μονάδα υγροποίησης για το διάστημα 1/1/14- 31/10/15.

Μη ανακυκλούμενο ήλιο								
Μήνας	ποσότητα υγρου He L	ώρες λειτουργίας υγροποιητή	ώρες λειτουργίας συμπιεστή ανακύκλωσης	κόστος ρεύματος υγροποιητή €	κόστος ρεύματος συμπιεστή ανακύκλωσης €	κόστος τεχνικού €	σύνολο κόστους €	αξία υγρού €
Ιαν-14	596,80	27,6	7,5	309,45	7,83	693,73	1.011,01	11.040,80
Φεβ-14	2214,17	102,5	27,7	1.148,09	29,06	1.145,19	2.322,34	40.962,15
Μαρ-14	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Απρ-14	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Μάι-14	30,00	1,4	0,4	15,56	0,39	53,40	69,35	555,00
Ιούν-14	4300,94	199,1	53,8	2.230,12	56,45	1.182,85	3.469,42	79.567,39
Ιούλ-14	1604,28	74,3	20,1	831,85	21,06	966,89	1.819,79	29.679,18
Αύγ-14	975,06	45,1	12,2	505,59	12,80	888,63	1.407,01	18.038,61
Σεπ-14	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Οκτ-14	693,43	32,1	8,7	359,56	9,10	781,07	1.149,72	12.828,46

Νοέ-14	4230,91	195,9	52,9	2.193,81	55,53	1.174,14	3.423,48	78.271,84
Δεκ-14	602,78	27,9	7,5	312,55	7,91	595,43	915,89	11.151,43
Ιάν-15	4923,68	227,9	61,5	2.553,02	64,62	1.233,99	3.851,63	91.088,08
Φεβ-15	3246,96	150,3	40,6	1.683,61	42,62	1.213,83	2.940,05	60.068,76
Μαρ-15	1940,52	89,8	24,3	1.006,20	25,47	1.032,83	2.064,50	35.899,62
Απρ-15	3985,72	184,5	49,8	2.066,67	52,31	1.189,84	3.308,82	73.735,82
Μάι-15	2797,91	129,5	35,0	1.450,77	36,72	1.099,94	2.587,43	51.761,34
Ιούν-15	4383,35	202,9	54,8	2.272,85	57,53	1.201,75	3.532,13	81.091,98
Ιούλ-15	1888,33	87,4	23,6	979,13	24,78	1.020,98	2.024,89	34.934,11
Αύγ-15	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Σεπ-15	6992,36	323,7	87,4	3.625,67	91,77	1.279,03	4.996,47	129.358,66
Οκτ-15	1790,09	82,9	22,4	928,19	23,49	978,23	1.929,92	33.116,67
σύνολο	47197,29	2185,06	589,97	24.472,67	619,46	17.731,74	42.823,88	873.149,87

Πίνακας 3.3: Μη ανακυκλούμενο ήλιο κατά το διάστημα 1/1/14- 31/10/15.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρούμε τις μηνιαίες παραδόσεις υγρού ηλίου στη συνεργαζόμενη εταιρεία για το ίδιο διάστημα. Παρατηρούμε ότι η ζήτηση δεν είναι σταθερή, αλλά υπάρχουν μήνες που είναι αρκετά αυξημένη.

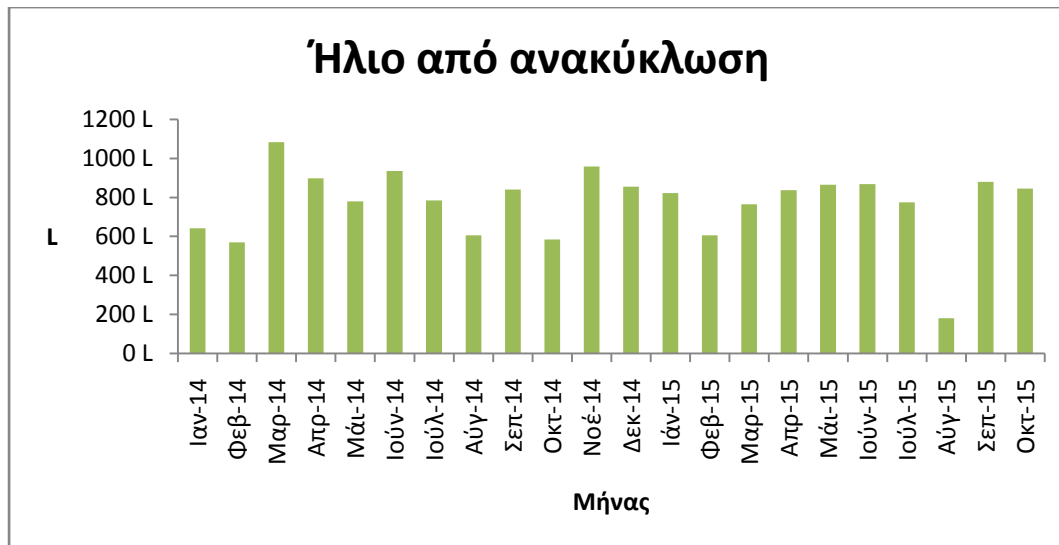


Σχήμα 3.7: Μη ανακυκλούμενο ήλιο, που υγροποιήθηκε στο ΔΗΜΟΚΡΙΤΟ και παραδόθηκε στη συνεργαζόμενη εταιρεία κατά το διάστημα 1/1/14 - 31/10/15.

Για το ίδιο χρονικό διάστημα τα οικονομικά στοιχεία του ανακυκλούμενου ηλίου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Ήλιο απο ανακύκλωση								
Μήνας	ποσότητα υγρου He L	ώρες λειτουργίας υγροποιητή	ώρες λειτουργίας συμπιεστή ανακύκλωσης	κόστος ρεύματος υγροποιητή €	κόστος ρεύματος συμπιεστή ανακύκλωσης	κόστος τεχνικού €	σύνολο κόστους €	αξία υγρού €
Ιαν-14	642,00	29,72	40,13	332,89	42,13	746,27	1121,29	11877,00
Φεβ-14	570,00	26,39	35,63	295,56	37,41	294,81	627,77	10545,00
Μαρ-14	1084,00	50,19	67,75	562,07	71,14	1440,00	2073,21	20054,00
Απρ-14	898,00	41,57	56,13	465,63	58,93	1440,00	1964,56	16613,00
Μάι-14	779,00	36,06	48,69	403,93	51,12	1386,60	1841,65	14411,50
Ιούν-14	935,00	43,29	58,44	484,81	61,36	257,15	803,32	17297,50
Ιούλ-14	785,00	36,34	49,06	407,04	51,52	473,11	931,67	14522,50
Αύγ-14	605,00	28,01	37,81	313,70	39,70	551,37	904,78	11192,50
Σεπ-14	840,00	38,89	52,50	435,56	55,13	1440,00	1930,68	15540,00
Οκτ-14	585,00	27,08	36,56	303,33	38,39	658,93	1000,66	10822,50
Νοέ-14	958,00	44,35	59,88	496,74	62,87	265,86	825,47	17723,00
Δεκ-14	855,00	39,58	53,44	443,33	56,11	844,57	1344,01	15817,50
Ιάν-15	822,00	38,06	51,38	426,22	53,94	206,01	686,18	15207,00
Φεβ-15	605,00	28,01	37,81	313,70	39,70	226,17	579,58	11192,50
Μαρ-15	765,00	35,42	47,81	396,67	50,20	407,17	854,04	14152,50
Απρ-15	838,00	38,80	52,38	434,52	54,99	250,16	739,68	15503,00
Μάι-15	865,00	40,05	54,06	448,52	56,77	340,06	845,34	16002,50
Ιούν-15	869,00	40,23	54,31	450,59	57,03	238,25	745,87	16076,50
Ιούλ-15	775,00	35,88	48,44	401,85	50,86	419,02	871,74	14337,50
Αύγ-15	180,00	8,33	11,25	93,33	11,81	1440,00	1545,15	3330,00
Σεπ-15	880,00	40,74	55,00	456,30	57,75	160,97	675,01	16280,00
Οκτ-15	845,00	39,12	52,81	438,15	99,82	461,77	999,73	15632,50
σύνολο	16980,00	786,11	1061,25	8804,44	1158,68	13948,26	23911,37	314130,00
							όφελος ανακύκλωσης	290.218,63 €

Πίνακας 3.4: Ανακυκλούμενο ήλιο κατά το διάστημα 1/1/14- 31/10/15



Σχήμα 3.8: Ανακυκλούμενο ήλιο κατά το διάστημα 1/1/14- 31/10/15

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η μηνιαία ζήτηση σε υγρό ήλιο από τα εργαστήρια του ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΥ τα οποία είναι συνδεδεμένα με το σύστημα ανακύκλωσης, αφού μόνο αυτό ανακυκλώνεται. Εδώ φαίνεται το μεγάλο όφελος της ανακύκλωσης στην ιδανική περίπτωση που γίνεται για το σύνολο του χρησιμοποιούμενου υγρού ηλίου. Σε αντίθεση με το μη ανακυκλούμενο ήλιο η ζήτηση δεν εμφανίζει μεγάλες μεταβολές και αν εξαιρεθεί ο μήνας Αύγουστος 2015 είναι της τάξης των 800 ± 135 L ανά μήνα. Το οικονομικό όφελος από την ανακύκλωση αυτού του αερίου είναι πολύ μεγάλο, όπως υπολογίστηκε σε προηγούμενη παράγραφο.

Περιγραφή της πρότυπης μονάδας εγκατάστασης του High resolution NMR Lab

Το Εργαστήριο Φασματοσκοπίας Πυρηνικού Μαγνητικού Συντονισμού Υγρών Δειγμάτων (NMR Lab) λειτουργεί από το έτος 2000 σε ειδικά διαμορφωμένο εργαστηριακό χώρο του ΕΚΕΦΕ "Δημόκριτος", που όμως δεν συνδέεται με το σύστημα ανακύκλωσης του ηλίου. Η σύνδεσή του με το υπόλοιπο σύστημα σωληνώσεων ήταν τεχνικά δύσκολη και οικονομικά ασύμφορη. Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε η δημιουργία επιτόπιας εγκατάστασης συλλογής και συμπίεσης του αερίου. Η εγκατάσταση αυτή αποτελείται από μία εσωτερική μονάδα συλλογής του αερίου (στο χώρο του εργαστηρίου) και από μία εξωτερική μονάδα συμπίεσης του αερίου σε φιάλες (στο χώρο ακριβώς απέξω από το εργαστήριο).

Η εσωτερική μονάδα αποτελείται από ένα συλλέκτη που είναι τοποθετημένος στον τοίχο και συνδέεται με ένα χαλκοσωλήνα με το μπαλόνι συλλογής αερίου διάστασης 1m^3 , που βρίσκεται αναρτημένο από το ταβάνι στο χώρο του εργαστηρίου. Κάθε μαγνήτης NMR αφήνει το εξατμιζόμενο ήλιο να διαφύγει μέσω μιας check valve με crack pressure 70 mbar. Το ήλιο αυτό διοχετευόταν στην ατμόσφαιρα με ένα λάστιχο σιλικόνης. Με τη δημιουργία της νέας εγκατάστασης, το λάστιχο σιλικόνης από κάθε μαγνήτη (εικόνες 1,2) καταλήγει στο συλλέκτη (εικόνα 3) και έτσι το αέριο ήλιο οδηγείται στο μπαλόνι (εικόνες 4,5).

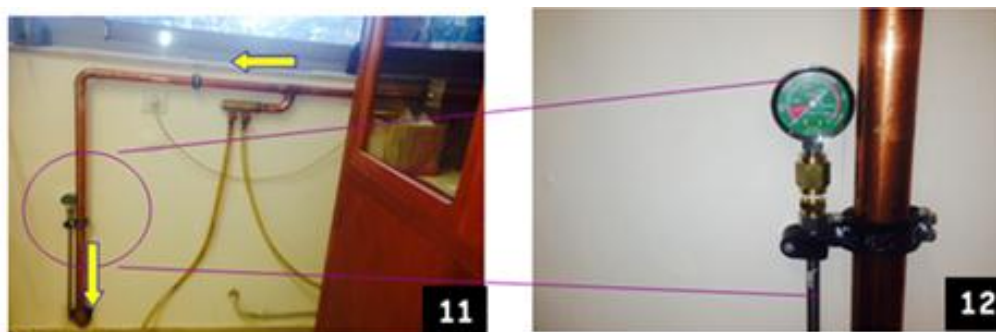


Στο μπαλόني είναι τοποθετημένος ένας διακόπτης κλίσης και όταν αυτό διογκωθεί και η κλίση υπερβεί τις 45° ο συμπιεστής της εξωτερικής μονάδας λειτουργεί και συμπιέζει το ήλιο. Για την αποφυγή δημιουργίας υπερπίεσης στο μπαλόني στην περίπτωση που δεν λειτουργήσει η εξωτερική μονάδα (διακοπή ρεύματος, αστοχία διακόπτη κλίσης, δυσλειτουργία συμπιεστή), έχει τοποθετηθεί στο χαλκοσωλήνα και check valve με πολύ μικρό crack pressure 25 mbar.

Η εξωτερική μονάδα αποτελείται από ένα συμπιεστή υψηλής πίεσης SAUER WP4325 (εικόνα 7) και μία ράμπα πλήρωσης (εικόνα 8), που αποτελείται από 5 βάνες υψηλής πίεσης με 5 εύκαμπτους σωλήνες υψηλής πίεσης. Κάθε σωλήνας μπορεί και συνδέεται με μία φιάλη, όμως λόγω της ύπαρξης των βανών δεν είναι απαραίτητο όλοι οι σωλήνες να είναι συνεχώς συνδεδεμένοι σε μία φιάλη. Η εξωτερική μονάδα προστατεύεται από έναν οικίσκο εικόνες (9 και 10), ο οποίος δεν εμποδίζει όμως την ροή του αέρα για την σωστή ψύξη του συμπιεστή. Ο συμπιεστής θα συμπιέσει το ήλιο στις φιάλες και θα σταματήσει αυτόματα μόλις πάρει εντολή από τον αισθητήρα κλίσης, ή μόλις η πίεση στις φιάλες υπερβεί μια προκαθορισμένη τιμή.



Για τον έλεγχο τις πίεσης των φιαλών τοποθετήθηκε στον εσωτερικό τοίχο του εργαστηρίου μανόμετρο εικόνες (11 και 12).



Οι δύο μαγνήτες του εργαστηρίου χρειάζονται περίπου 400 L υγρού ηλίου ετησίως, ώστε να συντηρούνται οι υπεραγωγοί και να παραμένουν σταθερά τα υψηλά μαγνητικά πεδία των 11.4 Tesla και 5,87 Tesla. Το κόστος προμήθειας αυτού του υγρού είναι περίπου 18-20€/L, κάτι που σημαίνει 7000-8000€ ετησίως. Μια εγκατάσταση ανακύκλωσης σαν την παραπάνω μπορεί να αποσβέσει το κόστος της σε 4-5 χρόνια, μιας και εκμηδενίζει το κόστος αγοράς υγρού ηλίου.

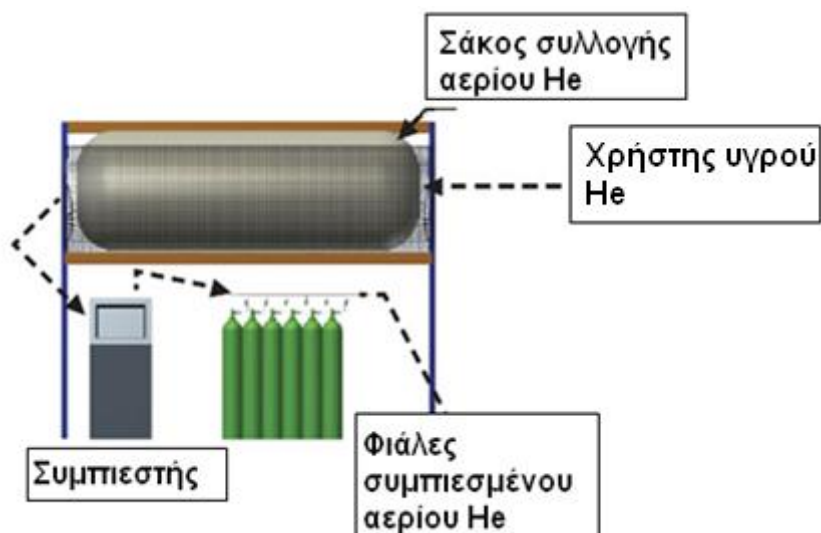
Προοπτικές εγκατάστασης διάταξης ανακύκλωσης σε διαγνωστικά κέντρα

Η ίδια ακριβώς διάταξη του εργαστηρίου NMR, με κάποιες τροποποιήσεις, μπορεί να εγκατασταθεί και σε αρκετά μεγαλύτερους χρήστες, όπως τον ή τους μαγνητικούς τομογράφους κάποιου διαγνωστικού κέντρου ή νοσοκομείου. Οι μεγαλύτεροι καταναλωτές υγρού ηλίου στην Ελλάδα είναι τα διαγνωστικά κέντρα και οπωσδήποτε θα μπορούσαν να εξοικονομηθούν μεγάλες ποσότητες ηλίου με άμεσο οικονομικό όφελος από την εγκατάσταση συστημάτων περισυλλογής ηλίου σε αυτά. Ας σημειωθεί ότι το υγρό ήλιο αποτελεί το κύριο κόστος λειτουργίας ενός μαγνητικού τομογράφου.

Η σχηματική διάταξη μιας τέτοιας εγκατάστασης, συλλογής και εμφιάλωσης αερίου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, περιλαμβάνει δε,

- μπαλόνι συλλογής χαμηλής πίεσης
- συμπιεστή υψηλής πίεσης
- μεταφερόμενες φιάλες υψηλής πίεσης οι οποίες θα μπορούσαν να διατεθούν από την εταιρία που διαθέτει το υγρό ήλιο στο κέντρο.

-- κατάλληλο χώρο όγκου περίπου 10 m³ για την εγκατάσταση των ανωτέρω. Ο απαιτούμενος χώρος θα μπορούσε να μειωθεί σημαντικά, εάν ο σάκος συλλογής τοποθετείτο στην ταράτσα του κτιρίου, όπου θα μπορούσε να λειτουργήσει και σαν διαφημιστικό μπαλόνι.



Σχήμα 3.9: Διάταξη συλλογής και εμφιάλωσης αερίου He

Το κόστος μιας τέτοιας εγκατάστασης υπολογίζεται παρακάτω:

Συμπιεστής υψηλής πίεσης αερίου He : 20000€

Σάκος συλλογής αερίου (1m²) : 2000€

Σωληνώσεις, βάνες και άλλα : 2000€

Συστοιχίες συλλογής αερίου (2x12) : 8000€

Σύνολο κόστους : 32000€

Η επίβλεψη καλής λειτουργίας της μονάδας καθώς και η υγροποίησης και εμπορικής αξιοποίηση του ανακτωμένου ηλίου θα μπορούσε να αναληφθεί εξ ολοκλήρου από την εταιρεία διακίνησης του ηλίου. Σε αντάλλαγμα η τελευταία θα μπορούσε να μειώσει την τιμή πώλησης του υγρού ηλίου στο εν λόγω κέντρο κατά 30-40%. Για ένα διαγνωστικό κέντρο υψηλής κατανάλωσης υγρού ηλίου το κόστος της εγκατάστασης θα μπορούσε να αποσβεσθεί σε 1 περίπου χρόνο.

Η ανάκτηση του ηλίου αποτελεί το πρώτο στάδιο του γενικότερου κυκλώματος ανακύκλωσης. Η εταιρεία διακίνησης αερίου θα μπορούσε να διαθέσει το ανακτώμενο ήλιο για μία μόνο χρήση ακόμη σαν αέριο ή θα μπορούσε να το υγροποιήσει/περισυλλέξει πάλι. Απ' την εμπειρία του Δημοκρίτου εκτιμάται ότι σε ένα κύκλο ανακύκλωσης ανακτάται περίπου το 90% του ηλίου.

Συμπεράσματα

Το ήλιο είναι ένα πολύτιμο και δυσεύρετο αέριο. Είναι δύσκολο να ανακτηθεί το ήλιο που χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές σαν αέριο. Η ανακύκλωση όμως του υγρού ηλίου θα μπορούσε να μειώσει δραματικά τις ποσότητες εισαγομένου ηλίου. Η κύρια δυσκολία είναι η άγνοια της πολυτιμότητας του ηλίου από τους χρήστες και κυρίως τα διαγνωστικά κέντρα και η διστακτικότητά τους να επέμβουν έστω και περιφερειακά στις μεγάλες μονάδες των μαγνητικών τομογράφων, οι οποίες παρεμπιπτόντως συντηρούνται απ' τις κατασκευάστριες εταιρείες του εξωτερικού. Εξ άλλου, το αυξημένο κόστος λειτουργίας των μαγνητικών τομογράφων λόγω εισαγωγής του υγρού ηλίου δεν επιβαρύνει τα ίδια τα διαγνωστικά κέντρα, αλλά μετακυλύεται στις ασφαλιστικές εταιρείες και τούς ασθενείς. Με την αναμενόμενη όμως αύξηση των τιμών ηλίου αλλά και την μείωση των διαθέσιμων ποσοτήτων κατά τα επόμενα χρόνια προβλέπεται ότι η ανακύκλωση του ηλίου θα καταστεί αδήριτη ανάγκη. Το πιο σημαντικό όμως απ' όλα είναι ότι η ανακύκλωση, εξασφαλίζει την απρόσκοπτη διακίνηση ηλίου σε περιόδους έλλειψής του στην διεθνή αγορά και την μερική αυτονομία της χώρας μας σε μία πρώτη ύλη, η οποία πλέον θεωρείται στρατηγικής σημασίας. Εξάλλου το μη ανακυκλούμενο ήλιο που υγροποιείται στο ΔΗΜΟΚΡΙΤΟ τροφοδοτείται σε διαγνωστικά κέντρα όταν οι προμηθεύτριες εταιρείες αδυνατούν να το παράσχουν. Η μονάδα υγροποίησης λειτουργεί τότε ως αναγκαία εφεδρεία του συστήματος διακίνησης υγρού ηλίου στην Ελλάδα, αλλά και σε γειτονικές μικρότερες χώρες.

Παράρτημα 1

Φαινόμενο Joule- Thomson

Στη θερμοδυναμική, Το φαινόμενο Joule-Thomson (επίσης γνωστό ως το φαινόμενο Joule-Kelvin, ή εκτόνωση Joule-Thomson) περιγράφει την μεταβολή της θερμοκρασίας ενός πραγματικού αερίου ή υγρού (όπως διαφοροποιείται από ένα ιδανικό αέριο), όταν αυτό είναι ωθείται μέσω μιας βαλβίδας ή πορώδους βύσματος ενώ διατηρούνται μονωμένα έτσι ώστε να μην ανταλλάσσεται θερμότητα με το περιβάλλον.

Σε θερμοκρασία δωματίου, όλα αέρια εκτός από υδρογόνο, το ήλιο και το νέον ψύχονται κατά την διαστολή τους από τη διαδικασία Joule-Thomson. Στα τρία αέρια το φαινόμενο παρατηρείται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Αυτή η διαδικασία συνήθως αξιοποιείται σε θερμικές μηχανές όπως ψυγεία, κλιματιστικά, αντλίες θερμότητας, και μηχανές υγροποίησης. Είναι μια θεμελιωδώς μη αναστρέψιμη διαδικασία. Αυτός ο «στραγγαλισμός» λόγω της αντίστασης στη ροή σε γραμμές παροχής, εναλλάκτες θερμότητας, αναγεννητές, και άλλα συστατικά των θερμικών μηχανών είναι μία πηγή απωλειών που περιορίζει την απόδοση.

Περιγραφή

Η αδιαβατική (μεταβολή κατά την οποία δεν ανταλλάσσεται θερμότητα) διαστολή ενός αερίου μπορεί να πραγματοποιείται κατά διάφορους τρόπους. Η αλλαγή στην θερμοκρασία που συμβαίνει στο αέριο κατά τη διάρκεια της διαστολής εξαρτάται όχι μόνο από την αρχική και τελική πίεση, αλλά επίσης και από τον τρόπο με τον οποίο διεξάγεται αυτή η εκτόνωση.

- Εάν η διαδικασία εκτόνωσης είναι αναστρέψιμη, πράγμα που σημαίνει ότι το αέριο είναι σε θερμοδυναμική ισορροπία κατά τη διάρκεια της μετάβασης, ονομάζεται ισεντροπική εκτόνωση. Σε αυτό το σενάριο, το αέριο κάνει θετικό έργο κατά τη διάρκεια της εκτόνωσης, και η θερμοκρασία του μειώνεται.
- Σε μια ελεύθερη εκτόνωση, από την άλλη πλευρά, το αέριο δεν παράγει έργο και δεν απορροφά θερμότητα, έτσι ώστε η εσωτερική του ενέργεια διατηρείται. Η θερμοκρασία ενός ιδανικού αερίου, που εκτονώνεται με αυτόν τον τρόπο, θα παραμείνει σταθερή, αλλά η θερμοκρασία ενός πραγματικού

αερίου πρέπει να μειωθεί καθώς η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε δυναμική ενέργεια, ώστε να ξεπεραστούν ελκτικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων. Ωστόσο, είναι δυνατόν να έχουμε μια αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ελεύθερης διαστολής ενός υγρού.

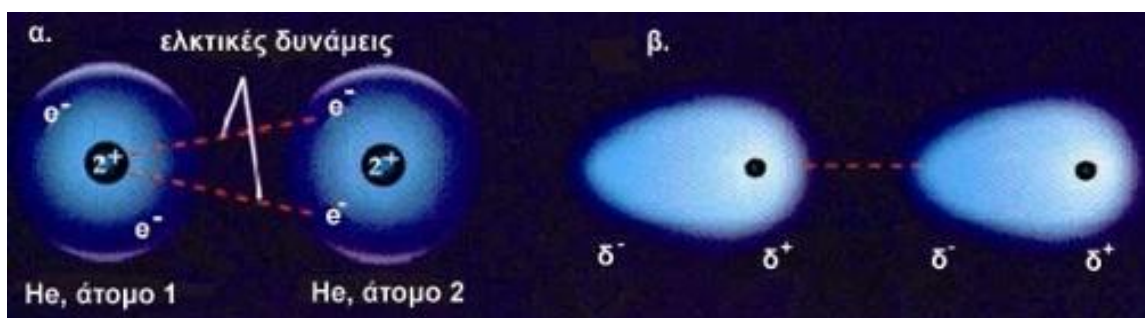
Η μέθοδος της εκτόνωσης που περιγράφεται παρακάτω, είναι αυτή κατά την οποία το αέριο ή το υγρό μιας πίεσης P_1 ρέει προς μια περιοχή χαμηλότερης πίεσης P_2 μέσω μιας βαλβίδας ή πορώδους βύσματος («στραγγαλισμός») υπό συνθήκες σταθερής κατάστασης και χωρίς αλλαγή στην κινητική του ενέργεια, και ονομάζεται η εκτόνωση Joule-Thomson. Η εκτόνωση αυτή είναι μη αναστρέψιμη καθώς δεν μπορεί να υπάρξει μια συμπίεση Joule-Thompson. Κατά τη διάρκεια αυτής της εκτόνωσης, η ενθαλπία παραμένει αμετάβλητη (βλέπε απόδειξη παρακάτω). Σε αντίθεση με μια ελεύθερη εκτόνωση υπάρχει έργο, προκαλώντας έτσι μια αλλαγή στην εσωτερική ενέργεια. Κατά πόσον η εσωτερική ενέργεια αυξάνεται ή μειώνεται εξαρτάται από το αν παράγεται ή καταναλώνεται έργο από το ρευστό. Αυτό καθορίζεται από τις αρχικές και τελικές καταστάσεις της εκτόνωσης και τις ιδιότητες του ρευστού.

Μια διαδικασία «στραγγαλισμού» προχωρά κατά μήκος μιας σταθερής καμπύλης ενθαλπίας στην κατεύθυνση της μείωσης της πίεσης, το οποίο σημαίνει ότι η διαδικασία λαμβάνει χώρα από δεξιά προς τα αριστερά σε ένα διάγραμμα θερμοκρασίας-πίεσης. Εάν η πίεση ξεκινάει αρκετά υψηλά, η θερμοκρασία αυξάνεται καθώς η πίεση πέφτει, έως ότου επιτευχθεί μια θερμοκρασία αντιστροφής και μια μεταβατική φάση εμφανίζεται, που ονομάζεται το σημείο αντιστροφής. Μετά από αυτό, καθώς το ρευστό συνεχίζει την εκτόνωσή του, η θερμοκρασία αρχίζει να πέφτει αμέσως. Αν μετράμε αυτό το σημείο, με τη χρήση ενός συγκεκριμένου αερίου, για αρκετές σταθερές ενθαλπίες, και εντάξουμε τα σημεία αναστροφής, θα δημιουργήσουμε την καμπύλη αντιστροφής. Η καμπύλη αντιστροφής τέμνει τον άξονα T σε κάποια θερμοκρασία, που ονομάζεται η μέγιστη θερμοκρασία αντιστροφής, διότι αντιστροφή δεν μπορεί να συμβεί πάνω από αυτή τη θερμοκρασία, ανεξάρτητα από την πίεση.

Παράρτημα 2

Δυνάμεις διασποράς - London

Οι δυνάμεις διασποράς London είναι οι ασθενέστερες όλων των διαμοριακών δυνάμεων. Δημιουργούνται μεταξύ μορίων που δεν παρουσιάζουν ηλεκτρική ροπή και η ύπαρξή τους ερμηνεύεται με την παραδοχή της στιγμιαίας ανισοκατανομής του ηλεκτρικού φορτίου. Δεχόμαστε δηλαδή ότι το ηλεκτρονικό νέφος ταλαντούται με συχνότητα f , οπότε εμφανίζεται αντίστοιχα ηλεκτρική ροπή, που ταλαντούται με την ίδια συχνότητα, αλλά της οποίας η μέση τιμή ως προς το χρόνο είναι μηδενική. Ένα στιγμιαίο δίπολο μπορεί να προκαλέσει εξ επαγωγής ηλεκτρική πόλωση σε γειτονικό μόριο (ή άτομο). Αυτές οι δυνάμεις μεταξύ στιγμιαίων διπόλων ονομάζονται **δυνάμεις διασποράς London**. Η ευκολία με την οποία ένα ηλεκτρονιακό νέφος ανισοκατανέμεται και επομένως η ικανότητα στιγμιαίας πόλωσης εκφράζεται από τον **συντελεστή πόλωσης α** . Όσο μεγαλύτερο είναι το μόριο (και επομένως μεγαλύτερος ο αριθμός των ηλεκτρονίων του) τόσο μεγαλύτερη η ικανότητα του πόλωσης. Οι δυνάμεις διασποράς London γίνονται ισχυρότερες με την αύξηση του μοριακού βάρους, εμφανίζονται μεταξύ όλων των μορίων και εξαρτώνται και από την γεωμετρία του μορίου. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαθέσιμη επιφάνεια σύνδεσης τόσο ισχυρότερες είναι οι δυνάμεις διασποράς. Οι δυνάμεις διασποράς London είναι ασθενέστερες μεταξύ σφαιρικών μορίων συγκριτικά με αυτές μεταξύ μη-σφαιρικών μορίων.



Παράρτημα 3

Θερμοδυναμικές μετρήσεις υγρού ηλίου σε πίεση κορεσμένων ατμών

Temperature K	Pressure 10 ⁶ Pa	Density kg/m ³	Isotherm derivative 10 ³ m ³ · Pa/kg	Isochore derivative 10 ⁶ Pa/K	Internal energy kJ/kg	Enthalpy kJ/kg	Entropy kJ/kg · K	C _p		Velocity of sound m/s
								kJ/kg · K	K	
*2.177	0.05035	146.2								
*2.177	0.05035	1.177	0.0403	0.0249	6.400	10.68	12.03	3.20	5.61	84.10
2.20	0.05326	146.1	0.459	1.60	-11.49	-11.45	1.782	3.10	3.16	216.1
2.20	0.05326	1.235	0.0405	0.0261	6.458	10.77	11.96	3.20	5.63	84.45
2.25	0.05994	146.0	0.455	1.88	-11.34	-11.30	1.849	2.78	2.81	216.4
2.25	0.05994	1.365	0.0411	0.0289	6.582	10.97	11.82	3.20	5.66	85.19
2.30	0.06717	145.8	0.451	2.05	-11.20	-11.16	1.907	2.46	2.56	216.7
2.30	0.06717	1.503	0.0416	0.0319	6.706	11.17	11.68	3.21	5.69	85.91
2.35	0.07497	145.6	0.447	2.23	-11.08	-11.03	1.960	2.25	2.38	217.1
2.35	0.07497	1.649	0.0421	0.0350	6.825	11.37	11.56	3.21	5.73	86.61
2.40	0.08337	145.3	0.442	2.40	-10.97	-10.91	2.008	2.10	2.25	217.4
2.40	0.08337	1.805	0.0425	0.0384	6.944	11.56	11.43	3.22	5.77	87.29
2.45	0.09241	145.1	0.436	2.55	-10.86	-10.79	2.053	2.00	2.17	217.7
2.45	0.09241	1.970	0.0429	0.0419	7.062	11.75	11.31	3.22	5.81	87.95
2.50	0.1021	144.8	0.430	2.68	-10.75	-10.68	2.097	1.93	2.13	217.9
2.50	0.1021	2.144	0.0433	0.0457	7.177	11.94	11.20	3.22	5.85	88.60
2.55	0.1125	144.5	0.424	2.79	-10.65	-10.57	2.138	1.88	2.11	217.9
2.55	0.1125	2.327	0.0436	0.0497	7.290	12.12	11.09	3.23	5.89	89.22
2.60	0.1235	144.2	0.417	2.90	-10.54	-10.46	2.179	1.85	2.10	217.7
2.60	0.1235	2.521	0.0440	0.0539	7.401	12.30	10.98	3.23	5.93	89.82
2.65	0.1353	143.8	0.410	2.99	-10.44	-10.34	2.219	1.84	2.12	217.4
2.65	0.1353	2.725	0.0443	0.0583	7.510	12.48	10.87	3.24	5.98	90.40
2.70	0.1479	143.5	0.403	3.08	-10.33	-10.23	2.258	1.84	2.14	216.9
2.70	0.1479	2.939	0.0445	0.0630	7.617	12.65	10.77	3.24	6.02	90.97
2.75	0.1612	143.1	0.395	3.15	-10.23	-10.11	2.297	1.84	2.18	216.3
2.75	0.1612	3.164	0.0447	0.0679	7.721	12.82	10.67	3.24	6.07	91.51
2.80	0.1753	142.8	0.388	3.22	-10.12	-9.99	2.336	1.85	2.22	215.5
2.80	0.1753	3.401	0.0449	0.0731	7.824	12.98	10.58	3.25	6.13	92.04
2.85	0.1903	142.4	0.380	3.28	-10.01	-9.883	2.375	1.87	2.27	214.7
2.85	0.1903	3.648	0.0451	0.0785	7.924	13.14	10.48	3.25	6.18	92.56
2.90	0.2060	142.0	0.371	3.34	-9.904	-9.759	2.414	1.88	2.31	213.7
2.90	0.2060	3.908	0.0452	0.0842	8.021	13.29	10.39	3.26	6.24	93.05
2.95	0.2227	141.6	0.363	3.39	-9.790	-9.633	2.454	1.90	2.37	212.6
2.95	0.2227	4.179	0.0453	0.0902	8.116	13.44	10.30	3.26	6.30	93.53
3.00	0.2402	141.1	0.355	3.44	-9.673	-9.503	2.493	1.92	2.42	211.5
3.00	0.2402	4.463	0.0453	0.0965	8.209	13.59	10.22	3.26	6.36	93.99
3.05	0.2587	140.7	0.346	3.49	-9.554	-9.370	2.533	1.94	2.48	210.3
3.05	0.2587	4.760	0.0454	0.103	8.299	13.73	10.13	3.27	6.42	94.44

Συνέχεια πίνακα παραρτήματος 3

Temperature K	Pressure 10 ⁶ Pa	Density kg/m ³	Isotherm derivative 10 ⁶ m ³ ·Pa/kg	Isochore derivative 10 ⁶ Pa/K	Internal energy kJ/kg	Enthalpy kJ/kg	Entropy kJ/kg·K	C _p , C _v		Velocity of sound m/s
								kJ/kg·K		
3.10	0.2780	140.2	0.337	3.53	-9.432	-9.234	2.573	1.96	2.54	209.1
3.10	0.2780	5.070	0.0453	0.110	8.386	13.87	10.05	3.27	6.49	94.87
3.15	0.2984	139.8	0.329	3.56	-9.308	-9.094	2.613	1.98	2.60	207.08
3.15	0.2984	5.394	0.0453	0.117	8.470	14.00	9.97	3.27	6.56	95.28
3.20	0.3197	139.3	0.320	3.60	-9.180	-8.951	2.653	2.00	2.67	206.5
3.20	0.3197	5.731	0.0452	0.125	8.551	14.13	9.884	3.28	6.64	95.68
3.25	0.3421	138.8	0.311	3.63	-9.051	-8.804	2.693	2.02	2.73	205.2
3.25	0.3421	6.084	0.0451	0.133	8.630	14.25	9.805	3.28	6.72	96.06
3.30	0.3655	138.3	0.302	3.66	-8.918	-8.654	2.734	2.04	2.80	203.8
3.30	0.3655	6.452	0.0449	0.141	8.705	14.37	9.727	3.28	6.80	96.42
3.35	0.3899	137.7	0.293	3.68	-8.782	-8.499	2.775	2.06	2.87	202.4
3.35	0.3899	6.815	0.0447	0.150	8.798	14.49	9.650	3.29	6.90	96.77
3.40	0.4155	137.2	0.284	3.71	-8.644	-8.341	2.817	2.07	2.95	201.0
3.40	0.4155	7.235	0.0445	0.159	8.847	14.59	9.574	3.29	7.98	97.10
3.45	0.4421	136.6	0.275	3.73	-8.503	-8.179	2.858	2.09	3.02	199.5
3.45	0.4421	7.651	0.0442	0.168	8.912	14.69	9.499	3.29	7.08	97.41
3.50	0.4699	136.0	0.266	3.74	-8.358	-7.913	2.900	2.11	3.10	198.0
3.50	0.4699	8.085	0.0439	0.178	8.974	14.79	9.425	3.30	7.18	97.71
3.55	0.4988	135.4	0.258	3.76	-8.210	-7.842	2.943	2.13	3.19	196.5
3.55	0.4988	8.517	0.0435	0.189	9.033	14.88	9.357	3.30	7.30	98.00
3.60	0.5289	134.8	0.249	3.77	-8.059	-7.667	2.985	2.14	3.28	194.9
3.60	0.5289	9.008	0.0431	0.200	9.088	14.96	9.279	3.30	7.40	98.27
3.65	0.5602	134.1	0.240	3.78	-7.905	-7.487	3.029	2.16	3.37	193.4
3.65	0.5602	9.498	0.0427	0.211	9.139	15.04	9.207	3.31	7.52	98.52
3.70	0.5927	133.5	0.231	3.79	-7.747	-7.300	3.072	2.18	3.47	191.7
3.70	0.5927	10.01	0.0422	0.223	9.186	15.11	9.136	3.31	7.66	98.75
3.75	0.6264	132.8	0.222	3.79	-7.585	-7.113	3.116	2.19	3.57	190.1
3.75	0.6264	10.54	0.0417	0.235	9.229	15.17	9.065	3.31	7.77	99.07
3.80	0.6614	132.1	0.213	3.79	-7.419	-6.919	3.161	2.21	3.68	188.4
3.80	0.6614	11.09	0.0411	0.248	9.268	15.23	8.994	3.32	7.94	99.17
3.85	0.6977	131.4	0.205	3.79	-7.250	-6.719	3.206	2.23	3.80	186.7
3.85	0.6977	11.67	0.0405	0.262	9.302	15.28	8.924	3.32	8.10	99.36
3.90	0.7354	130.6	0.196	3.79	-7.076	-6.510	3.251	2.25	3.92	184.9
3.90	0.7354	12.28	0.0398	0.276	9.332	15.32	8.854	3.33	8.27	99.5
3.95	0.7743	129.8	0.187	3.78	-6.898	-6.302	3.298	2.26	4.05	183.1
3.95	0.7743	12.90	0.0391	0.291	9.366	15.36	8.784	3.33	8.46	99.7
4.00	0.8147	129.0	0.179	3.77	-6.716	-6.084	3.345	2.28	4.19	181.2
4.00	0.8147	13.56	0.0384	0.306	9.376	15.38	8.714	3.33	8.65	99.8
4.05	0.8564	128.2	0.170	3.76	-6.529	-5.860	3.392	2.30	4.35	179.2
4.05	0.8564	14.24	0.0376	0.323	9.390	15.40	8.644	3.34	8.87	99.9

Συνέχεια πίνακα παραρτήματος 3

Temperature K	Pressure 10 ⁵ Pa	Density kg/m ³	Isotherm derivative 10 ³ m ³ ·Pa/kg	Isochore derivative 10 ³ Pa/K	Internal energy kJ/kg	Enthalpy kJ/kg	Entropy kJ/kg·K	C _p , C _v		Velocity of sound m/s
								C _v	C _p	
								kJ/kg·K		
4.10	0.8995	127.3	0.162	3.74	-6.336	-5.630	3.440	2.32	4.51	177.2
4.10	0.8995	14.96	0.0367	0.340	9.399	15.41	8.574	3.34	9.10	100.0
4.15	0.9441	136.4	0.153	3.72	-6.139	-5.392	3.490	2.34	4.69	175.2
4.15	0.9441	15.71	0.0358	0.358	9.401	15.41	8.503	3.34	9.35	100.1
4.20	0.9902	125.4	0.145	3.70	-5.936	-5.146	3.540	2.36	4.88	173.0
4.20	0.9902	16.49	0.0349	0.377	9.397	15.40	8.432	3.35	9.63	100.1
4.224	1.013	125.0	0.141	3.69	-5.834	-5.023	3.564	2.37	4.98	172.0
4.224	1.013	16.89	0.0344	0.386	9.393	15.39	8.397	3.35	9.78	100.2
4.25	1.038	124.5	0.136	3.67	-5.726	-4.893	3.591	2.38	5.09	170.8
4.25	1.038	17.32	0.0338	0.397	9.387	15.38	8.361	3.35	9.94	100.2
4.30	1.087	122.5	0.130	3.64	-5.511	-4.671	3.643	2.40	5.29	168.4
4.30	1.087	18.18	0.0328	0.418	9.368	15.35	8.288	3.35	10.3	100.2
4.35	1.138	122.4	0.120	3.61	-5.289	-4.360	3.696	2.42	5.58	166.2
4.35	1.138	19.09	0.0316	0.440	9.342	15.30	8.215	3.36	10.7	100.2
4.40	1.190	121.3	0.112	3.58	-5.069	-4.078	3.750	2.44	5.86	163.8
4.40	1.190	20.05	0.0304	0.463	9.307	15.24	8.140	3.36	11.1	100.1
4.45	1.244	120.2	0.104	3.54	-4.822	-3.787	3.806	2.47	6.18	161.3
4.45	1.244	21.06	0.0291	0.488	9.262	15.17	8.064	3.36	11.6	100.1
4.50	1.299	118.9	0.0967	3.49	-4.576	-3.484	3.863	2.49	6.55	158.4
4.50	1.299	22.13	0.0278	0.514	9.207	15.08	7.986	3.37	12.1	100.0
4.55	1.357	117.7	0.0878	3.45	-4.320	-3.168	3.923	2.51	6.96	155.9
4.55	1.357	23.27	0.0264	0.543	9.140	14.97	7.907	3.37	12.8	99.9
4.60	1.416	116.3	0.0800	3.40	-4.055	-2.838	3.984	2.54	7.44	153.1
4.60	1.416	24.49	0.0248	0.573	9.060	14.84	7.825	3.37	13.5	99.7
4.65	1.476	114.9	0.0723	3.34	-3.777	-2.492	4.047	2.57	8.01	150.2
4.65	1.476	25.79	0.0233	0.605	8.965	14.69	7.740	3.38	14.4	99.6
4.70	1.539	113.4	0.0647	3.28	-3.486	-2.150	4.113	2.59	8.68	147.1
4.70	1.539	27.19	0.0216	0.641	8.853	14.51	7.651	3.38	15.5	99.38
4.75	1.603	111.8	0.0572	3.22	-3.180	-1.746	4.182	2.62	9.51	144.0
4.75	1.603	28.71	0.0198	0.679	8.722	14.31	7.558	3.38	16.8	99.16
4.80	1.670	110.1	0.0499	3.15	-2.856	-1.339	4.255	2.66	10.5	140.7
4.80	1.670	30.37	0.0179	0.721	8.566	14.06	7.461	3.38	18.5	98.91
4.85	1.738	108.2	0.0427	3.07	-2.510	-0.9042	4.332	2.69	11.9	137.3
4.85	1.738	32.21	0.0160	0.768	8.382	13.78	7.356	3.39	20.7	98.65
4.90	1.808	106.1	0.0357	2.99	-2.138	-0.4345	4.415	2.73	13.6	133.7
4.90	1.808	34.25	0.0139	0.820	8.163	13.44	7.244	3.39	23.6	98.37
4.95	1.880	103.7	0.0289	2.90	-1.733	0.07862	4.505	2.76	16.1	129.9
4.95	1.880	36.58	0.0117	0.880	7.897	13.04	7.130	3.39	27.9	98.09
5.00	1.954	101.1	0.0224	2.80	-1.283	0.6496	4.605	2.81	19.9	126.0
5.00	1.954	39.30	0.00937	0.950	7.570	12.54	6.982	3.39	34.6	97.83
5.05	2.031	97.96	0.0162	2.68	-0.7706	1.302	4.720	2.86	26.1	121.8
5.05	2.031	42.58	0.00697	1.04	7.152	11.92	6.821	3.38	46.2	97.64

Παράρτημα 4

Κανόνας του Trouton

Ο Κανόνας Trouton αναφέρει ότι η εντροπία εξάτμισης ΔS_{vap} έχει σχεδόν η ίδια τιμή, περίπου 85-88 J/molK, για τα διάφορα είδη υγρών στα σημεία βρασμού τους. Η εντροπία εξάτμισης ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ του ενθαλπίας της εξάτμισης και της θερμοκρασίας βρασμού.

$$\frac{h_{fg}}{T_b} \approx \text{σταθερά}$$

Πήρε το όνομά του από τον Frederick Thomas Trouton.

Μαθηματικά, αυτό μπορεί να εκφραστεί επίσης ως:

$$\Delta S_{\text{vap}} = 4.5R + R \ln T$$

Όπου R η παγκόσμια σταθερά των αερίων και T η θερμοκρασία.

Λόγω της ευκολίας του, ο κανόνας του Trouton χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ενθαλπίας εξάτμισης των υγρών των οποίων τα σημεία ζέσεως είναι γνωστά.

Βιβλιογραφία

- Helium Cryogenics, Steven W. Van Sciver, second edition, Springer Science+Business Media, LLC 2012
- Thermodynamic analysis of Collins helium liquefaction cycle, M.D. Atrey, Cryogenics Section, Centre for Advanced Technology, India, Received 13 March 1998
- Design of Helium Refrigeration and Liquefaction Systems - Simplified Concepts & Practical View Points, VenkataRao Ganni, Ph. D., March 2004
- Thermodynamic Properties of He 4 from 2 to 1500 K at pressures to 10^8 Pa, Robert D. McCarty, J. Phys. Chem. Ref. Data Vol. 2 No. 4, 1973
- Joule-Thomson Process in the Liquefaction of Helium, Edmund H. Brown and John W. Dean, March 1958. Journal of Research of the National Bureau of Standards, research paper 2834
- <http://www.weldingandgasestoday.org/index.php/2009/12/areas-for-success-in-2010/>
- AP Chemistry – Mr Thompson, <http://elearning.nccsc.k12.in.us/course/view.php?id=369>
- www.cryomech.com, Liquid Helium Plants and Helium Recovery Systems
- https://en.wikipedia.org/wiki/Trouton%27s_rule
- https://en.wikipedia.org/wiki/Joule%E2%80%93Thomson_effect

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο τέλος του μεταπτυχιακού μου και αυτής της εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογενειά μου και ιδίως τη γυναίκα μου που με παρότρυνε να παρακολουθήσω αυτό το μεταπτυχιακό πρόγραμμα και με στήριξε κατά τη διάρκειά του.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές κ. Κωνσταντίνο Κουσουρή και κ. Απόστολο Κυρίτη που συμμετείχαν στην τριμελή επιτροπή. Ευχαριστώ κυρίως τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Σανάκη για όλα όσα μου έμαθε, για τη στήριξή του, την καθοδήγησή του και γενικά όλη τη συνεργασία που είχαμε όλο αυτό το διάστημα.

Η ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας έγινε στις εγκαταστάσεις του Εθνικού Κέντρου Ερευνών Φυσικών Επιστημών ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ, όπου και εργάζομαι τα τελευταία 10 χρόνια.